L'ingrédient négligé

Comment un oxyde métallique anodin en apparence déclenche une rupture mondiale dans la protection du travail et de l'environnement

par Markus Sommer

Długołęka, octobre 2026

Version 1.11 · octobre 2026

À propos de l'auteur

Je viens d'une famille d'isolateurs. Chez nous, le métier était fixé dès la naissance. Comme je n'étais pas particulièrement utile en tant qu'artisan, on m'a placé au bureau, et c'est là que je suis devenu responsable des documents. Dans les années quatre-vingt-dix, j'écrivais encore nos fiches techniques à la machine à écrire. Nous voulions indiquer les compositions de manière complète, je recopiais donc encore et encore les constituants des tissus de verre, des laines minérales et des laines de basalte : dioxyde de silicium, oxyde d'aluminium, oxyde de calcium.

Mon père s'est établi à son compte en 1988 comme fabricant d'isolations textiles. Trois ans plus tard, il est mort à 59 ans d'une asbestose. Il n'avait jamais travaillé directement avec l'amiante, mais dans des locaux où l'on avait autrefois fabriqué des nattes isolantes en amiante. Personne n'avait assaini ces locaux.

Le 9 août 2019, j'étais assis dans un café en Autriche. La veille, nous avions équipé à proximité, chez un motoriste, un prototype d'une nouvelle isolation thermique. À 10 h 00, j'ai reçu de celui-ci un courriel intitulé « Chromium-6 alert ». Sur des moteurs en service, on avait trouvé des dépôts dont le test au chrome(VI) s'était révélé positif.

Jusqu'alors, je ne connaissais le terme chrome(VI) que par le film « Erin Brockovich ».

Ce jour-là, une phrase m'a échappé. On nous demandait si nos produits contenaient du calcium, car le calcium favoriserait la formation de chrome(VI).

Le calcium. Un constituant dont j'ai écrit le nom pendant des années, souvent à la machine à écrire, dans nos fiches techniques. La chimie n'a jamais été ma matière préférée, mais le chrome(VI) et le calcium n'allaient tout simplement pas ensemble sur le plan chimique, à mes yeux. Ma curiosité était éveillée et j'ai commencé à chercher. Et j'ai trouvé le lien entre le chrome(VI) et le calcium, l'ingrédient négligé.

Markus Sommer

Introduction

Les isolants haute température contiennent des oxydes basiques, avant tout de l'oxyde de calcium et de l'oxyde de sodium. Aucun des deux n'est classé comme cancérogène et aucun des deux n'apparaît dans une analyse portant sur le chrome(VI). Au-dessus d'environ 300 °C, ils réagissent avec la couche d'oxyde de chrome des pièces chaudes alliées au chrome pour former du chromate de calcium et du chromate de sodium. Le résultat, ce sont des composés cancérogènes que personne n'a fabriqués, commandés ni installés.

Dans l'incinération des déchets, les oxydes basiques proviennent du produit incinéré lui-même. S'y ajoutent les sorbants de l'épuration acide des fumées, chaux hydratée ou bicarbonate de sodium, qui ne sont toutefois injectés que dans le circuit des fumées après la chaudière et qui concernent donc la poussière de filtre et les parties d'installation situées en aval.

Faisant partie des cendres, les oxydes issus du produit incinéré rencontrent les surfaces contenant du chrome des éléments de grille et des parcours de chaudière, et des chromates se forment. Lors de la révision suivante, ces cendres sont remises en suspension et libérées, jusqu'ici souvent sans concept de protection.

L'emploi du terme générique « chrome(VI) » au lieu de la désignation correcte des composés du chrome(VI) (les chromates) a conduit à ce que pendant des décennies la question n'ait pas été posée de savoir quel composé est effectivement présent et quel partenaire de réaction l'a produit. Il en est résulté un parc d'installations, de véhicules, de composants et de résidus qui occupera les branches concernées pendant des décennies : production d'énergie, incinération des déchets, navigation, construction de véhicules, maintenance, déconstruction et élimination.

Pour la protection du travail et de l'environnement, il n'y a pas de différence selon que le chrome(VI) est utilisé de manière intentionnelle, s'est formé in situ ou peut se former à tout moment. S'il est trouvé ou si sa présence ne peut être exclue, il faut réagir. L'évaluation des risques aboutit au même résultat dans les trois cas.

Là où la formation peut être empêchée, elle doit l'être. Dans l'isolation haute température, il existe des produits de substitution qui excluent la voie de formation. Dans l'incinération des déchets, la formation ne peut pas être empêchée. Il reste à y reconnaître qu'elle a lieu et à redéfinir en conséquence la protection du travail et de l'environnement.

Les fondements ne sont pas seulement des brevets, des études et des documents de fabricants, mais aussi mes propres visites d'installation documentées depuis 2019, mes prélèvements surfaciques et prélèvements de matériau sur des moteurs, des centrales, des installations d'incinération, des navires, des véhicules et des engins de chantier. Cette expertise nomme le chrome(VI) avec ses composés, les partenaires de réaction qui en découlent et la voie par laquelle ils se combinent. C'est précisément cette formation qui peut être empêchée dans la plupart des cas. Et lorsque nous connaissons les composés, nous pouvons les maîtriser (incinération des ordures ménagères), les éliminer (technique d'isolation et assainissement) ou empêcher d'emblée leur formation (substitution). La question de savoir si l'on n'aurait pas dû le voir se pose ; mais parfois la vue est aussi obstruée. Ce qui s'est passé avec l'amiante devrait nous servir d'exemple d'avertissement. L'histoire ne doit pas se répéter, mais elle le fait déjà.

Résumé des constats essentiels et de leurs conséquences

Cette analyse technique s'adresse aux entreprises qui isolent, exploitent, entretiennent ou éliminent des pièces chaudes alliées au chrome, qui entretiennent des véhicules ou qui manipulent des résidus d'incinération. Elle expose comment le chromate de calcium et le chromate de sodium se forment in situ dans ces domaines, quelles preuves en existent et quelles obligations en découlent.

Le constat central

Une isolation qui ne contient pas de chrome(VI) à l'état de livraison peut, par sa propre composition, contribuer à la formation de chromates en service. L'indication qu'un isolant ne contient pas de chrome(VI) à l'état de livraison ne répond pas à la question de savoir s'il contribue à la formation de chromate dans son application prévue.

Formation et portée

La formation suppose quatre conditions : une source de chrome, en règle générale la couche d'oxyde de l'acier allié au chrome, un oxyde basique comme partenaire de réaction, de l'oxygène et une température élevée. Le chromate de sodium se forme à partir d'environ 200 °C, le chromate de calcium à partir d'environ 300 à 350 °C. Le partenaire de réaction provient du silicate de calcium, de la laine minérale et de la laine de roche, du tissu de verre E, des laines AES, des masses réfractaires, des pâtes de montage ou des résidus d'incinération.

Le sujet n'est donc lié ni à un produit ni à un fabricant. Les oxydes basiques sont un constituant constitutif du bain de verre à partir duquel la plupart des fibres haute température sont tirées, et ils entrent nécessairement dans la formulation par le calcin, le calcaire et la dolomie (section 13).

État des preuves

La voie de formation est décrite dans des brevets depuis 1939 et a été confirmée depuis à plusieurs reprises par l'expérience, en dernier lieu par la mise en évidence directe de chromate de calcium et de chromate de sodium à l'interface entre le métal et l'isolant (section 10). Fabricants et exploitants l'ont décrite depuis 1990 dans leurs propres communications, à commencer par le Plant Service Bulletin de Babcock & Wilcox et ensuite dans des notes de service et des instructions techniques des années 2020 à 2025 (section 16). S'y ajoutent mes propres visites d'installation, prélèvements surfaciques et prélèvements de matériau depuis 2019 sur des moteurs, des centrales, des installations d'incinération, des navires, des véhicules et des engins de chantier (section 28). Ces trois fils sont indépendants les uns des autres et étayent le même constat.

Besoin d'action

La TRGS 561 allemande exige le régime de protection dès lors qu'une exposition ne peut être exclue. Pour l'évaluation des risques, il est indifférent que le chromate ait été utilisé de manière intentionnelle ou qu'il se soit formé in situ. La substitution est prioritaire : des isolants haute température sans oxydes alcalins et alcalino-terreux disponibles pour la réaction existent. Là où la formation n'est pas évitable, par exemple dans l'incinération des déchets, il reste la reconnaissance du processus et l'organisation de la protection du travail et de l'environnement qui y est adaptée.

Conséquences pratiques

Lors du démontage, de la maintenance, du nettoyage, de la révision, de la déconstruction et de la réutilisation, les chromates formés en service peuvent être libérés et exposer des personnes. La poussière porte le chromate, et elle quitte la zone de travail avec les outils, les vêtements et les composants.

Le nettoyage et la décontamination agissent pour l'opération de travail concernée. Ils n'éliminent pas la cause liée au matériau : si l'isolation contenant du calcium reste sur la pièce chaude alliée au chrome, des chromates se forment de nouveau lors de la sollicitation thermique suivante (section 26).

Une levée d'alerte analytique n'est fiable que dans la mesure où l'est le taux de récupération du procédé sur cette matrice. Pour les isolants thermiques, il n'existe pas de méthode normalisée ; les procédés transposés livrent des résultats sous-estimés jusqu'à près de zéro. Un résultat nul sans indication du taux de récupération n'est pas une preuve d'absence (section 17).

Ce qui est prouvé et ce qui reste ouvert

Sont prouvés la voie de formation, les composés impliqués, les plages de température et l'état des connaissances chez les fabricants et les exploitants. De la vue d'ensemble il découle que le processus n'est pas un cas isolé, mais qu'il peut survenir sur toute combinaison d'une pièce chaude alliée au chrome et d'un isolant basique. L'ordre de grandeur du parc d'installations concerné est inconnu, parce qu'il n'a jamais été recensé sous cet angle.

Restent ouvertes les conditions limites quantitatives : les seuils de température exacts dans le cas particulier, l'influence de la teneur en chrome de l'alliage, la teneur nécessaire en oxyde de calcium ou de sodium, la cinétique, l'humidité et le nombre de cycles. Ces questions ne peuvent pas recevoir sérieusement de réponse générale, et cela ne changera guère dans un avenir prévisible. Elles concernent l'intensité de la réaction, non son existence.

Dans les prises de position de fabricants d'isolants et d'autorités, le mécanisme de formation non définitivement élucidé est parfois invoqué pour différer des conséquences plus étendues. Cette distinction ne résiste pas à l'état des preuves.

Que le chromate de calcium et le chromate de sodium se forment à l'interface entre le métal allié au chrome et l'isolant basique est décrit dans des brevets, démontré expérimentalement, confirmé par des fabricants dans leurs propres communications et trouvé à plusieurs reprises sur le terrain. Ce qui est en discussion est la précision des conditions limites, non le processus lui-même.

S'y ajoute une particularité structurelle. Les autorités, les organismes d'assurance accidents, les associations de fabricants et les associations du secteur des polluants travaillent depuis des décennies en étroite collaboration avec les fabricants des substituts de l'amiante, et cette collaboration a produit un corpus de règles étendu et fonctionnel pour l'assainissement de l'amiante et l'emploi approprié des produits de substitution.

Que les mêmes classes de matériaux, en dehors de l'isolation des bâtiments, à savoir dans l'isolation industrielle haute température, entrent maintenant elles-mêmes dans le champ de la formation de chromate en raison de leurs constituants est une évolution inconfortable. Elle ne change rien à l'état des preuves.

Le bâtiment et les équipements techniques du bâtiment d'une part et l'isolation haute température d'autre part doivent être séparés quant à l'application, à la température de service et aux conséquences. Cette séparation découle du droit de la protection du travail et de l'environnement, car ce qui est évalué est l'activité dans ses conditions réelles et non la classe de matériau en général.

Un isolant qui est sans danger dans le bâtiment peut créer un problème de chromate sur une pièce chaude alliée au chrome.

Cette distinction doit être reconnue, même si elle est inconfortable pour les fabricants concernés et pour les instances de surveillance. Qu'elle ne soit faite que maintenant est compréhensible au vu de l'histoire des matériaux.

Possible, cette analyse technique le montre clairement, elle l'aurait été plus tôt.

La chimie ne ment pas.

Sommaire

A. Le thème négligé 10
1. Le savoir est documenté depuis des décennies 10
2. Le sujet est arrivé en Europe 11
3. Le malentendu sur le chrome(VI) : terme générique et composé individuel 12
4. Champs d'application et chromates attendus 15
5. Pourquoi le sujet n'est pas reconnu 17
6. Pourquoi cela devient un sujet 19

B. Fondements 20
7. Le brevet de 1938/1939 : le chromate de calcium comme produit de réaction délibérément généré 20
8. Le sodium : accélérateur, agent de pilotage et formateur de chromate 20
9. Le cœur chimique de la voie de formation 20
10. Mise en évidence expérimentale directe : du mélange modèle à l'interface métal-isolant 21

C. Technique d'isolation : pièces chaudes et isolation 24
11. Du grillage métallurgique à l'isolation haute température 24
12. Signification pour les tissus de verre E, le silicate de calcium, la laine minérale et les systèmes d'isolation à base d'aérogel 25
13. Le dilemme des fabricants d'isolants 26
14. Transport en phase gazeuse : Tatar/Gannon et van Leeuwen 27
15. L'époque de l'amiante, la substitution de l'amiante et le chrysotile 29
16. Avertissements des fabricants et des exploitants : état des connaissances industrielles documenté 33
17. Analytique : la méthode détermine le constat 37
18. Les réglementations en comparaison : une référence, cinq déclinaisons 39
19. La philosophie du test rapide et l'étude de terrain française 41

D. Véhicules 43
20. Moteurs de véhicules et compartiments moteur 43

E. Résidus d'incinération : cendres, dépôts de chaudière, crémation 46
21. Cendres d'incinération et dépôts de chaudière 46
22. État des connaissances en Europe sur les résidus d'incinération 47
23. Crémations et autres produits incinérés contenant du chrome 48

F. Santé, réglementation, questions ouvertes et conclusion 50
24. Conséquences sanitaires et écologiques des chromates 50
25. Fabriqué industriellement ou formé in situ : un contrôle inégal 53
26. Remèdes supposés : neutralisation, WD-40 et le chrome(III) « inoffensif » 57
27. Le chrome(III) : l'état final supposé 64
28. Nos propres constats de terrain 67
29. Ce qui peut encore être étudié et ce qui n'est plus ouvert 68
30. Conséquences juridiques en cas de non-respect 69
31. Sur le choix du corpus réglementaire cité 72
32. Ordre de grandeur : une expérience de pensée 74
33. Les obligations en France 76
34. Les obligations en Suisse 79
35. Les obligations en Allemagne 83
36. Les obligations dans l'Union européenne 89
37. Les obligations aux Pays-Bas 92
38. Les obligations au Royaume-Uni 97

39. Annexe : les matériaux isolants contenant des oxydes basiques et leurs lieux de mise en œuvre 107
40. Conclusion 112
41. Déclaration d'intérêts 114
Sources 115

A. Le thème négligé

1. Le savoir est documenté depuis des décennies

La voie de formation du chromate de calcium et du chromate de sodium n'est pas nouvelle. Elle est documentée dans des brevets, des travaux de recherche, des documents de fabricants et des corpus de règles sur plus de huit décennies. L'aperçu suivant nomme les étapes évaluées dans cette expertise ; les preuves figurent dans les sections indiquées.

Année	Source	Contenu documenté
1939	Brevet américain US 2,176,687 (Udy) [1]	Formation intentionnelle de chromate de calcium et de chromate de sodium à partir d'une source de chrome, de chaux ou de soude et d'oxygène (section 7).
2002	Paoletti, centre de recherche allemand de Karlsruhe [50]	Chromate de calcium issu d'oxyde de chrome et d'oxyde de calcium entre 500 et 850 °C dans l'incinération des déchets, en fonction de l'offre en oxygène (section 21).
2004	Vehlow, Paoletti, Seifert, Sirini [51]	Présentation des résultats, y compris la thermogravimétrie sur Cr_2O_3 et CaO avec le produit $CaCrO_4$ (section 21).
2010/2011	Toshiba, JP2011232021A [26]	Chromate de calcium à l'interface entre l'acier inoxydable et une isolation thermique contenant du calcium ; couche de séparation céramique comme approche de prévention (section 11).
2015	Sayano et al. [11]	$CaCrO_4$ et Na_2CrO_4 identifiés expérimentalement à l'interface entre un métal contenant du chrome et un isolant thermique (section 10).
2019	Correspondance de fabricant [redacted] [52]	Calcium issu du matériau isolant en réaction avec l'acier inoxydable contenant du chrome désigné comme cause ; apparition sur tous les types de moteurs (section 16).
2019	Energy UK, Hexavalent Chromium Safety Bulletin Summary [92]	Produit contenant du calcium, températures supérieures à 300 °C et acier contenant du chrome comme les trois conditions ; hypothèse de la présence sur tous les sites de centrales ; en même temps mention du WD-40 pour fixer et essuyer (section 26).
2019	Agence fédérale allemande de l'environnement (UBA) [44]	Cr(VI) dans la totalité des 25 cendres modèles de fours crématoires examinées (section 23).
2019	Document de référence MTD (BREF) européen sur l'incinération des déchets [34]	Le chrome hexavalent comme substance problématique au regard de la lixiviation à partir des cendres de fond (section 22).
2020/2021	Caterpillar ; Caterpillar Energy Solutions / Zeppelin [12, 13]	Constats de Cr(VI) sur des systèmes d'échappement et des isolations d'échappement ; traduction française du bulletin et circulaire en langue allemande (section 16).
2023	Rockwool, instruction européenne ProRox [16, 24]	Dépôts de Cr(VI) après emploi à haute température, danger cancérogène et mesures de protection lors du démontage (section 16).

Année	Source	Contenu documenté
2023	[redacted], [redacted] [25]	Acier contenant du chrome, calcium provenant par exemple du matériau isolant, oxygène et températures supérieures à 400 °C (section 16).
2023	MAN Truck & Bus SE, note de service 8339SM [14]	Chromate de calcium nommé ; pour les travaux de montage, exclusivement des pâtes sans calcium (section 16).
2025	Frenzelit, TechInfo 28 [15]	Teneurs en oxyde de calcium de ses propres matériaux d'isolation ; contribution de ses propres produits à la formation de Cr(VI) dans les conditions indiquées (section 16).
2025	[redacted], [redacted] ; [redacted], [redacted] [22, 23]	Formation de Cr(VI) sur des composants d'échappement chauds ; contaminations confirmées dans le compartiment moteur (section 20).
2025	Passeron et al., France [5]	Les tests rapides colorimétriques passent à côté de Cr(VI) mis en évidence par analyse de laboratoire (section 19).
2026	TRGS 561 allemande, version du 4 mai 2026 [19]	Oxydes de métaux alcalins/alcalino-terreux issus d'isolants ou de pâtes de montage comme facteur d'influence ; mesures de protection lorsqu'une exposition au chrome(VI) ne peut être exclue (section 6).
2026	Caisse professionnelle allemande BG ETEM [2]	Formation de chromates cancérogènes à des températures d'acier d'environ 350 à 800 °C sous l'effet d'isolants ou de pâtes de montage contenant des métaux alcalins et alcalino-terreux (section 11).

Qui combine aujourd'hui des pièces chaudes alliées au chrome avec des isolants basiques, les entretient ou les élimine ne s'appuie donc pas sur une question de recherche ouverte, mais sur une voie de réaction décrite depuis des décennies et confirmée à plusieurs reprises.

2. Le sujet est arrivé en Europe

Les documents de fabricants et d'exploitants de l'aperçu proviennent majoritairement d'Europe : de fabricants allemands (MAN, Frenzelit, [redacted]), d'un motoriste autrichien ([redacted]), d'un constructeur automobile britannique ([redacted]), de l'instruction européenne de Rockwool, de la circulaire en langue allemande de Caterpillar Energy Solutions et Zeppelin ainsi que de la traduction française du bulletin de Caterpillar. [12-16, 22, 23, 25]

S'y ajoutent des autorités, des corpus de règles et de la recherche en Europe : la caisse professionnelle allemande BG ETEM, la TRGS 561 allemande, l'Agence fédérale allemande de l'environnement (UBA), le document de référence MTD (BREF) européen sur l'incinération des déchets, le cas pratique britannique dans l'incinération des déchets et l'étude de terrain française sur la maintenance de moteurs diesel et de moteurs marins. L'association européenne des fabricants de laines isolantes haute température ECFIA a commandé des recherches sur la formation de Cr(VI) sur les laines isolantes (section 14). [2, 5, 19, 30, 34, 37, 44]

Le sujet n'est donc ni étranger ni théorique. Il figure dans les notes de service, les instructions techniques, les informations produits et les corpus de règles qui s'appliquent dans les entreprises, les ateliers et les installations européennes. Savoir s'il y est reconnu comme un sujet à part entière est une autre question.

3. Le malentendu sur le chrome(VI) : terme générique et composé individuel

L'amiante non plus n'était pas simplement l'amiante

L'amiante non plus n'était pas simplement l'amiante. Dans le langage courant, on distinguait tout au plus selon les couleurs, en amiante blanc, brun et bleu. Derrière cela se trouvent différents minéraux : le chrysotile, l'amosite et la crocidolite, auxquels s'ajoutent la trémolite, l'actinolite et l'anthophyllite. La directive européenne sur l'amiante 2009/148/CE énumère ces six minéraux fibreux séparément. [62] La distinction n'a toutefois été faite que là où elle était nécessaire : dans la science, dans la technique et plus tard dans la médecine, lorsqu'il a fallu distinguer la forme des fibres, leur résistance et le tableau clinique. Sur le chantier et dans l'usage courant, on en est resté à un seul mot. Cela a eu peu de conséquences, parce que chacun de ces minéraux était une fibre et que la fibre constituait le danger.

Il en va de manière semblable avec « chrome(VI) », sauf qu'ici même la distinction du langage courant manque. Le terme regroupe des composés fabriqués industriellement comme l'acide chromique, les dichromates et les peintures et primaires contenant du chromate tout autant que le chromate de calcium et le chromate de sodium, qui se forment en service. Celui qui entend « chrome(VI) » pense à des substances qu'il n'emploie pas lui-même et en conclut que le sujet ne le concerne pas. Le chromate de calcium et le chromate de sodium comme produits de réaction de sa propre exploitation n'apparaissent pas dans cette image. Que le chromate de calcium compte, dans l'expérimentation animale, parmi les chromates les plus actifs disparaît également derrière le terme générique (sections 24 et 25).

Le préfixe nomme le partenaire de réaction

Dans presque chaque constat établi, derrière la désignation « chrome(VI) » se trouve un sel, un chromate ou un dichromate, et le préfixe de ce sel nomme son partenaire de réaction : chromate de plomb, chromate de zinc, chromate de strontium, chromate de sodium, chromate de calcium. Le préfixe n'est pas une formalité. Il est l'autre moitié de la substance et dit d'où elle vient. Le trioxyde de chrome et l'acide chromique ne sont pas des sels et n'ont pas un tel partenaire. Ils n'en sont pas moins cancérogènes, mais relèvent de la galvanoplastie et du traitement de surface, où l'usage est voulu et déclaré.

Les partenaires de réaction sont anodins

Les partenaires qui apparaissent dans l'usage intentionnel sont eux-mêmes connus comme dangereux : le plomb, le zinc, le strontium. Ceux qui conduisent in situ au chromate ne le sont pas. Le calcium est, en tant qu'élément, le matériau de construction des os et un constituant du lait, le sodium est le sel de cuisine, les deux sont disponibles en droguerie. Le partenaire de réaction dans l'isolant n'est toutefois pas l'élément, mais l'oxyde. Le chrome(III) a été présenté pendant des décennies comme un oligoélément essentiel de l'alimentation ; l'Autorité européenne de sécurité des aliments est parvenue en 2014 à la conclusion qu'une preuve de l'essentialité manque et n'a fixé aucune valeur de référence, tandis qu'aux États-Unis une valeur d'apport subsiste et que le chrome est vendu comme complément alimentaire. Aucune de ces trois substances ne donne lieu à contrôler un produit à sa recherche. [76]

Anodin ne signifie pas pour autant inoffensif. L'oxyde de calcium est classé comme irritant pour la peau, provoquant des lésions oculaires graves et irritant pour les voies respiratoires (H315, H318, H335), et la directive (UE) 2017/164 indique une valeur limite indicative de 1 mg/m³ en fraction alvéolaire. L'oxyde de sodium forme avec l'eau de la soude caustique et agit de manière corrosive en conséquence. Mais les deux ne sont pas cancérogènes et ne sont pas classés CMR, et dans l'isolant ils se présentent liés dans la matrice silicatée. Ils ne sont donc pas anodins à tous égards, mais précisément dans le seul respect qui importe ici : celui qui cherche un risque de cancer n'a aucune raison de les regarder. [79]

Le tiroir « revêtement »

Parce que le chrome(VI) est mentalement associé aux peintures et aux primaires, un constat de chrome(VI) est rattaché à un revêtement et, si aucun revêtement n'est présent, à l'alliage. Les deux réponses déplacent la source dans un domaine de compétence déjà réglementé. Or ce sont justement les pigments connus qui portent leur partenaire dans leur nom, et personne ne s'en étonne. Le pas qui n'est pas franchi est la question de ce qui s'applique lorsque ce partenaire s'appelle calcium ou sodium et que personne ne l'a amené là intentionnellement.

Le partenaire de réaction figure dans la fiche de données et n'est pourtant pas lisible

La fiche de données de sécurité d'un produit isolant haute température de Morgan Advanced Materials, Ceraform 130, première édition du 1er septembre 1990, version du 23 décembre 2020, mentionne à la section 3 l'oxyde de chrome(III) jusqu'à 3 pour cent et, comme constituant principal, « Refractories, Fibers, Aluminosilicate » avec le numéro CAS 142844-00-6 à raison de 45 à 80 pour cent. Le domaine d'emploi est indiqué jusqu'à 1400 °C. La fiche de données ne dit pas quels oxydes se trouvent derrière ce numéro CAS. Le dossier d'enregistrement de l'ECHA relatif au même numéro désigne la substance comme une fibre de verre amorphe de dioxyde de silicium et d'oxyde d'aluminium « and a range of oxides such as zirconia, ferric oxide, titanium oxide, magnesiumoxide, calcium oxide, other alkaline earth oxides including sodium oxide, potassium oxide, barium oxides ». Les deux réactifs sont ainsi déclarés dans un seul et même produit. La section 10 de la même fiche de données qualifie le matériau de stable, indique « None » sous les matières incompatibles et ne mentionne comme produits de décomposition dangereux que les oxydes de carbone et des traces d'ammoniac provenant de l'amidon. [77, 78]

S'y ajoute que le chromate de calcium ne joue pratiquement aucun rôle dans l'usage intentionnel et qu'il est donc rarement nommé. Juridiquement, il est néanmoins couvert : la liste d'autorisation REACH ne le mentionne certes pas nommément, mais la proposition de restriction de l'ECHA englobe les sels de l'acide chromique et donc aussi le chromate de calcium. La restriction touche donc une substance que presque personne n'intègre dans son analyse, parce qu'elle n'apparaît pas dans la composition chimique du produit livré. Elle se forme pourtant par voie thermochimique dans sa propre exploitation, sur l'installation, voire par l'emploi de son propre produit. [59, 64]

Analytique : teneur en chrome(VI) au lieu du composé

Si le chromate s'est formé et qu'il est seulement désigné comme « chrome(VI) », cela complique l'analyse des causes. L'analytique de laboratoire usuelle détermine la teneur en chrome(VI), non le composé. Les procédés d'analyse élémentaire, par exemple au plasma à couplage inductif, déterminent eux aussi des éléments et, couplés à la chromatographie ionique, la teneur en chrome(VI). Ils ne saisissent pas le composé lui-même, parce que l'échantillon est pour cela mis en solution.

Quelle phase de chromate est présente n'est élucidé que par une analytique des phases comme la diffraction des rayons X (XRD), avec laquelle Sayano et al. ont identifié $CaCrO_4$ et Na_2CrO_4. Elle ne fait pas partie de l'analytique de routine et ne saisit qu'une petite portion de l'échantillon et seulement les phases cristallines au-dessus de sa limite de détection. Elle ne fournit pas d'indication sur l'ensemble de la surface d'un composant ou d'une isolation. [11]

Pour la protection au travail, il n'en résulte pas une incertitude, mais une prescription claire : si un composé cancérogène du chrome(VI) ne peut être sérieusement exclu, il faut partir de sa présence. La TRGS 561 allemande exige expressément les mesures de protection selon ses sections 4.1 et 4.2 dès lors qu'une exposition au chrome(VI) ne peut être exclue. [19]

Dans de nombreuses entreprises, on démonte d'abord et on teste ensuite, souvent uniquement avec des tests rapides peu fiables (section 19). La protection au travail exige l'ordre inverse : la situation doit être évaluée avant le début des travaux dans l'évaluation des risques. La TRGS 561 allemande exige les mesures de protection dès lors qu'une exposition au chrome(VI) ne peut être exclue ; un test négatif ne lève pas cette présomption, d'autant que des chromates peuvent aussi se former à l'intérieur des éléments d'isolation. [11, 19, 36]

Classification : groupe et composé individuel

Pour la protection du travail et de l'environnement, le composé exact n'est pas déterminant. La classification européenne harmonisée saisit les composés du chrome(VI) en tant que groupe comme cancérogènes de catégorie 1B, à l'exception du chromate de baryum et des composés mentionnés séparément ; le chromate de calcium est lui-même classé séparément comme cancérogène de catégorie 1B. Les critères d'appréciation selon la TRGS 910 allemande se rapportent à la teneur en chrome élémentaire, non au composé. Ici, on peut de nouveau parler de chrome(VI) de manière générale, comme pour l'amiante. [63, 64, 71]

Comme voies d'absorption, l'Institut pour la protection au travail de l'assurance sociale allemande des accidents (IFA) indique pour les composés du chrome(VI) « inhalation, résorption cutanée ». Pour les cancérogènes sans valeur seuil, il n'existe pas de dose sans risque ; un chromate n'est ni seulement un peu cancérogène ni seulement un peu résorbable par la peau. [71]

Des différences existent dans les autres classifications. Le chromate de sodium est en outre classé comme mutagène sur les cellules germinales et toxique pour la reproduction de catégorie 1B, et par ailleurs entre autres comme toxique aigu, corrosif et sensibilisant. Il figure sur la liste des substances candidates extrêmement préoccupantes (SVHC) et à l'annexe XIV du règlement REACH ; son utilisation est soumise à autorisation. Le chromate de calcium ne figure sur aucune des deux listes, bien que sa classification comme cancérogène de catégorie 1B suffirait à elle seule pour son identification comme SVHC (article 57 point a) REACH). [64-67]

Avec la restriction prévue, les substances du chrome(VI) passeront de l'autorisation à l'annexe XVII du règlement REACH, donc à la même annexe qui mentionne, sous l'entrée 6, les fibres d'amiante. D'après les résumés disponibles, la proposition englobe les sels de l'acide chromique et de l'acide dichromique et donc aussi le chromate de calcium ; les trois entrées relatives au chromate de plomb sont exclues. [59, 66, 68]

Le chromate de sodium dans les isolants : la question de l'utilisation

Pour les isolants contenant du sodium comme la laine minérale, la formation de chromate de sodium ne peut être exclue ; Sayano et al. ont identifié Na_2CrO_4 à l'interface entre le métal et un isolant contenant du sodium. La poussière d'une telle isolation est un mélange ; le chromate formé se présente à l'état libre comme une substance propre. Ni l'un ni l'autre n'est un article au sens de l'article 3 point 3 du règlement REACH, puisqu'il n'a pas de forme déterminée. Le chromate de sodium figure déjà aujourd'hui, comme substance extrêmement préoccupante, à l'annexe XIV du règlement REACH ; son utilisation est soumise à autorisation. Si une telle isolation est démontée, stockée et réutilisée, elle n'est pas un déchet. N'est-ce pas déjà aujourd'hui une utilisation soumise à autorisation ? Pour la protection au travail, cette question ne se pose pas : ici s'applique la prescription de la TRGS 561 allemande, qui exige les mesures de protection dès lors qu'une exposition au chrome(VI) ne peut être exclue. [11, 19, 60, 66]

Le chromate de sodium dans les cendres : la classification des déchets

Dans les cendres contenant du chromate également, le chromate de sodium ne peut être exclu ; une question d'utilisation ne s'y pose pas. Le caractère dangereux d'un déchet se détermine selon l'annexe III de la directive-cadre européenne relative aux déchets 2008/98/CE et donc selon la classification CLP des substances contenues, non selon leur propriété de SVHC. À partir de 0,1 %, les deux chromates conduisent, par le critère HP7 (cancérogène), à la classification comme déchet dangereux. Le chromate de sodium remplit en outre HP11 (mutagène sur les cellules germinales, à partir de 0,1 %) et HP10 (toxique pour la reproduction, à partir de 0,3 %), sans abaisser le seuil déterminant. [69]

Ce qui est mesuré est la teneur en Cr(VI), mais le seuil s'applique au composé. Le chrome représente environ 33 % de la masse dans le chromate de calcium et environ 32 % dans le chromate de sodium ; 0,1 % de chromate correspondent ainsi à environ 0,03 % de Cr(VI). La question de savoir quel chromate est présent est là aussi pratiquement sans importance. Cela est surtout pertinent pour les cendres de grille, pour lesquelles le catalogue européen des déchets prévoit une entrée dangereuse et une entrée non dangereuse (19 01 11* et 19 01 12). L'évaluation dans le cas particulier saisit-elle la teneur en Cr(VI), et la convertit-elle sur le composé ? [70]

Protection de la maternité

La conséquence s'étend jusqu'à la protection de la maternité. Selon le paragraphe 11 alinéa 1 de la loi allemande sur la protection de la maternité (MuSchG), il existe un risque inacceptable pour les femmes enceintes notamment en présence de substances classées comme cancérogènes, mutagènes sur les cellules germinales ou toxiques pour la reproduction des catégories 1A ou 1B, ou comme toxiques aigus des catégories 1 à 3. Le chromate de calcium remplit cette condition comme cancérogène de catégorie 1B, le chromate de sodium en outre comme mutagène sur les cellules germinales, toxique pour la reproduction et toxique aigu. L'exception liée au respect de la valeur limite d'exposition professionnelle ne s'applique pas, puisqu'il n'existe pas de telle valeur limite pour les composés du chrome(VI), mais un critère d'appréciation fondé sur le risque selon la TRGS 910 allemande. [63, 71, 73]

Si la présence de l'un de ces chromates ne peut être exclue, les femmes enceintes ne peuvent pas exercer d'activités telles que la maintenance, le démontage, la révision, le nettoyage ou la manipulation de cendres dans ces domaines. Pour les femmes qui allaitent, l'IFA recommande par précaution de ne pas autoriser non plus d'exposition à des substances cancérogènes des catégories 1A et 1B. Selon le paragraphe 10 MuSchG, le risque doit être évalué pour chaque activité à laquelle une femme est ou peut être exposée. [72, 73]

4. Champs d'application et chromates attendus

L'aperçu suivant met en relation des champs d'application typiques avec les isolants qui y sont employés et les chromates attendus. Ce qui est déterminant est à chaque fois la combinaison d'une pièce chaude alliée au chrome, d'un composant basique, d'oxygène et de température. Le verre E, le silicate de calcium et les laines AES comme Superwool contiennent avant tout de l'oxyde de calcium, la laine minérale contient de l'oxyde de calcium et de l'oxyde de sodium. Sayano et al. ont identifié $CaCrO_4$ sur l'isolant contenant du calcium et Na_2CrO_4 sur l'isolant contenant du sodium. [11]

Champ d'application	Isolation ou lieu (composant basique)	Chromates attendus	Question de l'utilisation et des déchets
Moteurs à gaz et diesel, moteurs de locomotive et moteurs marins	Sur et autour du moteur, le plus souvent du verre E et des mats aiguilletés en fibre de verre (CaO), dans la zone haute température des nattes de silicate de calcium et du Superwool (CaO) ; conduites d'échappement en aval avec de la laine minérale (CaO/Na_2O) en rouleaux ; coussins isolants et matelas isolants en tissu de verre (CaO) et en laine minérale (CaO/Na_2O)	Sur et autour du moteur avant tout du chromate de calcium ; sur les conduites d'entrée et de sortie du chromate de calcium et/ou du chromate de sodium	Lors des travaux de maintenance, déjà aujourd'hui la question REACH de l'utilisation relative au chromate de sodium, lorsque des produits en laine minérale démontés sont réutilisés ; avec la restriction prévue par l'ECHA dans sa forme actuelle, indépendamment du chromate particulier
Turbines à gaz et à vapeur	Dans les zones très chaudes, des produits en silicate de calcium à forte teneur en calcium ; les matelas isolants qui suivent souvent en produits de verre E et de laine minérale	Chromate de calcium et/ou chromate de sodium	comme pour les moteurs
Installations de biogaz, unités de cogénération et production combinée de chaleur et d'électricité	comme pour les moteurs et les turbines	comme pour les moteurs et les turbines	comme pour les moteurs
Transformation alimentaire, serres et plantations avec unité de cogénération	comme pour les unités de cogénération	comme pour les unités de cogénération	comme pour les moteurs
Centres de données, groupes électrogènes de secours, approvisionnement énergétique décentralisé de bâtiments publics et d'hôpitaux	comme pour les unités de cogénération, la production combinée de chaleur et d'électricité et les turbines	comme pour les unités de cogénération, la production combinée de chaleur et d'électricité et les turbines	comme pour les moteurs
Véhicules, engins de chantier, post-traitement des gaz d'échappement	Écrans thermiques, par exemple au turbocompresseur, avec avant tout des feutres et des nattes contenant de l'oxyde de calcium, en partie des constructions en silicate de calcium ; isolation extérieure sur DPF et SCR ; doubles parois clipsées et ouvertes à l'oxygène de pièces chaudes avec isolants à l'intérieur (verre E, silicate de calcium)	avant tout du chromate de calcium	comme pour les moteurs

Champ d'application	Isolation ou lieu (composant basique)	Chromates attendus	Question de l'utilisation et des déchets
Incinération des ordures ménagères	Four lors des révisions, zone des portes, zone du sol des accès au four et périphérie des fours par mise en suspension (résidus, pas d'isolation)	Les chromates particuliers ne sont pas déterminants ici	Déchets et nettoyage ; une question d'utilisation ne se pose au plus que lors de la valorisation ultérieure de cendres comme constituant d'autres produits, dans la mesure où elles ne sont pas éliminées

Évaluation des risques à concevoir plus largement

Pour les installations de biogaz rattachées à une exploitation agricole, l'évaluation des risques doit être conçue plus largement : il faut y inclure le transfert vers les zones d'exploitation et vers les denrées alimentaires ainsi que la charge environnementale.

Dans la transformation alimentaire, dans les serres et les plantations, une humidité de l'air élevée due à l'irrigation ou à la vaporisation peut favoriser la formation et le transport en phase gazeuse au niveau des pièces chaudes. La caisse professionnelle allemande BG ETEM cite l'humidité de l'air et, à partir d'environ 550 °C, la vapeur d'eau comme facteurs d'influence ; Tatar travaille avec de l'air fortement humidifié (section 14). [2, 35]

En raison de leurs besoins énergétiques élevés, les centres de données sont de plus en plus équipés d'une production d'énergie propre à partir de moteurs à gaz ou de turbines à gaz. Les fabricants de moteurs expliquent le besoin croissant d'une alimentation autonome rapidement disponible par la capacité limitée du réseau. Ces installations sont isolées comme les unités de cogénération BHKW et KWK. [74]

Les groupes électrogènes de secours et l'alimentation énergétique décentralisée par la technique des unités de cogénération BHKW et KWK dans les bâtiments publics et les hôpitaux correspondent à la même constellation. Dans les hôpitaux, un transfert concerne des zones accueillant des groupes vulnérables.

Une particularité aux Pays-Bas : les installations de chauffage sont fréquemment équipées d'isolations textiles en verre E ou en laine minérale. Ce qui est déterminant là-bas, ce sont les pièces chaudes comme la chambre de combustion et le circuit des gaz d'échappement, où les températures nécessaires à la formation de chromates sont atteintes.

5. Pourquoi le sujet n'est pas reconnu

Les documents analysés permettent de nommer plusieurs raisons à cette absence de perception. Chacune possède en soi une explication compréhensible ; ensemble, elles font que la voie de formation n'est pas recherchée là où elle est la plus probable.

Le terme générique « chrome(VI) »

On parle globalement de « chrome(VI) ». Le terme est associé aux composés fabriqués industriellement ; les chromates de calcium et de sodium formés dans l'installation même n'apparaissent pas dans cette représentation (section 3).

Perception de la seule forme fabriquée industriellement

Les chromates fabriqués industriellement sont soumis à autorisation, surveillance et étiquetage. Les chromates formés in situ n'ont pas de fabricant, pas d'étiquetage et pas de fiche de données de sécurité décrivant l'état après usage. L'information de sécurité d'un isolant décrit l'état de livraison ; un isolant non classé peut, après usage, être contaminé par des substances dangereuses nouvellement formées (sections 16 et 25).

Objectif d'essai : tenue du matériau

Les essais de compatibilité d'isolants avec le chrome évaluent la tenue de la fibre. Une fibre extérieurement intacte peut toutefois porter une faible quantité d'un produit de réaction hautement dangereux. Si le Cr(VI) n'est pas déterminé, l'essai ne répond pas à la question des substances dangereuses (section 12).

La voie de formation qualifiée de « non élucidée »

Certains documents de fabricants déclarent la formation « pas complètement » ou « en général pas encore élucidée » et renvoient à des sources externes comme les pièces de rechange, les matériaux de maintenance ou les environnements d'exploitation. L'exposition apparaît ainsi comme un cas isolé, bien que la voie de formation soit publiée (section 16).

La philosophie du test rapide

Les mesures de protection sont liées à des dépôts jaunes visibles et à des tests rapides positifs. En l'absence de couleur ou lorsque le test est négatif, le constat est considéré comme sans particularité. L'étude de terrain française montre que les tests rapides colorimétriques passent à côté de Cr(VI) mis en évidence par analyse en laboratoire (section 19).

« Neutralisation » et WD-40

La recommandation de « neutraliser » le chrome(VI) et l'emploi de WD-40 donnent l'impression que le problème peut être résolu sur place. La « neutralisation » est une réduction en chrome(III) qui n'aboutit de manière quasi complète que dans des conditions favorables ; pour le WD-40, un effet réducteur est expérimentalement réfuté (section 26).

« Sans amiante » comme caractéristique d'innocuité

La substitution de l'amiante a éliminé la fibre d'amiante, pas nécessairement le système matériel réactif constitué d'une pièce chaude alliée au chrome et d'une isolation basique. « Sans amiante » ne dit rien sur le fait qu'un isolant contribue ou non à la formation de chromates sur des pièces chaudes alliées au chrome (section 15).

Évaluation environnementale au lieu d'évaluation de l'activité pour les résidus d'incinération

Pour les cendres, l'évaluation environnementale par la lixiviation occupe le premier plan, par exemple dans le document de référence MTD (BREF) européen. Elle ne répond pas à l'exposition lors de la révision, de l'ouverture de la chaudière, du nettoyage et de la manipulation des cendres. Des observations de terrain dans des usines d'incinération des ordures ménagères européennes montrent que la protection contre les charges de chromate n'est mise en œuvre, au mieux, que partiellement (section 22).

La question que pose cette expertise est de savoir si, au vu de cet état des sources, on n'aurait pas dû voir la voie de formation.

6. Pourquoi cela devient un sujet

Allemagne : la TRGS 561 allemande

Depuis le 4 mai 2026, la TRGS 561 allemande s'applique dans une nouvelle version. La section 3.3.4 décrit la problématique, la section 5.9.3 cite les oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux provenant d'isolants ou de pâtes de montage comme facteur d'influence. Les mesures de protection selon les sections 4.1 et 4.2, parmi lesquelles l'équipement de protection individuelle, le travail à faible émission de poussière et le contrôle de substitution, s'appliquent dès lors qu'une charge en chrome(VI) ne peut être exclue. Pour les employeurs en Allemagne, la question fait donc partie de l'évaluation des risques et n'est pas seulement une conséquence d'un résultat positif (section 19). [19]

UE : voies d'exposition, restriction et notion d'utilisation

La directive européenne 2004/37/CE exige l'évaluation de toutes les expositions possibles, y compris l'absorption par la peau (section 24). En avril 2025, l'Agence européenne des produits chimiques ECHA a proposé une restriction des substances à base de chrome(VI) selon laquelle seules certaines utilisations devraient rester autorisées sous des conditions strictes. [18, 59]

Ce qui est déterminant, c'est la notion large d'utilisation du règlement européen REACH, qui comprend entre autres le stockage, la mise à disposition et le traitement. Si un composant contaminé par des chromates est démonté pour maintenance, stocké puis remonté, ou si une isolation contaminée est stockée ou réutilisée, cela peut constituer une utilisation. Si elle ne relève pas des utilisations qui resteront autorisées à l'avenir, elle serait interdite. Pour les systèmes d'isolation actuels sur des pièces chaudes alliées au chrome, cela peut équivaloir à une interdiction de fait. C'est le texte juridique définitif qui est déterminant (section 25). [59, 60]

L'Australie comme précurseur

À partir du 1er décembre 2026, l'autorité australienne Safe Work Australia ne publie plus de valeur limite d'exposition professionnelle pour les composés du chrome(VI). Elle est remplacée par l'obligation d'éliminer l'exposition ou de la minimiser autant qu'il est raisonnablement praticable (section 25). [58]

Véhicules et résidus d'incinération

Pour les véhicules, le droit européen de la vente aux consommateurs et le règlement 2018/858 relatif aux véhicules ouvrent leurs propres voies d'examen lorsqu'un véhicule est contaminé de manière établie par du Cr(VI) (section 20). Pour les résidus d'incinération, la protection des travailleurs lors de la révision et du nettoyage s'applique indépendamment de l'évaluation environnementale des cendres (sections 21 et 22). [46, 47]

B. Fondements

7. Le brevet de 1938/1939 : le chromate de calcium comme produit de réaction délibérément généré

Udy a mis au point le procédé de production de ferrochrome à faible teneur en carbone. Le point de départ était du ferrochrome carburé. Celui-ci était grillé à l'air sous forme finement divisée et traité à cette occasion à la chaux. Le brevet décrit expressément que l'oxydation du chrome en chromate se produit en présence de chaux :

> **"With lime alone serving as the base the oxidation of chromium to chromate requires several hours of roasting ..."**

Le fascicule de brevet précise encore la conduite de la température :

> **"Roasting at temperatures well under 1000° C. with no soda ash or less than one per cent of soda in the roasting charge converts the chromium mostly to calcium chromate ..."**

Il décrit ainsi directement la formation de chromate de calcium à partir d'une source de chrome, de chaux et d'une atmosphère de grillage oxydante. Il est en même temps retenu que la répartition des produits change avec la température et les matières employées : au-dessus de 1 000 °C, le chromate pourrait se décomposer à nouveau en chromite. Le procédé n'est donc pas une oxydation non spécifique, mais une chimie de réaction conduite de manière ciblée.

Les revendications du brevet ne laissent elles non plus aucun doute sur les composés désignés. Les revendications 22 et 25 citent un mélange de chromite de calcium et de chromate de calcium ; les revendications 23 et 26 citent en outre le chromate de sodium. Les chromates ne sont ainsi pas seulement mentionnés dans la description, mais font partie du procédé technique revendiqué.

8. Le sodium : accélérateur, agent de pilotage et formateur de chromate

Le brevet cite expressément la soude, autrement dit le carbonate de sodium (Na_2CO_3), comme facteur d'influence. La soude accélère et pilote l'oxydation en chromate. Selon le fascicule de brevet, un ajout suffisant de soude permet d'accélérer sensiblement la conversion en chromate à 1 000 °C ou juste en dessous. Pour un ajout de 5 à 10 pour cent en poids de soude, rapporté au ferrochrome, Udy décrit à 1 000 °C une conversion d'environ la moitié du chrome en chromate ; la part restante se présente à l'état de chromite ou de Cr_2O_3.

Le sodium est ainsi un constituant actif du point de vue de la chimie du procédé, capable de favoriser et de piloter la formation de chromate. Les indications relatives au chromate de calcium sans soude figurent à la section 7 ; le chromate de sodium est en outre mentionné dans les revendications du brevet. [1]

9. Le cœur chimique de la voie de formation

Le procédé de grillage décrit dans le fascicule de brevet repose sur quatre facteurs :

1. une source de chrome,

2. un composé basique de calcium et/ou de sodium,

3. une atmosphère oxydante, en particulier l'oxygène, et

4. une température et un temps de réaction suffisants.

De manière simplifiée, le sous-processus central formant le chromate de calcium peut être représenté comme suit :

$$2\ Cr_2O_3 + 4\ CaO + 3\ O_2 \rightarrow 4\ CaCrO_4$$

Pour le chromate de sodium, la voie d'oxydation correspondante en cas d'emploi de carbonate de sodium peut être formulée schématiquement :

$$2\ Cr_2O_3 + 4\ Na_2CO_3 + 3\ O_2 \rightarrow 4\ Na_2CrO_4 + 4\ CO_2$$

Ces équations sont des bilans de matière de la voie de formation des chromates, pas une affirmation selon laquelle toute surface réelle d'installation correspondrait à un système pur idéalisé. Elles montrent toutefois le lien chimique connu depuis longtemps : une source de chrome contenant du Cr(III), une base et l'oxygène forment sous sollicitation thermique une voie chromate-Cr(VI).

Une teneur en calcium déclarée en CaO dans un verre ou un silicate ne signifie pas automatiquement que de l'oxyde de calcium libre est présent. Pour l'évaluation liée à l'application, c'est la disponibilité réactionnelle qui est déterminante. Les silicates de calcium peuvent eux aussi fournir du calcium pour la formation de chromate ; Sayano décrit des réactions correspondantes. [11]

10. Mise en évidence expérimentale directe : du mélange modèle à l'interface métal-isolant

Le fascicule de brevet historique décrit la voie de réaction. Quatre études primaires la confirment expérimentalement à différents niveaux et ferment la chaîne de preuves depuis l'essai modèle jusqu'à l'interface proche des conditions réelles.

Étude	Constellation étudiée	Constat central	Signification
Paoletti (2002)	Cr_2O_3 avec CaO dans de l'air synthétique et en atmosphère inerte ; thermobalance (TG-DSC) et XRD.	Augmentation rapide de masse entre 500 et 850 °C ; après 850 °C, la XRD met en évidence $CaCrO_4$. En atmosphère inerte, uniquement du $Ca(CrO_2)_2$ trivalent. [50]	Mise en évidence directe et précoce de la phase $CaCrO_4$ à partir de Cr_2O_3 et de CaO ; l'oxygène est établi comme condition impérative. Le travail a été réalisé sur l'incinération des ordures ménagères ; pour les cendres de grille et l'installation pilote, voir la section « Paoletti 2002 » dans la partie consacrée aux cendres d'incinération.
Verbinnen et al. (2013)	Cr_2O_3 avec CaO, NaOH ou KOH sous traitement thermique.	Avec NaOH, 83 % à 500 °C et 89 % à 700 °C ont été lixiviés sous forme de Cr(VI) après 60 minutes. CaO ouvre également la voie de formation des chromates.	Établit la voie de formation thermo-oxydative avec des composés de calcium et de sodium ainsi que le rôle de l'oxygène.

Étude	Constellation étudiée	Constat central	Signification
Mao et al. (2015)	Boue contenant du chrome avec CaO, 200-1 200 °C.	Entre 500 et 900 °C, il se forme du $CaCrO_4$ lixiviable ; à 900 °C, l'oxydation maximale du Cr(III) a été observée après une heure.	Établit le rôle direct de CaO et la forte dépendance à la température.
Sayano et al. (2015)	Contact direct d'aciers contenant du Cr avec des isolants de type Ca-Si-O ou contenant du Na ; jusqu'à 5 000 h à 773/873 K.	Des produits de réaction jaunâtres ont été identifiés par XRD comme $CaCrO_4$ ou Na_2CrO_4. La quantité de Cr(VI) dépend du métal, de la température et de la durée.	Mise en évidence expérimentale directe à l'interface entre un métal contenant du chrome et un isolant thermique.

Verbinnen et al. : le rôle des composés basiques de calcium et de sodium

Verbinnen, Billen, Van Coninckxloo et Vandecasteele ont étudié la dépendance à la température de l'oxydation du Cr(III) dans des mélanges synthétiques de Cr_2O_3 et de composés alcalins ou alcalino-terreux. L'étude distingue clairement un point souvent brouillé : dans le domaine de température pertinent, Cr_2O_3 n'est pas oxydé sans plus en Cr(VI) par le seul oxygène de l'air. C'est le composant basique de calcium, de sodium ou de potassium qui ouvre la voie de formation des chromates.

Les expériences ont donné des lixiviations maximales de Cr(VI) dans la plage de 600 à 800 °C. En atmosphère inerte, la lixiviation de Cr(VI) d'une boue industrielle est passée, après 30 minutes à 700 °C, de 24,2 mg/kg à 0,42 mg/kg. Le rôle de l'oxygène n'est ainsi pas seulement postulé sur le plan thermodynamique, mais établi expérimentalement.

Les indications quantitatives doivent être lues comme des résultats de lixiviation associés à la température et au temps de maintien respectifs ; elles ne constituent pas des valeurs de conversion globales pour des isolations industrielles. [9]

Mao et al. : CaO forme du $CaCrO_4$ dans la fenêtre de température de 500 à 900 °C

Mao, Gao, Deng et d'autres auteurs ont étudié une boue contenant du chrome en présence de CaO sur la plage de 200 à 1 200 °C. Ils distinguent deux domaines de réaction pertinents :

- Entre 200 et 400 °C, un oxyde intermédiaire contenant du Cr(VI) (Cr_2O_3+x) s'est formé dans les mélanges hydroxyde de chrome/CaO.
- Entre 500 et 900 °C, Cr(III) a réagi directement avec CaO pour former du $CaCrO_4$ lixiviable. À 900 °C, l'oxydation maximale a été observée après une heure ; un allongement du temps de maintien n'a pas réduit sensiblement la quantité de chromate de calcium dans ce domaine.

L'étude confirme ainsi que l'oxyde de calcium n'est pas seulement un composant d'arrière-plan favorisant la réaction, mais un partenaire de réaction direct dans la formation du chromate de calcium.

Sayano et al. : la mise en évidence directe au contact entre pièce chaude et isolant

Le travail des auteurs japonais Sayano, Kanno, Inagaki, Takahashi et Yoshida est particulièrement important pour l'évaluation de composants industriels isolés à haute température. L'objet de l'étude n'était pas une boue ni un mélange pulvérulent libre de laboratoire, mais le contact direct entre des métaux contenant du Cr et des isolants thermiques.

Les auteurs ont notamment placé du SUS304 à 18,2 % de Cr ainsi que des aciers à faible et à forte teneur en chrome sur des isolants calco-silicatés et sur des isolants contenant du sodium. L'isolant en blocs calco-silicaté affichait 35 % de CaO ; un isolant contenant du sodium, 7,3 % de Na_2O. Après traitement thermique à l'air, des produits de réaction jaunâtres ont été mis en évidence aux surfaces de contact :

- Pour l'isolant contenant du calcium, l'analyse XRD a identifié $CaCrO_4$, pour l'isolant contenant du sodium Na_2CrO_4.
- Avec SUS304 et un isolant calco-silicaté, 160 mg de Cr(VI) par m² de surface de contact ont été mesurés après 1 000 heures à 873 K (environ 600 °C).
- Après 5 000 heures à 873 K, la quantité de Cr(VI) s'élevait à 940 mg/m² sur le système SUS304/Ca-Si-O non revêtu ; avec l'isolant de revêtement autodurcissant supplémentaire contenant du calcium, à 3 890 mg/m².

Les auteurs montrent en outre le transport de matière : le chrome diffuse du métal vers l'isolant, s'oxyde et réagit avec le composant basique de l'isolant. Une couche barrière à base d'Al_2O_3 d'une épaisseur d'environ 3-4 µm seulement a interrompu cette diffusion du chrome et empêché presque entièrement la formation de Cr(VI). La logique préventive est ainsi claire également : ce n'est pas le traitement ultérieur de chromates déjà formés, mais l'interruption du contact réactionnel ou la substitution des oxydes basiques qui empêche la voie de formation de la substance.

Conséquence de la vue d'ensemble

Les quatre études ne laissent aucune place à la présentation selon laquelle la formation de chromate de calcium et de sodium sur des pièces chaudes contenant du chrome ne serait qu'une possibilité non vérifiée. La réaction est

1. décrite chimiquement (Udy ; Verbinnen),

2. mise en évidence expérimentalement en fonction de la température (Paoletti ; Mao ; Verbinnen) et

3. observée directement à l'interface métal-isolant avec les produits cibles identifiés $CaCrO_4$ et Na_2CrO_4 (Sayano).

C. Technique d'isolation : pièces chaudes et isolation

11. Du grillage métallurgique à l'isolation haute température

Le fascicule de brevet historique décrit un grillage métallurgique délibérément intensifié. Son importance pour les isolants posés sur des pièces chaudes alliées au chrome réside dans la chimie de réaction : les groupes de substances déterminants pour le chromate de calcium et de sodium sont identiques.

Procédé métallurgique selon Udy	Pièce chaude avec isolation basique
Ferrochrome contenant du chrome	Acier allié au chrome, acier inoxydable, surfaces et couches d'oxyde à forte teneur en chrome
Chaux ou oxyde de calcium	Fibres, charges, liants contenant du calcium ou autres constituants basiques de l'isolant
Soude ou carbonate de sodium	Constituants de produit contenant du sodium, qu'il s'agisse de verre, de fibres, de liants ou d'autres éléments
Grillage à l'air	Arrivée d'oxygène dans l'environnement de l'installation et dans la zone limite entre composant et isolation
Température et temps de séjour	Température de service, cycles de température et longues durées d'utilisation

La caisse professionnelle allemande BG ETEM décrit le constat actuel au niveau des installations dans le même sens : le contact d'aciers alliés au chrome avec des isolants ou des pâtes de montage contenant des métaux alcalins et alcalino-terreux peut conduire, à des températures d'acier d'environ 350 à 800 °C, à la formation de chromates cancérogènes. Comme facteurs d'influence, elle cite la teneur en chrome de l'acier, les composés de calcium, de magnésium, de sodium ou de potassium, l'oxygène, l'humidité de l'air et, à partir d'environ 550 °C, également la vapeur d'eau. Selon les indications de la BG ETEM, des dépôts jaunâtres visibles sur des turbines et des conduites de vapeur sous pression indiquaient du chromate de calcium et ont ensuite été testés positifs aux composés du chrome(VI). [2]

Le lien avec l'application était expressément publié avant 2015

La demande de brevet japonaise JP2011232021A de Toshiba, publiée le 17 novembre 2011 avec une priorité du 8 avril 2010, décrit exactement cette interface : l'oxyde de chrome sur acier inoxydable réagit avec le composant calcique d'une isolation thermique, en présence d'oxygène, pour former du chromate de calcium. Le document explique le passage de l'amiante au silicate de calcium et propose une couche de séparation céramique pour supprimer la formation de Cr(VI). Il cite en outre des isolations contenant du potassium, du magnésium et du sodium. La problématique liée à l'application, y compris une approche de prévention, était ainsi également accessible au public avant l'étude de 2015. [26]

Comme littérature antérieure, le brevet cite Corrosion Center News n° 034 du 1er juin 2005. Cette indication est une piste d'archive ciblée ; l'édition originale n'a pas été consultée ici. La famille de brevets établie est japonaise. Sa disponibilité publique doit être distinguée de la connaissance effective de tel ou tel fabricant européen. [26]

Examen des deux brevets Toshiba et de la mention « nom commercial Rockwool »

La mention « isolant thermique (désignation commerciale : Rockwool) » figure dans les deux traductions présentées. La désignation de produit correspondante se trouve également dans l'original japonais de JP2011232021A et dans la version japonaise délivrée JP5774355B2 relative à la seconde demande JP2012220174A. La mention n'a donc pas été produite seulement par la traduction automatique. Les deux descriptions d'essai caractérisent l'isolation comme principalement à base d'oxyde de calcium et d'oxyde de silicium. [26, 38]

JP2011232021A examine SUS304 avec et sans couches de séparation céramiques à 600 °C pendant 500 heures à l'air. Dans la comparaison sans revêtement, un oxyde complexe calcium-chrome et, en faible quantité, un oxyde complexe magnésium-chrome sont décrits à la surface de contact au moyen de la diffraction des rayons X. Le document expose expressément la voie de formation du $CaCrO_4$ avec une équation de réaction et examine par ailleurs une isolation contenant du sodium. La couche céramique doit interrompre le contact des composants réactifs. [26]

JP2012220174A, publiée le 12 novembre 2012 avec une priorité du 14 avril 2011, poursuit une autre approche de prévention : une feuille de nickel pur de 200 µm d'épaisseur sépare SUS304 de l'isolation. Après 600 °C et 500 heures à l'air, un produit de réaction jaune est décrit en cas de contact direct sans feuille. Celui-ci est analysé par XRD et désigné par les auteurs comme produit de réaction du Cr(VI). Les essais comparatifs avec de la perlite contenant du sodium ou avec du silicate de calcium décrivent en outre des oxydes complexes chrome-sodium ou chrome-calcium. Pour la configuration avec feuille, aucune réaction visible correspondante n'est rapportée. Cette comparaison montre une intervention ciblée dans la réaction d'interface ; l'absence de constat coloré n'implique pas en elle-même une valeur nulle quantitative de Cr(VI). [38]

La formulation « Rockwool » est documentée ; aucun fabricant, aucune qualité de produit précise ni aucune attribution à ProRox n'est identifié dans ces passages d'essai. En japonais, la désignation est également employée pour la laine de roche. Une attribution concrète à une entreprise exigerait de remonter aux données de produit et de fournisseur. Le constat technique en reste indépendant : Toshiba étudie une isolation contenant du calcium sur un métal contenant du chrome et décrit des possibilités concrètes d'interrompre la réaction. [26, 38]

Les deux documents citent expressément les usines d'incinération des ordures ménagères, les foyers à biomasse, les installations thermiques de production d'électricité et les installations chimiques. Le lien avec le domaine de l'incinération fait ainsi déjà partie de la description d'application d'origine. La réaction entre l'isolation et le métal doit à cet égard être distinguée d'une formation de Cr(VI) dans la matrice de cendres ; les deux peuvent être pertinentes dans la même installation. [26, 38]

12. Signification pour les tissus de verre E, le silicate de calcium, la laine minérale et les systèmes d'isolation à base d'aérogel

La désignation d'une classe de produits ne dit rien sur l'innocuité chimique du produit individuel. Ce qui est décisif, ce sont les matières premières, fibres, supports, liants et charges effectivement employés.

Si des tissus de verre E, des produits en silicate de calcium, des produits en laine minérale ou des systèmes d'isolation à base d'aérogel contiennent de manière établie des fractions d'oxydes basiques, en particulier des fractions de calcium et/ou de sodium, celles-ci doivent être évaluées, en cas d'utilisation sur des pièces chaudes alliées au chrome, comme un indice d'un risque de formation de chromates qui ne peut être exclu. La disponibilité réactionnelle, la température, la durée et l'oxygène déterminent la forme concrète que cela prend. La situation de soupçon liée au matériau doit être intégrée à l'évaluation des risques indépendamment d'un test rapide positif préalable. [19]

Cela vaut également pour les produits à base d'aérogel. Un cœur en aérogel ne change pas l'évaluation lorsque le système global commercialisé contient par exemple des supports en fibre de verre, des tissus, des liants, des charges ou des revêtements comportant des fractions d'oxydes basiques. Ce qui est déterminant, c'est la composition du produit isolant concret dans le système d'emploi prévu, pas sa désignation publicitaire.

Objectif d'essai : tenue du matériau ou formation de substances dangereuses ?

Le Superwool Technical Manual de Morgan contient sa propre Contamination / Pollution Study. De la poudre de chrome a été introduite entre des matelas isolants ; après six heures à 1 000, 1 100 et 1 150 °C, la pulvérisation, la fusion, le changement de couleur et les signes visibles de réaction ont été évalués. La ligne du chrome est indiquée comme sans réaction observée pour les quatre produits fibreux étudiés, parmi lesquels des fibres de silicate de calcium et de silicate de calcium et de magnésium. Aucune détermination du Cr(VI) avec limite de détection n'est décrite. [27]

La conséquence technique réside dans l'objectif d'essai : une fibre extérieurement intacte peut porter une faible quantité d'un produit de réaction dangereux. Le constat décrit ne répond donc pas à la question de la formation de chromates. Par ailleurs, la température et la durée diffèrent considérablement des essais de longue durée de Sayano à 500 et 600 °C respectivement. [11, 27]

Le manuel met en même temps en avant l'absence de classification comme substance dangereuse et un déchet non dangereux. De telles affirmations sur la chimie de la fibre ne remplacent pas une évaluation du système d'isolation contaminé après usage. Il s'agit d'un document public du groupe avec une référence au droit européen. L'extrait examiné ne permet pas d'établir une première publication certaine. [27]

13. Le dilemme des fabricants d'isolants

L'oxyde de calcium et l'oxyde de sodium ne sont pas des additifs que l'on raye d'une formulation comme un pigment colorant. Depuis les débuts de la fabrication du verre, ils sont des constituants essentiels du bain de fusion à partir duquel les fibres sont étirées ou centrifugées.

La composition de ce bain de fusion n'est pas nouvelle. Le verre silico-sodo-calcique est le type de verre connu le plus ancien ; il est attesté depuis la fin de l'âge du bronze en Mésopotamie et en Égypte et reste le type dominant du deuxième millénaire avant Jésus-Christ jusqu'à l'époque moderne. Le fondant a d'abord été fourni par le natron, puis par les cendres de plantes, deux sources de sodium ; la chaux y entrait par du sable calcaire, par des coquilles ajoutées ou par du calcaire et se situait typiquement entre 5 et 10 pour cent. Sa fonction est la même qu'aujourd'hui : elle abaisse la solubilité du verre dans l'eau. [80]

La fibre qui en est issue est plus récente. La laine de laitier et de roche a été produite pour la première fois en 1840 au pays de Galles ; en Angleterre, des exploitations commerciales ont fonctionné jusqu'en 1885, en Allemagne peu après, et la première usine commerciale à connaître le succès aux États-Unis est entrée en service en 1897. La laine de verre a suivi en 1932 avec le procédé de soufflage à la vapeur chez Owens-Illinois ; en 1938 en est née la Owens Corning Fiberglas Corporation. [81, 82]

L'étirage d'un fil à partir de verre visqueux était en revanche déjà connu en Égypte et à Venise. Ce qui a été repris n'est donc pas la machine, mais la formulation : un fil ne peut être étiré que depuis un bain de fusion présentant la viscosité appropriée à une température maîtrisable. C'est précisément à cela que servent l'oxyde de sodium et l'oxyde de calcium.

Chimiquement, ils agissent comme modificateurs de réseau. Ils rompent le réseau de dioxyde de silicium, abaissent la viscosité et la température de fusion et rendent le bain de fusion transformable. L'oxyde de sodium est à cet égard le fondant classique, l'oxyde de calcium stabilise en outre la résistance chimique du verre solidifié. Sans ces oxydes, le dioxyde de silicium pur resterait un matériau qui ne fond que bien au-dessus de 1700 °C.

À cela s'ajoute le volet des matières premières. Le calcin, c'est-à-dire le verre sodo-calcique issu du circuit de l'emballage, est une matière d'entrée essentielle de la fabrication de la laine de verre. Il apporte nécessairement du calcium et du sodium. Pour la laine de roche, le calcaire et la dolomie fournissent les mêmes oxydes ; pour les laines AES biosolubles, la base alcalino-terreuse donne même son nom au produit et conditionne la biosolubilité.

Le problème ne réside donc pas dans un ajout, mais dans la classe de matériaux et dans la chaîne d'approvisionnement. Lorsque les oxydes basiques sont désignés comme partenaires de réaction de la formation de chromates, cela ne concerne pas un produit, mais le fondement d'une grande partie de l'isolation haute température actuelle.

Et même si la formulation était modifiée, un second problème subsisterait. Moins d'oxydes basiques signifie une température de fusion plus élevée. La technique d'installation existante, les cuves, le garnissage réfractaire et la conduite de l'énergie, est dimensionnée pour les températures pratiquées jusqu'ici. Une conversion ne serait pas une question de formulation, mais un investissement dans les installations.

Des fibres sans oxydes basiques notables existent néanmoins, et cela depuis des décennies. Les fibres à haute teneur en silice avec plus de 95 pour cent de dioxyde de silicium, les fibres de silicate d'aluminium dans le système Al_2O_3-SiO_2 et les fibres polycristallines d'oxyde d'aluminium, filées non pas à partir du bain de fusion mais d'une solution précurseur puis cuites, se passent de fondant. La différence ne réside pas dans la chimie, mais dans le parc d'installations : température de fusion plus élevée, autres cuves, autre garnissage réfractaire, consommation d'énergie plus élevée, débit plus faible.

Au vu de cet arrière-plan, la réticence des leaders actuels du marché à l'égard de la formation in situ est compréhensible. Elle peut aussi être une forme d'autoprotection. Compréhensible ne veut toutefois pas dire sans conséquence, car l'évaluation d'un danger ne dépend pas du coût de son élimination.

La question qui traverse cette expertise se pose ainsi ici de la manière la plus aiguë : à partir de quand sait-on qu'on ne peut plus ne pas le savoir ?

14. Transport en phase gazeuse : Tatar/Gannon et van Leeuwen

La formation d'une espèce volatile de Cr(VI) sur une source de chrome chaude, son dépôt sur des fibres plus froides et la formation d'un chromate de calcium ou de sodium sont des étapes de réaction distinctes. Elles peuvent se produire parallèlement ou successivement. L'affirmation selon laquelle du Cr(VI) se forme aussi sans isolant contenant du calcium doit donc être distinguée de la question du rôle que joue un tel isolant dans la fixation, la quantité et la forme chimique du chrome déposé. [11, 35-37]

Étude	Conditions d'essai	Constat analytique / classement
Tatar/Gannon et al. 2018 [35]	Acier ferritique T409 à 700 °C ; air humide, p(H_2O) environ 0,16 bar ; 900 cm³ standard/min ; fibres aluminosilicatées séparées à 100-230 °C ; 150 h.	La XPS met en évidence Cr(VI) et Cr(III) sur les fibres. L'adsorption, la déshydratation et l'estérification avec les groupes OH de surface sont proposées comme mécanisme. Aucune mise en évidence spécifique de phase $CaCrO_4$ ou Na_2CrO_4 dans l'expérience sur fibres.
van Leeuwen et al. 2024 [36]	Poudre de Cr_2O_3 comme source ; zone chaude environ 800-850 °C ; environ 3 % en volume d'eau dans l'air ; environ 600 cm³/min ; 150 h. Fibres séparées dans la zone de sortie plus froide.	Le Cr(VI) est déterminé par voie humide avec le diphénylcarbazide/UV-Vis, le chrome total par ICP-OES. La présence de $CaCrO_4$ sur des fibres AES contenant du calcium est modélisée thermodynamiquement. Le Cr(VI) mesuré et l'inventaire de phases modélisé sont à distinguer.
Sayano et al. 2015 [11]	Contact direct de métaux contenant du chrome avec des isolants calco-silicatés ou contenant du sodium ; traitement thermique à l'air.	$CaCrO_4$ et Na_2CrO_4 sont identifiés par XRD à l'interface métal-isolant. Cette voie ne dépend ni d'un transport en phase gazeuse ni de l'estérification de groupes de surface.

Tatar étudie l'oxyhydroxyde de chrome issu d'une source d'acier chaude et son interaction avec des fibres aluminosilicatées plus froides et spatialement séparées. L'estérification proposée concerne des liaisons de surface contenant du chromate sur des centres aluminium/silicium ; elle ne peut être assimilée à une mise en évidence de chromate de calcium ou de sodium. La séquence de réaction est déduite de constats XPS et de la littérature. Le Cr(VI) lui-même a été constaté analytiquement. [35]

Si Tatar est invoqué comme preuve que la chimie de l'isolant serait par principe sans importance pour les dépôts de Cr(VI), cela dépasse les faits étudiés. Le travail montre une voie de formation et de transport sans contribution nécessaire du calcium à la source chaude. Il n'annule ni la mise en évidence directe à l'interface par Sayano ni une réaction ultérieure avec des composants calciques ou sodiques. [11, 35]

Van Leeuwen reprend expressément Tatar/Gannon et compare des fibres de quartz, des fibres d'oxyde d'aluminium et deux fibres alcalines de silicate alcalino-terreux (AES). Les quatre matériaux accumulent du Cr(VI). Les deux échantillons AES présentent, dans les solutions de digestion examinées, des concentrations absolues de Cr(VI) plus élevées que les échantillons de quartz et d'oxyde d'aluminium. La part de Cr(VI) dans le chrome total n'augmente toutefois pas de la même manière dans chaque échantillon : les valeurs individuelles du tableau II permettent un énoncé plus précis qu'une description globale faisant état de parts de Cr(VI) toujours plus élevées pour les AES. [36]

Échantillon de fibre	Cr(VI), mg/L	Cr total, mg/L	Cr(VI)/Cr total
Quartz	0,739	1,339	55 %
Oxyde d'aluminium	0,403	1,976	20 %
AES #1	0,873	2,170	40 %
AES #2	1,747	3,040	57 %

Valeurs d'après le tableau II ; pourcentages calculés à partir des valeurs individuelles publiées et arrondis. Il s'agit de concentrations dans des solutions de digestion, non de concentrations dans l'air ni directement de mg/kg d'isolant. Les différentes géométries de fibres et positions d'échantillonnage doivent être prises en compte lors de la comparaison des quantités. [36]

Les auteurs modélisent avec FactSage la réaction des espèces de chrome qui se condensent avec les composants oxydes et décrivent $CaCrO_4$ comme un porteur de Cr(VI) possible et important des fibres contenant du calcium. Cela complète mécanistiquement le transport en phase gazeuse. L'étude ne remplace cependant pas la mise en évidence directe des phases par XRD issue de l'essai de contact de Sayano. Chimiquement, $CaCrO_4$ est un chromate de Cr(VI) ; $CaCr_2O_4$ contient en revanche du Cr(III). Les écritures de formules divergentes dans certains passages doivent être vérifiées à l'aide du degré d'oxydation. [11, 36]

Pour la transposition aux installations, les conditions d'essai doivent être prises en compte : Tatar utilise de l'air fortement humidifié ; van Leeuwen environ 3 % en volume d'eau. Tous deux font passer un flux gazeux orienté dans un tube comportant une source chaude et, en aval, des échantillons de fibres. L'essai de van Leeuwen se déroule à la pression atmosphérique locale, non dans un réacteur à vapeur haute pression. La publication indique 800 °C dans le résumé et, dans la partie méthodes, un calibrage du centre du four à 850 °C. Les essais expliquent des possibilités de réaction ; leurs quantités ne sont pas directement transposables à une isolation extérieure de moteur librement exposée au flux. [35, 36]

L'association européenne des fabricants comme commanditaire : ECFIA et Montana State University

Tatar et van Leeuwen travaillent au sein du même groupe de recherche américain à la Montana State University ; Paul Gannon participe aux deux publications. La thèse de van Leeuwen de mai 2024 indique expressément en page 2 que la recherche remontait à une demande d'ECFIA, association des fabricants européens de laines isolantes haute température. Il s'agissait d'examiner des affirmations de concurrents selon lesquelles leurs produits réduisaient ou empêchaient la formation de Cr(VI). Les remerciements en page iii mentionnent un financement partiel par des partenaires industriels d'ECFIA. [35-37]

Il est ainsi documenté que la formation de Cr(VI) sur les laines isolantes haute température était connue comme sujet au sein de l'association européenne des fabricants ; l'élément déclencheur était constitué d'affirmations de concurrents relatives à la réduction ou à l'empêchement de la formation de Cr(VI). La thèse et la publication ultérieure sont des résultats qui se recoupent au sein du même contexte de recherche, non des confirmations indépendantes l'une de l'autre. L'indication de financement se rapporte ici au projet de thèse ; elle n'est pas présentée sans autre examen comme un financement spécifique de chaque publication prise isolément. [36, 37]

Il en découle une question précise : quels résultats ont été transmis, et à quel moment, aux partenaires industriels concernés, et comment sont-ils entrés dans les informations produits et dans les avertissements liés à l'application ? Le résultat scientifique doit être apprécié indépendamment de cette question de communication, sur la base de ses méthodes et de ses données.

15. L'époque de l'amiante, la substitution de l'amiante et le chrysotile

Continuité historique des matériaux : amiante, silicate de calcium et la période qui a suivi

Le silicate de calcium n'a pas été introduit dans les applications haute température seulement comme produit de substitution ultérieur, après la disparition de l'amiante. Cette classe de matériaux était déjà présente, à l'époque de l'amiante, sur le marché de l'isolation thermique technique et de l'isolation des tuyauteries.

Une fiche produit historique de Johns-Manville documente directement ce lien. Elle vante « J-M Thermobestos » pour une utilisation jusqu'à 1 200 °F et désigne expressément le produit comme « calcium silicate insulation ». La fiche figure dans un aperçu de produits du fabricant d'amiante de longue tradition Johns-Manville pour les isolations thermiques et les isolations de tuyauteries. Elle montre ainsi que le silicate de calcium ne constituait pas, à l'époque de l'amiante, un univers de matériaux situé en dehors du marché de l'amiante, mais faisait partie du même environnement d'isolation haute température. [6]

La disparition ultérieure de la fibre d'amiante a traité le danger fibreux lié à l'amiante. Elle n'a cependant pas automatiquement retiré des systèmes isolants la chimie de l'oxyde de calcium pertinente pour la formation de chromate. Des produits au silicate de calcium ont continué d'être proposés comme isolations haute température ; actuellement, Johns Manville commercialise par exemple également des isolations haute température à base de silicate de calcium, désormais expressément exemptes d'amiante. La modification du composant fibreux ne doit donc pas être assimilée à une élimination du composant calcique basique.

Mélanges amiante-laine minérale et systèmes composites

Le développement historique des matériaux ne s'est pas déroulé exclusivement comme un passage de l'amiante pur à la laine minérale pure. Le brevet Johns-Manville US2389460A, délivré le 20 novembre 1945, décrit des panneaux d'isolation thermique contenant de la laine de roche et des fibres d'amiante dans un rapport pondéral d'environ 2:1, liés par un liant plastique. Il documente un mélange de fibres expressément prévu. [20]

Pour la technique haute température, US2162387A du 13 juin 1939 est en outre pertinent : le ciment haute température décrit pour les joints de chaudières et de foyers contient 10 pour cent en poids de fibres d'amiante, 5 % de laine minérale et 8 % de silicate de sodium ainsi que 27 % de sable et 50 % d'argile réfractaire. L'amiante, la laine minérale et un composant sodique étaient donc déjà prévus à cette époque dans la même formulation. L'appréciation historique doit saisir de tels systèmes mélangés et composites, y compris leurs composants basiques. [21]

La logique de risque historique et la logique de risque actuelle doivent donc être distinguées et en même temps pensées ensemble :

Référence temporelle et matérielle	Dimension de danger pertinente
Isolants contenant de l'amiante	Cancérogénicité fibreuse propre et grave et maladies liées aux fibres
Fibres de chrysotile à teneur en chrome	Mobilisation oxydative potentielle de Cr(VI) comme composante génotoxique supplémentaire
Isolation haute température à base de silicate de calcium sur des pièces chaudes alliées au chrome	Voie de réaction liée au calcium conduisant au chromate de calcium
Isolants de l'après-amiante contenant des oxydes basiques	Persistance de la voie de formation du chromate dès lors que les conditions de réaction nécessaires se réunissent

Une approche de recherche précoce : le rapport américain de 1969

Air Pollution Aspects of Chromium and its Compounds de Ralph J. Sullivan contient deux points de rattachement distincts. La section 3.4.1 Asbestos, pages imprimées 24-25, rend compte des réflexions de l'époque sur le chrome et d'autres éléments traces comme participants aux cancers associés à l'amiante. Elle indique une teneur en chrome d'environ 1 500 µg/g dans le matériau d'amiante cité. La section 3.4.3 Cement, page 25, explique la formation de chromate par traitement thermique de Cr_2O_3 dans des conditions alcalines et s'interroge sur sa signification pour d'autres matériaux, par exemple l'amiante. [17]

Le premier rattachement concerne une composante de dommage biologique supplémentaire possible ; le second une question de recherche thermochimique. Ces deux questions historiques doivent être poursuivies séparément : par la chimie des métaux associée aux fibres d'une part, et par la composition, les interfaces et les conditions de service des systèmes isolants contenant de l'amiante d'autre part. Le rapport a été établi en 1969 pour la US National Air Pollution Control Administration, rattachée au ministère de la Santé. Il se trouve aujourd'hui dans les archives de l'agence américaine de l'environnement EPA ; l'EPA n'était pas son commanditaire de l'époque. [17]

L'amiante chrysotile comme source parallèle possible de Cr(VI) : le constat de Walter et al.

L'étude de Walter et al. (2022) n'examine pas la formation de chromate sur des isolants, mais la libération de chrome à partir de l'amiante chrysotile. C'est précisément pour cette raison qu'elle complète de façon décisive l'examen historique : elle rend visible le fait qu'une exposition à l'amiante, en présence de chrysotile contenant du chrome, ne peut pas nécessairement être comprise exclusivement comme une exposition aux fibres.

Walter et al. montrent dans le chrysotile étudié une teneur en chrome située dans le domaine des faibles grammes par kilogramme. À l'état initial, le chrome se présente majoritairement sous forme de Cr(III) peu soluble. Dans des conditions oxydantes à pH physiologique, en particulier en présence de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), du chrome a été mobilisé à partir des fibres et mis en évidence dans la solution exclusivement sous forme de Cr(VI). Le Cr(VI) mobilisé se présentait majoritairement sous forme d'oxyanion chromate.

La voie du chrome insuffisamment étudiée jusque-là

Walter et al. précisent qu'une participation du chrome à la cancérogénicité du chrysotile avait déjà été postulée auparavant. Le comportement et la réactivité du chrome associé aux fibres dans le poumon et la plèvre étaient toutefois insuffisamment compris ; la capacité d'absorption des cellules concernées n'avait, à la connaissance des auteurs, pas été étudiée auparavant. L'étude traite ces lacunes de connaissance par voie expérimentale. [4]

L'étude démontre en outre que les cellules épithéliales pulmonaires, les cellules mésothéliales, les cellules de carcinome pulmonaire et de mésothéliome expriment des transporteurs de Cr(VI) et absorbent le Cr(VI) ajouté au milieu de culture dans les essais d'absorption cellulaire. L'accumulation intracellulaire de chrome a atteint dans les essais jusqu'à environ dix fois la concentration du milieu environnant. Selon les auteurs, ce Cr(VI) mobilisé et capable de pénétrer dans les cellules peut donc contribuer à l'initiation et à la progression tumorales dans les maladies associées à l'amiante.

Le constat doit être lu avec précision :

- Il n'atténue pas la cancérogénicité propre de la fibre d'amiante.
- Il ne déplace pas vers le chrome la chimie connue du fer et des fibres. Walter et al. n'ont trouvé aucune contribution pertinente du chrome à la décomposition de H_2O_2 ni à la formation de radicaux hydroxyles ; cette voie est restée pour l'essentiel attribuée au fer.

- Il complète les mécanismes de dommage par une voie génotoxique supplémentaire médiée par le Cr(VI).

L'étude ouvre ainsi une question historiquement pertinente : dans quelle mesure les risques de maladie liés à des expositions comportant du chrysotile ont-ils été imputés exclusivement à l'effet des fibres, alors que du Cr(VI) supplémentaire pouvait avoir été mobilisé à partir des fibres dans des conditions inflammatoires et oxydantes ? Walter et al. ne répondent pas quantitativement à cette question. Ils montrent toutefois qu'une participation parallèle du Cr(VI) doit, sur une base scientifiquement fondée, être incluse dans l'appréciation.

Substitution de l'amiante : élimination du danger fibreux, pas nécessairement de l'ensemble du système réactionnel

Le passage historique des isolations haute température contenant de l'amiante à des isolations exemptes d'amiante a d'abord été, à juste titre, une substitution de la fibre d'amiante. La fibre d'amiante n'était plus défendable en raison de son effet cancérogène propre et grave. Son retrait des isolants était donc impératif.

Cette substitution de la fibre ne doit toutefois pas être assimilée à une substitution matérielle complète de l'ensemble du système d'isolation haute température. Historiquement, les fibres d'amiante étaient combinées, dans les systèmes isolants, à des composants inorganiques. L'USGS mentionne expressément, pour les mélanges de fibres d'amiante en vrac, entre autres le silicate de calcium hydraté comme composant inorganique de mélange destiné aux produits d'isolation thermique, électrique et acoustique. [8] Dès 1901, le brevet américain 668,684 décrit en outre un composite isolant ignifuge constitué de couches extérieures de papier d'amiante et d'une couche centrale en laine minérale. [7]

Avec la disparition de l'amiante, c'est donc, dans de nombreuses applications, principalement le composant fibreux critique qui a changé. Dans la mesure où les produits de remplacement exempts d'amiante contenaient toujours des oxydes de calcium, de sodium, de magnésium ou de potassium provenant des fibres, des charges, des liants ou d'autres matières premières, la chimie basique et oxydique de l'isolation est restée inchangée. Sur des pièces chaudes alliées au chrome, les conditions matérielles de la formation de composés de chrome(VI) ont ainsi également subsisté.

L'appréciation techniquement précise est donc la suivante :

> **La substitution de l'amiante a éliminé la fibre d'amiante devenue indéfendable, mais pas nécessairement la voie de réaction indépendante de celle-ci, allant de la source de chrome, des oxydes basiques, de l'oxygène et de la sollicitation thermique jusqu'au chromate de calcium et/ou de sodium.**

« Exempt d'amiante » n'est donc pas un énoncé sur le fait qu'un isolant haute température soit chimiquement inerte sur des pièces chaudes alliées au chrome ou ne présente aucun risque de formation de chromate. Une substitution préventivement complète doit saisir les deux dimensions de danger : elle doit exclure le danger fibreux lié à l'amiante et éviter, dans l'application prévue, la voie de formation de composés de chrome(VI). Cela suppose que l'isolation ne contienne pas d'oxydes basiques formateurs de chromate ou que leur disponibilité réactionnelle soit exclue de manière sûre dans les conditions d'emploi.

16. Avertissements des fabricants et des exploitants : état des connaissances industrielles documenté

Les travaux scientifiques ne sont pas isolés. Des fabricants de moteurs, de groupes, d'isolants et de laine minérale ont repris la problématique dans des informations techniques, des notes de service et des consignes de sécurité. Ces documents montrent que la voie de formation a été observée dans la pratique dans différents domaines d'application industriels, confirmée analytiquement et, en partie, assortie de prescriptions de prévention concrètes. Ces communications ne sont pas des indications de précaution. Elles décrivent des constats sur des installations en service, en partie avec des illustrations provenant du terrain.

La communication la plus ancienne : Babcock & Wilcox 1990 et 1994

Le premier avertissement de fabricant documenté sur cette voie de formation ne date pas des dernières années. La Babcock & Wilcox Power Generation Group a publié en avril 1990 le Plant Service Bulletin PSB-43 à l'attention des propriétaires et exploitants de chaudières et de générateurs de vapeur. La première version portait sur des matériaux réfractaires contenant du chrome. La version révisée PSB-43A de mars 1994 étend expressément le domaine d'application aux « plastics, insulation, and textiles ». [75]

La communication décrit le processus sans équivoque : les matériaux utilisés dans les chaudières peuvent contenir des composés de chrome « as part of the mixture or composition », et « during operation, some of the chromium compounds may be converted to hexavalent chromium ». Pour le démontage, il est indiqué : « the dust created may transport the hexavalent chromium. Inhaling hexavalent chromium increases the risk of lung cancer in humans ». [75]

Les mesures recommandées correspondent sur le fond au régime de protection que la TRGS 561 allemande prévoit aujourd'hui aux points 4.1 et 4.2 : formation, équipement et surveillance du personnel, travail à faible émission de poussière, absence de contact cutané, élimination comme déchet dangereux, dans la communication selon 40 CFR 261 et 262. La différence réside dans l'élément déclencheur. La TRGS 561 allemande part du principe, aux points 3.3.4 et 5.9.3, que la formation de composés de chrome(VI) sur des pièces chaudes alliées au chrome ne peut être exclue, et exige pour cette raison le régime de protection ainsi que le contrôle de substitution sans mesure préalable. Le bulletin de 1990 place en revanche un examen au commencement et recommande de faire vérifier avant le démontage, par un laboratoire indépendant qualifié, si des composés de chrome sont présents et s'ils se sont transformés en chrome(VI). Quant au remplacement, il y est indiqué que des produits de substitution aux produits contenant du chrome sont disponibles, mais qu'ils présentent en partie une durée de vie plus courte. [75]

La communication nomme les produits concernés. Parmi les matériaux réfractaires et les masses de damage figurent entre autres Chrome Ore, Chrome Mortar, Kromight, Kromecast, Monochrome et Moldit Chrome Castable. Comme produits isolants et textiles contenant du chrome sont mentionnés Cerachrome, Z-Blok, Ceraform 130 et Cerachrome Felt. [75]

Ce qui en a été conclu

La conclusion tirée était évidente : le produit contenait du chrome, les produits contenant du chrome ont donc été écartés. Les formulations elles-mêmes sont restées inchangées ; la fiche de données de sécurité de Ceraform 130 indique encore, dans sa version du 23 décembre 2020, de l'oxyde de chrome(III) jusqu'à 3 pour cent (section 3). La poudre jaune a continué d'apparaître. Comme le chrome semblait retiré de l'isolation, il restait comme explication la pièce chaude alliée au chrome, et le constat passait dès lors pour inévitable. [77]

Pour la deuxième fois, la nature des composés en cause n'a pas été reconnue. Il s'agissait de chromates alcalins et alcalino-terreux, et leur partenaire de réaction n'avait jamais été retiré. Il se trouve encore aujourd'hui dans les mêmes produits, derrière un numéro CAS que personne, parmi les utilisateurs, ne consulte. Les solutions de remplacement actuelles n'ont plus ce problème : il existe des isolants haute température exempts d'oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux qui évitent la voie de formation, sans perte de résistance à la température ni de durée de vie.

Éditeur	Constat documenté	Énoncé sur la formation et la prévention
Caterpillar / Caterpillar Energy Solutions	Résidus jaunes sur des systèmes d'échappement et des isolations d'échappement ; des analyses de laboratoire indépendantes ont confirmé le Cr(VI).	Indications relatives aux températures élevées, aux pièces de rechange, aux matériaux de maintenance et aux environnements d'exploitation. En cas de résidus suspects : évitement des poussières, EPI et traitement comme déchet dangereux.
[redacted]	[redacted], approuvée le 31.05.2023 : Cr(VI) sous forme de résidu jaunâtre sur des pièces de moteur ou sur l'isolation.	Mentionne l'acier contenant du chrome, le calcium provenant par exemple du matériau isolant, l'oxygène et des températures supérieures à 400 °C. Le cercle des destinataires comprend les clients, les partenaires de service et les filiales. [25]
MAN Truck & Bus SE	Des analyses propres ont mis en évidence du Cr(VI) sur des composants de moteur ayant fonctionné ; le chromate de calcium $CaCrO_4$ est expressément nommé.	Aciers contenant du Cr, isolants ou pâtes de montage contenant du calcium, oxygène, températures supérieures à 300 °C. Pour les travaux de montage, exclusivement des pâtes appropriées exemptes de calcium.
Frenzelit	Confirme des teneurs en oxyde de calcium, en proportions variables, dans ses propres matériaux d'isolation.	Acier allié au Cr, oxydes alcalins/alcalino-terreux, en particulier CaO, oxygène, au-delà de 350 °C. Ses propres produits peuvent contribuer à la formation de Cr(VI) lorsque ces conditions sont réunies.
Rockwool Technical Insulation	95-100 % de laine de roche ; au total plus de 18 % d'oxydes alcalins/alcalino-terreux. Dépôts de Cr(VI) décrits sur acier inoxydable et sur laine minérale.	Traite des dépôts en présence de fil d'acier inoxydable chaud. En cas de dépôts suspects, test rapide ; en cas de Cr(VI), prescriptions spécifiques de protection au travail et d'hygiène. Lors du démontage de dépôts suspects, également des mesures de protection.
[redacted]	Service Information [redacted] du 07.08.2025 : formation de Cr(VI) sur les surfaces de composants d'échappement chauds contenant du chrome.	Mentionne entre autres le turbocompresseur, les collecteurs d'échappement, l'EGR, les catalyseurs et le DPF ; exige des mesures de protection, interdit le nettoyage à l'air comprimé et décrit une neutralisation. [22]
[redacted]	[redacted] du 27.08.2025 : contaminations par Cr(VI) confirmées, entre autres sur des boucliers thermiques, des collecteurs d'échappement et des turbocompresseurs.	Avertissement expressément destiné au personnel travaillant dans le compartiment moteur, aux réparations de véhicules et à la manipulation de composants ; la contamination peut être invisible. Prescriptions relatives aux EPI, à l'hygiène et au nettoyage. [23]

Éditeur	Constat documenté	Énoncé sur la formation et la prévention
Wärtsilä Finland Oy	Instruction WS00Q563, première édition du 9 novembre 2020, édition 4 du 20 juin 2024 : résidu de Cr(VI), jaunâtre ou blanchâtre, sur des composants du système d'échappement, sur les tôles des caissons d'isolation de l'échappement et sur des pièces de turbocompresseur, avec des photographies d'un assemblage boulonné et de brides de tuyau d'échappement. Vaut pour les moteurs quatre temps et pour les composants situés après le moteur dont la température de service peut dépasser 400 °C.	Nomme trois conditions réunies simultanément : un produit contenant du calcium, le plus souvent une pâte de montage ou un isolant à base de calcium, plus de 400 °C et un acier chromé en contact ; avec un avertissement sur les travaux à chaud. Exige des kits de lingettes avant le début des travaux, le contrôle de tout résidu suspect, la fixation des poussières, l'aspiration HEPA, l'étiquetage et l'élimination comme déchet dangereux ainsi que FFP3 ou NIOSH P95/P100. Recommande le passage à des pâtes de montage sans composés calciques réactifs. Destinataires : les exploitants et les propriétaires des installations concernées, pour attention immédiate.

Ce que ces avertissements démontrent

Les avertissements concernent plusieurs domaines d'application industriels. MAN nomme le chromate de calcium et les conditions de formation liées aux matériaux ; Frenzelit situe ses propres teneurs en oxyde de calcium dans le même contexte. Caterpillar confirme des constats réels de Cr(VI). Rockwool décrit des dépôts et la composition oxydique basique de sa laine de roche. [12-16]

Wärtsilä nomme l'isolant à base de calcium et la pâte de montage calcique comme source de calcium, 400 °C comme seuil, et exige le contrôle avant le début des travaux. [137]

Certains documents présentent encore la formation comme « pas entièrement » ou « en général pas encore compréhensible » et renvoient à des sources externes possibles telles que des pièces de rechange, des matériaux de maintenance ou des environnements d'exploitation. Ces énoncés peuvent porter sur des questions ouvertes concernant les parts de sources locales, la cinétique ou des conditions de service concrètes. Ils ne remettent cependant pas en cause la voie de formation documentée. Les pièces de rechange, les pâtes de montage et les isolants sont précisément des porteurs possibles des composés de calcium et de sodium pertinents pour la formation de chromate.

La présentation de l'exposition comme un problème isolé, inexplicable ou causé exclusivement par des circonstances externes particulières laisse donc de côté l'état des connaissances publié, scientifique, du côté des fabricants et du côté des caisses professionnelles allemandes. Savoir si une telle occultation est consciente ou inconsciente ne peut être déduit des documents eux-mêmes ; sur le plan technique, elle produit toutefois une relativisation d'une voie de réaction connue et évitable.

Où figure l'indication : les fiches de données de sécurité des produits réfractaires

HarbisonWalker International est le successeur juridique de Harbison-Walker, A.P. Green et NARCO, soit des fabricants dont le bulletin de 1994 cite nommément les produits. Les fiches de données de sécurité de ses produits réfractaires contenant du chrome portent la phrase : « The chrome compounds (Cr III) in this product may be altered to a hexavalent compound (Cr VI) under certain use conditions, such as exposure to alkali salts and/or high temperatures. » Elle a été vérifiée sur PLASTECH RUBY (version 02 du 1er avril 2021), AUREX 30 SR (version 02 du 29 juin 2018), SFG (version 02 du 22 mars 2021) et RUBY (version 03 du 17 avril 2020). [93]

La phrase figure à la section 13, élimination. Dans les fiches examinées, le mot hexavalent n'apparaît à aucun autre endroit, ni à la section 2 ni à la section 10. Selon l'annexe D de l'OSHA 29 CFR 1910.1200, la section 10 exige l'indication de la « Possibility of hazardous reactions, including those associated with foreseeable emergencies » et des « Hazardous decomposition products », la section 7 celle des « Precautions for safe handling » ; le tableau D.1 présente les sections 12 à 15 comme non contraignantes. L'énoncé relatif à la transformation se trouve ainsi dans la partie de la fiche pour laquelle il n'existe aucune obligation de contrôle du contenu. Cette partie est lue par celui qui décide du classement du déchet, et ce après le démontage. [94]

Les compositions montrent que le partenaire alcalin est contenu dans plusieurs de ces produits. SFG, une brique magnésie-chrome, indique de l'oxyde de magnésium à hauteur de 70 à 90 pour cent à côté d'oxyde de chrome(III) à hauteur de 20 à 40 pour cent. RUBY indique de l'aluminate de sodium à hauteur de 2,5 à 10 pour cent à côté d'oxyde de chrome(III) à hauteur de 2,5 à 10 pour cent. THERMOLITH, un mortier au chrome comportant 80 à 100 pour cent de composés de chrome et 2,5 à 10 pour cent de silicate de sodium comme liant, ne contient pas cette indication. Le fabricant formule l'alcali comme quelque chose à quoi le produit est exposé de l'extérieur, alors qu'il est un constituant de plusieurs de ses propres produits. [93]

Du côté des fibres, l'indication et le partenaire manquent. La fiche de données de sécurité Morgan SDS 252, dans sa révision du 1er juin 2015, couvre Cerachrome et Z-Blok en exécution CR et indique les Refractories, Fibers, Aluminosilicate sous le numéro CAS 142844-00-6 à hauteur de 95 à 100 pour cent ainsi que de l'oxyde de chrome(III) jusqu'à 3 pour cent ; la section 10 mentionne comme produits de décomposition « None », et le chrome(VI) n'apparaît nulle part dans la fiche. Dans aucune des fiches de fibres examinées le calcium n'apparaît comme ligne distincte, pas davantage dans la fiche relative à Ceraform 130. Le partenaire de réaction se trouve dans la définition de la substance derrière le numéro CAS : le dossier d'enregistrement de l'ECHA décrit le groupe de substances comme une fibre de verre amorphe de dioxyde de silicium et d'oxyde d'aluminium comportant une série d'autres oxydes, parmi lesquels expressément l'oxyde de calcium, et la définition de la classe de substances admet une teneur en oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux allant jusqu'à 18 pour cent en poids. [95, 96]

Il existe ainsi deux présentations d'une même réaction. Les fabricants de produits réfractaires nomment la voie de transformation et ses conditions et placent cet énoncé dans la rubrique de l'élimination. Du côté des fibres, la voie n'est pas nommée, et le partenaire de réaction n'apparaît pas dans les fiches comme constituant.

Informations de sécurité : état de livraison et état après usage

L'instruction européenne ProRox-WM-S/SW de Rockwool contient dès le 1er mai 2023, et toujours dans la version 1.1 du 1er janvier 2025, des indications expresses sur les dépôts de Cr(VI) après emploi à haute température, sur leur danger cancérogène et sur les mesures de protection lors du démontage. L'instruction européenne se rapporte spécialement aux exécutions avec grillage en acier inoxydable et/ou fil de couture en acier inoxydable. [16, 24]

Chez Morgan, les sections relatives à la réactivité traitent surtout de la stabilité des fibres AES, de la décomposition des liants et des changements de phase à haute température. Après emploi également, des questions de poussières de fibres ou de silice sont abordées ; la voie de réaction avec des surfaces opposées contenant du chrome n'est pas expliquée dans la SDS 418 britannique examinée. Aspen, dans l'information article allemande relative à Pyrogel XTE, ne décrit aucune réaction dangereuse connue en cas d'utilisation habituelle, mais ne mentionne aucune voie du chromate. Il s'agit d'une lacune documentaire concrète pour la poursuite de l'examen des combinaisons de matériaux appropriées. Ce n'est pas un constat portant sur l'ensemble des documents de ces fabricants. [28, 29]

Pour l'appréciation, l'état de livraison doit être distingué de l'application thermique prévue et de l'état au démontage. Une fibre non classée comme dangereuse ou un produit traité comme article peut, après usage, être chargé de substances dangereuses nouvellement formées. Ce qui est déterminant, c'est de savoir si l'information de sécurité couvre ce changement d'état pour le contact prévu avec des composants contenant du chrome.

Connaissance du fabricant depuis 2019 : [redacted]

L'auteur dispose d'une correspondance de fabricant d'[redacted] d'août 2019. Le fabricant y indiquait à son fournisseur d'isolations d'échappement que des dépôts situés entre l'isolation d'échappement et les conduites d'échappement sur des moteurs [redacted] avaient été testés positifs au chrome(VI). Le sujet devait être traité comme substance extrêmement préoccupante (SVHC) avec la plus haute urgence. Comme cause, le fabricant désignait déjà à l'époque l'acier inoxydable contenant du chrome, en particulier le treillis métallique de l'isolation, en réaction avec le calcium provenant du matériau isolant. Il était ajouté que le problème se présentait sur tous les types de moteurs. [52]

La voie de formation dépendante du calcium était ainsi connue du fabricant près de quatre ans avant l'instruction technique [redacted] (2023). Elle correspond au mécanisme décrit par Udy 1939, Paoletti 2002 et Sayano 2015. [1, 11, 25, 50]

17. Analytique : la méthode détermine le constat

La détermination du chrome(VI) n'est pas une détermination élémentaire, mais une analyse de spéciation. Ce qui est mesuré est un état d'oxydation, et cet état peut changer pendant la préparation de l'échantillon. Ce que l'appareil enregistre au final n'est pas nécessairement ce qui était présent dans l'échantillon.

Le procédé américain EPA SW-846 Method 3060A, qui sert de base à la mise en solution alcaline, nomme expressément les deux directions d'erreur. D'une part, les conditions d'extraction doivent « not induce reduction of native Cr(VI) to Cr(III) », d'autre part la méthode doit « not cause oxidation of native Cr(III) contained in the sample to Cr(VI) ». Sur la seconde direction, il est précisé en outre : « Cr(VI) results obtained using this method may be biased high due to method-induced oxidation. » [83]

La réduction pendant la mise en solution

Si l'échantillon contient des constituants réducteurs, le chromate est transformé avant de pouvoir être mesuré. Dans les revêtements, il s'agit surtout de zinc et d'aluminium métalliques, par ailleurs de fer(II) et de constituants organiques. L'essai interlaboratoires relatif à la norme néerlandaise NEN 5617 montre l'ordre de grandeur : sur un échantillon de peinture exempt de zinc, les laboratoires participants ont atteint en moyenne 58 pour cent de taux de récupération, et encore 39 pour cent à 50 000 mg/kg de zinc. Dans une matrice contenant 16 pour cent de zinc, le taux de récupération était de 0,2 pour cent selon la NEN 5617, de 6,5 pour cent avec un autre procédé accrédité et de 35,3 pour cent avec le procédé de SEEF B.V. La NEN 5617:2022 se classe elle-même, pour cette raison, comme semi-quantitative. [84, 85]

La matrice de l'isolant

Pour les isolants thermiques, la situation s'aggrave parce que la matrice est elle-même le partenaire de réaction : riche en calcium, basique et, à l'état usagé, imprégnée de suie, d'huile et de produits de corrosion. Il n'existe pas de méthode normalisée pour cette matrice ; il n'existe ni méthode NEN, ni méthode ISO, ni méthode NIOSH taillée pour les isolants. L'ISO 15192:2021 est destinée aux déchets et aux sols. Les procédés transposés donnent, selon les indications du laboratoire qui s'en occupe, des résultats sous-estimés de 20 à 30 pour cent dans les cas modérés et des valeurs proches de zéro pour des échantillons fortement calciques. Un laboratoire néerlandais, SEEF B.V., a mis au point pour cette matrice un procédé propre qui stabilise le chrome(VI) sur l'ensemble de la chaîne analytique et atteint, selon ses propres indications, sur des échantillons d'isolant dopés, des taux de récupération structurellement supérieurs à 80 pour cent. [85]

Films d'huile et phases apolaires

Outre la réduction, il existe une seconde voie par laquelle un échantillon indique trop peu. Si une surface est traitée avec une huile dégrippante avant le prélèvement, le chromate passe dans une phase apolaire et n'est plus disponible pour la mesure en milieu aqueux. Chimiquement, il ne se produit rien ; l'analyte est seulement soustrait à la détermination.

SEEF B.V. a quantifié cela pour le WD-40. Du chrome(VI) solide en contact direct avec 2 ml de WD-40, ensuite dissous dans l'eau sans chimie de mise en solution, a donné un taux de récupération de 5,8 pour cent. Pour des volumes plus élevés, aucune concentration fiable n'a plus pu être déterminée, parce que le chromate s'agglomérait dans la phase huileuse. Pour du chrome(VI) déjà dissous et en cas de mise en solution complète, l'effet ne s'est pas produit (section 26). [91]

Pour la pratique, il en résulte qu'un prélèvement effectué après un traitement à l'huile ou à la graisse ne fournit aucun résultat exploitable. Cela concerne les huiles dégrippantes autant que les pâtes de montage et les produits de conservation.

Le prélèvement : endroit, surface et profondeur

Les sections précédentes concernent la mesure sur l'échantillon. Il faut en distinguer la question de savoir quel échantillon est prélevé. Dans la pratique, quatre approches coexistent : le frottis au bâtonnet sur un petit endroit, le prélèvement surfacique par lingette suivi d'une extraction, le prélèvement de matière dans l'isolant et l'analyse de phases sur une portion, telle que Sayano et al. l'ont menée par diffraction des rayons X. Chacune de ces approches décrit l'endroit auquel elle s'applique. [11]

La formation se produit là où l'acier chromé, le composant basique, l'oxygène et la température se rencontrent. Sur un ensemble isolé, ces conditions ne sont pas uniformes, le contact et la température varient sur la surface. La contamination se présente donc par plaques. Le résultat obtenu dépend de l'endroit où l'échantillon a été prélevé. L'étude de terrain française montre la même relation au sein d'une seule installation (section 19).

S'y ajoute la profondeur. L'analyse de phases ne saisit qu'une mince couche superficielle et seulement les fractions cristallines au-dessus de sa limite de détection (section 3). Le chromate formé à l'intérieur de l'isolation, à la face de contact avec la pièce ou entre les couches, se situe hors de ce domaine. L'essai par lingette saisit ce qui se trouve sur la surface accessible et se laisse essuyer. Le prélèvement de matière saisit la pièce prélevée.

Pour un système d'isolation de plusieurs mètres carrés, il en résulte une asymétrie. Un résultat positif établit la présence et clôt la question. Un résultat négatif établit l'absence de constat à l'endroit examiné, à la profondeur examinée et jusqu'à la limite de détection de la méthode. D'autres prélèvements négatifs agrandissent la surface examinée, ils ne couvrent pas la surface entière ; un prélèvement supplémentaire à un autre endroit peut se révéler positif. Un nombre de prélèvements qui établirait l'absence sur l'ensemble de la surface n'est pas réalisable en pratique.

Appréciation : ces procédés sont des procédés de mise en évidence et non des procédés de libération. Ils constatent une contamination et en délimitent l'étendue. Ils ne libèrent pas une surface. Les employer à cette fin revient à assimiler l'absence de constat à la preuve de l'absence.

Ce qui en découle pour l'évaluation des risques

Un résultat d'analyse relatif au chrome(VI) n'est pas, sans indication du taux de récupération sur la même matrice, un énoncé sur la teneur. La méthode de l'EPA en tire la conséquence et exige des échantillons dopés avant la mise en solution, solubles et insolubles, avec une plage d'acceptation du taux de récupération de 75 à 125 pour cent ; en dehors de cette plage, l'ensemble de la série doit être répété. [83]

Si cette indication manque, deux conclusions erronées sont possibles. Un résultat trop faible conduit à ce qu'une contamination existante soit classée comme négligeable et que les mesures de protection soient omises. Un résultat augmenté par la méthode conduit à ce que les mesures portent au mauvais endroit. Pour la protection des travailleurs, le premier cas pèse plus lourd, parce qu'il peut conduire à une libération qui ne repose sur aucune absence effective de chromate.

Il ne s'agit pas d'une appréciation de laboratoires particuliers. Les procédés cités conviennent aux matrices pour lesquelles ils ont été développés et sont exécutés dans les règles. Le point est autre : le chrome(VI) dépend de la matrice, et un procédé développé pour le sol ou les déchets ne fournit pas, sur un isolant usagé et riche en calcium, de résultat comparable.

Il en résulte l'exigence applicable à tout rapport d'essai : la méthode, la matrice et le taux de récupération sur cette matrice ont leur place dans le rapport, et pas seulement la valeur numérique. Et il en résulte en même temps pourquoi la TRGS 561 allemande ne s'appuie pas sur une mesure, mais sur la présomption de présence : tant que le taux de récupération dans cette matrice n'est pas établi, un résultat nul n'est pas une preuve de l'absence.

18. Les réglementations en comparaison : une référence, cinq déclinaisons

Pour tous les États membres, la directive 2004/37/CE dans sa version en vigueur s'applique au niveau supérieur. Depuis le 17 janvier 2025, elle fixe une valeur limite contraignante de 0,005 mg/m³ pour les composés du chrome(VI) ; auparavant, les valeurs étaient de 0,010 mg/m³ et, pour le soudage et le découpage plasma, de 0,025 mg/m³. [86]

La référence pour la question traitée ici est fixée par l'Allemagne. Le règlement allemand GefStoffV et la TRGS 561 forment le seul de ces corpus réglementaires qui traite expressément la formation de composés du chrome(VI) sur des pièces chaudes alliées au chrome et qui en déduit un régime de protection sans exiger de mesure préalable. Il n'existe pas de concentration d'acceptation pour les composés du chrome(VI) ; la TRGS 561 retient 0,001 mg/m³ dans la fraction inhalable comme critère d'évaluation, qui correspond en même temps à la concentration de tolérance de la TRGS 910. [87]

Les autres réglementations peuvent se lire comme un miroir de celle-ci.

Cadre	Base	Valeur limite dans l'air
Pays-Bas	Arbobesluit, liste SZW des substances cancérogènes	0,001 mg/m³ en Cr
Royaume-Uni	COSHH Regulations 2002, EH40	0,01 mg/m³, moyenne sur 8 heures ; 0,025 mg/m³ généré par le procédé [42]
États-Unis	OSHA 29 CFR 1910.1026	PEL 5 µg/m³, action level 2,5 µg/m³

Les valeurs numériques s'écartent d'un facteur 10. Toutes se rapportent à la teneur en chrome, aucune au composé concret. L'écart est toutefois plus faible qu'il n'y paraît : le Royaume-Uni a certes la valeur la plus élevée, mais les COSHH Regulations exigent en même temps, pour les substances cancérogènes, la minimisation au niveau le plus bas raisonnablement praticable, de sorte que la valeur limite n'y décrit pas un niveau de travail admissible. La fiche d'information INDG346 de la même autorité indique encore la valeur de 0,05 mg/m³ qui s'appliquait jusqu'au 17 janvier 2020 [88].

La concentration dans l'air ne décrit ainsi qu'une des deux voies d'exposition. Les poussières contenant du chrome(VI) ne se répartissent pas uniformément dans la zone de travail, et lors de travaux sur des pièces chaudes isolées, l'exposition dermique peut devoir être évaluée comme plus élevée que l'exposition par inhalation. Les deux voies sont à évaluer séparément. La règle américaine prescrit des vêtements de protection, des zones de vestiaire et de lavage ainsi que l'interdiction du soufflage à l'air comprimé ; la réglementation allemande classe les composés du chrome(VI) comme résorbables par la peau et exige les mesures correspondantes selon la TRGS 401.

Il en va de même pour les cendres d'incinération. Là aussi, le risque par inhalation et le risque par voie dermique sont à évaluer séparément, et une importance particulière revient à la prévention de la dispersion hors de la zone contaminée, qui concerne à la fois la sécurité au travail et la protection de l'environnement.

Droit des marchés publics : la clause américaine DFARS 252.223-7008

Aux États-Unis, le droit des marchés publics s'applique en plus de la sécurité au travail. La clause DFARS 252.223-7008 « Prohibition of Hexavalent Chromium » est en vigueur depuis le 5 mai 2011 et est intégrée aux contrats du ministère de la Défense conformément au DFARS 223.7306 ; la dernière modification date du 25 avril 2024. Elle repose sur le mémorandum « Minimizing the Use of Hexavalent Chromium » de l'Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics du 8 avril 2009. [89, 90]

Est interdite la livraison d'un article ou d'un produit de construction contenant du chrome(VI) « in a concentration greater than 0.1 percent by weight in any homogenous material », de même que la livraison d'articles pour lesquels le chrome(VI) devrait être enlevé ou appliqué à nouveau lors de phases d'entretien ultérieures. Selon la définition de l'alinéa (a), est considéré comme matériau homogène un matériau qui ne peut pas être décomposé mécaniquement et dont la composition est uniforme dans toute sa masse ; les revêtements de surface comptent expressément comme matériau homogène propre. L'exception de l'alinéa (b)(2) couvre « hexavalent chromium produced as a by-product of manufacturing processes ». L'alinéa (d) oblige à répercuter la clause sur tous les sous-traitants pour les livraisons, les prestations de maintenance et de réparation ou les produits de construction. [89]

Pour les pièces chaudes isolées, il en découle trois points. La masse de référence des 0,1 pour cent est le matériau homogène, de sorte qu'une mince couche de dépôt ou de revêtement contenant du chromate est rapportée à la masse de cette couche et non à celle du composant. L'exception est formulée pour les procédés de fabrication et, selon son libellé, ne couvre aucun chromate qui ne se forme qu'en service. L'obligation de répercussion étend la clause aux prestations de maintenance et de réparation. La question de savoir si une isolation contenant du calcium sur une pièce chaude alliée au chrome, qui exige l'élimination de chromate à chaque révision, relève de la seconde variante d'interdiction est une question d'interprétation que le libellé permet de poser.

19. La philosophie du test rapide et l'étude de terrain française

Les informations techniques de Caterpillar, MAN et surtout de Rockwool suivent en partie une logique graduée de détection et de réaction :

1. On recherche d'abord des dépôts visibles jaunes, jaunâtres ou orangés.

2. En présence d'un tel indice visible, un test rapide colorimétrique est mis en œuvre ou une analyse en laboratoire est recommandée.

3. Les mesures de protection particulières sont ensuite liées à la détection positive ou au soupçon concret.

Cette démarche a une finalité compréhensible en tant que procédé indicatif d'alerte et de dépistage. Un résultat positif est un signal d'alerte fiable et exige des mesures de protection. Elle ne permet toutefois pas de conclure, à partir d'un résultat négatif, à l'absence de contamination par le Cr(VI).

Dans l'instruction ProRox, le contrôle du Cr(VI) est lié à des dépôts de coloration remarquable. Elle exige par ailleurs des mesures de protection lors du démontage de tels dépôts. La logique de détection visuelle ne saisit cependant pas de manière fiable toute contamination et ne doit pas être comprise comme une mise hors de cause en l'absence de coloration ou en cas de test rapide négatif.

Sur le plan technique, cela ne tient pas comme logique de libération ou de mise hors de cause. La constellation matérielle formée d'une pièce chaude alliée au chrome, d'oxydes basiques, d'oxygène et de température fonde déjà un soupçon concret. Un test rapide négatif ne ramène pas ce soupçon à zéro, car sa sensibilité de détection, la représentativité du prélèvement, l'hétérogénéité de la surface et l'emplacement testé sont limités. De même, le traitement chimique ultérieur ou la « neutralisation » de résidus déjà présents ne remplace ni la prévention de la voie de formation ni une preuve d'efficacité fiable dans des conditions contrôlées.

Critère de prévention de la TRGS 561 allemande

La section 5.9.3 de la TRGS 561 allemande mentionne les oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux provenant d'isolants ou de pâtes de montage comme facteur d'influence. L'alinéa 5 exige des mesures de protection selon 4.1 et 4.2 ainsi que des mesures complémentaires lorsqu'une contamination par le chrome(VI) est présente ou ne peut être exclue. Dans un système de matériaux sollicité thermiquement, des fractions d'oxydes basiques constituent donc un indice de danger ; l'approche de protection ne commence pas seulement en présence d'un résultat positif. [19]

L'étude de terrain française suivante montre directement la conséquence pratique de cette philosophie du test rapide.

L'étude de terrain française : pourquoi des tests rapides négatifs ne permettent aucune levée d'alerte

L'étude française de Passeron et al. (2025) sur la maintenance de moteurs diesel et de moteurs marins met en évidence un niveau supplémentaire, important en pratique : la contamination par le chrome(VI) peut être manquée par des tests rapides colorimétriques visuels.

L'entreprise utilisait en interne des tests colorimétriques et y rattachait des décisions de prévention. Les auteurs de l'étude ont comparé ces tests, aux mêmes points de prélèvement, à des prélèvements surfaciques analysés en Cr(VI) par chromatographie ionique. Le résultat était net :

Point de prélèvement sur le moteur du véhicule	Résultat Cr(VI) de l'analyse en laboratoire	Test rapide colorimétrique visuel
Collecteur d'échappement	127 ng	Au mieux faiblement perceptible comme positif
Turbocompresseur	869 ng	Négatif
Vis à la sortie du turbocompresseur	1 646 ng	Positif

Les valeurs sont des quantités absolues de Cr(VI) par échantillon, non des concentrations rapportées à une surface.

Le test rapide négatif sur le turbocompresseur malgré un résultat de laboratoire de 869 ng de Cr(VI) est un résultat clairement faux négatif. Les auteurs relèvent en outre que plusieurs prélèvements surfaciques positifs n'ont pas été détectés par les tests colorimétriques visuels. Ils en concluent expressément que ces tests doivent être utilisés avec prudence.

Une évaluation fiable de la contamination des surfaces exige des prélèvements surfaciques représentatifs et des déterminations du Cr(VI) en laboratoire. Celles-ci évaluent une autre partie du risque que les mesures d'air liées à l'activité. Conformément à la section 24, les voies d'exposition sont à considérer chacune de manière autonome.

D. Véhicules

20. Moteurs de véhicules et compartiments moteur

Les avertissements relatifs aux véhicules relient la voie de formation industrielle au domaine de la maintenance automobile. [redacted] décrit la formation sur les surfaces chaudes de composants d'échappement contenant du chrome. [redacted] mentionne des contaminations effectivement constatées, vise expressément les travaux dans le compartiment moteur de tous les modèles et prend en compte, outre l'inhalation, le contact cutané et le transfert main-bouche. Les deux documents n'indiquent aucune spéciation définitive comme chromate de calcium ou chromate de sodium. [22, 23]

Application automobile concrète : Morgan Superwool Plus Heat Shield

Dans la fiche technique 09/2019, Morgan promeut expressément Superwool Plus Heat Shield pour les boucliers thermiques de véhicules soumis aux vibrations. Il s'agit d'un matelas de fibres flexible à base de silicate de calcium et de magnésium, non d'une plaque rigide de silicate de calcium. La fiche indique la composition en oxydes et les températures d'emploi suivantes. [48]

Indication dans la fiche technique du produit	Valeur
SiO_2	62-68 %
CaO	26-32 %
MgO	3-7 %
Surface chaude, fonctionnement continu	750 °C
Surface chaude, pic de courte durée	850 °C

La présentation relative à la sécurité traite de la biopersistance et du classement des fibres ; un avertissement relatif au chromate fait défaut. Le tableau de disponibilité de la fiche mentionne l'Europe. [48]

La page système de Morgan décrit Superwool Plus comme option d'isolation à l'intérieur d'enveloppes en acier inoxydable. Les applications citées sont les catalyseurs, les collecteurs d'échappement de voitures de tourisme, les applications turbo sur véhicules hors route et les collecteurs d'échappement dans la marine et la production d'énergie. Parmi les matériaux d'enveloppe sont cités notamment les aciers inoxydables austénitiques et ferritiques. [49]

La commercialisation ciblée d'un isolant contenant du calcium pour des applications automobiles sur pièces chaudes est ainsi documentée. La chimie de la fibre, la surface de contact et d'enveloppe contenant du chrome et la sollicitation thermique sont à évaluer ensemble. La teneur indiquée comme CaO est un indice de danger ; sa disponibilité pour la réaction est à contrôler dans la configuration concrète. Une mise hors de cause de la fibre de départ ne couvre pas la formation ultérieure d'un agent dangereux. La voie interfaciale démontrée à la section 10 fonde une question concrète de compatibilité et d'information. [11, 48, 49]

Conséquences pour les véhicules

Pour un véhicule dont la contamination par le Cr(VI) est établie, le constat relatif à l'agent dangereux est en même temps une propriété du véhicule et de ses composants. Il concerne la manipulation sûre, l'entretien, la réutilisation de composants et le coût d'une remise en état nécessaire. Il en résulte une question autonome quant à l'état du produit et à l'évaluation du véhicule. Les avertissements OEM et les constats de surface disponibles fournissent à cet égard un point de départ technique concret. [5, 22, 23]

Quelles conséquences sont à relever sur le véhicule

Domaine	Conséquence concrète sur le véhicule	Base vérifiable
Maintenance et manipulation	Des résidus accessibles au toucher ou susceptibles d'être libérés lors de travaux peuvent exiger des procédés de travail particuliers ; l'assistance en cas de panne et les opérations prévues pour le détenteur peuvent également être concernées.	Constats rapportés aux composants et aux activités, accessibilité, libération et instructions du fabricant. Une contamination du compartiment moteur est à relever séparément d'une contamination de l'habitacle.
Remise en état et récurrence	Décontamination, le cas échéant remplacement des éléments isolants contaminés et modification du contact réactif. Une contamination récurrente peut entraîner des dépenses répétées.	Étendue et coût des travaux ; contrôle d'efficacité et constats après une nouvelle période de fonctionnement thermique.
Coûts et valeur du véhicule	Coûts supplémentaires de maintenance et d'élimination, immobilisations et, le cas échéant, moins-value résiduelle malgré la remise en état.	Factures, restrictions d'usage documentées et évaluation par un expert. Une dépréciation forfaitaire déduite du seul nom de la substance n'est pas un chiffrage fiable.
Information des détenteurs et du marché	Information sur les versions concernées, les activités pertinentes, la protection et la remise en état ; transmission aux ateliers indépendants, aux acheteurs de véhicules d'occasion et aux exploitants de flottes.	Avertissements datés, leur diffusion effective ainsi que l'attribution des versions de véhicules et de composants concernées.

Un moteur techniquement en état de fonctionner ne répond pas définitivement à la question de la manipulation sûre et des conditions de maintenance usuelles. De même, un avertissement adressé aux ateliers agréés est à apprécier séparément de la question de savoir si les détenteurs, les réparateurs indépendants et les acquéreurs ultérieurs reçoivent l'information nécessaire. C'est l'activité concrète qui est déterminante : l'ouverture du capot, le remplissage ou l'assistance en cas de panne sont à examiner au regard des emplacements contaminés effectivement accessibles ; une exposition lors de chacune de ces activités n'est pas présupposée.

Une remise en état technique durable doit traiter ensemble la contamination existante et la cause d'une nouvelle formation possible. Si la combinaison de matériaux réactive subsiste, l'efficacité d'un nettoyage unique est à contrôler également après une remise en service. Le chromate peut ne se former que pendant l'utilisation, alors que la constellation de matériaux et de contacts déterminante à cet égard était déjà présente à la livraison. Pour l'attribution, l'état de série, la sollicitation thermique et les transformations ultérieures sont à consigner. [11, 22, 23, 26, 38]

Points d'appui juridiques dans l'UE

Voie d'examen	UE
Le véhicule comme objet de la vente	Dans la vente aux consommateurs, la sécurité attendue et l'aptitude à l'usage habituel font partie de la conformité au contrat. En cas de non-conformité, la réparation ou le remplacement et, sous les conditions respectives, la réduction du prix ou la résolution du contrat entrent en ligne de compte. [46]
Sécurité et mesures des autorités	Le règlement 2018/858 relatif aux véhicules régit les mesures correctives et l'information en cas de non-conformité ou de risque grave. Le classement d'un type de véhicule contaminé par du chromate exige une évaluation des risques concrète. [47]

Les règles de l'UE sur la vente aux consommateurs concernent les droits à l'encontre du vendeur après transposition nationale ; les articles 7, 10 et 13 de la directive 2019/771 relient les exigences de sécurité au moment de la livraison, à la période de responsabilité et aux mesures correctives. Pour les flottes d'entreprises et d'administrations, ce sont en revanche les contrats de marché ou d'achat respectifs et les règles nationales sur les défauts qui s'appliquent. Une cause matérielle située chez le fournisseur ne supprime pas l'appréciation du véhicule complet vendu. [46]

L'article 14 du règlement 2018/858 est un point de départ concret pour examiner les mesures nécessaires du fabricant. La question d'évaluation à traiter est de savoir si une constellation Cr(VI) concrète est à classer comme non-conformité ou comme risque grave. [47]

Un défaut de véhicule fondé et ses coûts de remise en état ouvrent une voie d'examen économique. Une maladie cancéreuse n'est pas une condition des droits à garantie en droit de la vente. Les mesures des autorités au titre du règlement 2018/858 se déterminent selon les conditions qu'il prévoit. [46, 47]

E. Résidus d'incinération : cendres, dépôts de chaudière, crémation

21. Cendres d'incinération et dépôts de chaudière

Le champ d'investigation comprend expressément les restes de cendres demeurant sur la grille, les cendres de fond, les résidus de la chambre de combustion et les dépôts sur des pièces chaudes alliées au chrome, en plus des cendres volantes, des cendres de filtre et des cendres de chaudière. Ces fractions constituent des matrices d'échantillon différentes. Le chrome peut provenir du produit incinéré ; en cas de contact avec des composants alliés au chrome, leur chimie de surface et de corrosion est en outre à prendre en compte. Le calcium disponible pour la réaction et les composantes alcalines peuvent provenir des résidus eux-mêmes. Une isolation comme source de calcium n'en est pas une condition. [11, 26, 31-34]

Paoletti 2002 : chromate de calcium dans l'incinération des déchets

Dès 2002, Paoletti a étudié au centre de recherche allemand Forschungszentrum Karlsruhe le comportement des métaux lourds formant des oxyanions dans l'incinération des ordures ménagères (thèse de l'université de Stuttgart, FZKA 6755). Des essais thermogravimétriques avec Cr_2O_3 et CaO sous air synthétique ont montré une augmentation rapide de la masse entre 500 et 850 °C. Après une heure à 850 °C, la diffraction des rayons X a mis en évidence du $CaCrO_4$ hexavalent. Sous atmosphère inerte, en revanche, seul du $Ca(CrO_2)_2$ trivalent s'est formé. [50]

Paoletti conclut que des chromates hexavalents ne peuvent se former que « si la pression partielle d'oxygène dans la chambre de combustion est suffisante ». Elle attend des réactions similaires avec le sodium, le potassium, le magnésium, le strontium et le baryum. Dans l'installation pilote TAMARA, le chrome dissous dans l'éluat DEV-S4 des cendres de grille se présentait, pour des excès d'air de 0,7 à 1,5, à 85 à 100 % sous forme de Cr(VI) ; pour un excès d'air de 0,6, la libération a diminué de près de deux ordres de grandeur. [50]

Vehlow, Paoletti, Seifert et Sirini ont présenté ces résultats en 2004 au WTERT Fall Meeting de la Columbia University à New York, y compris la thermogravimétrie sur Cr_2O_3 et CaO avec le produit $CaCrO_4$. La voie de formation était ainsi présentée depuis 2004 également au niveau professionnel international. [51]

Post-traitement thermique des cendres volantes

En 2015, Hu et al. décrivent l'oxydation du chrome lors de l'incinération des ordures ménagères par les métaux alcalins et alcalino-terreux. Le résumé de l'éditeur exploité souligne la disponibilité de CaO libre ; les composantes alcalines favorisent l'oxydation à des températures plus basses, en lien avec le refroidissement des fumées. Le calcium lié dans des sulfates ou des aluminosilicates est à considérer séparément quant à sa disponibilité pour la réaction. Le calcium total ou une teneur en oxyde indiquée comme CaO ne décrit donc pas encore à lui seul la conversion en chromate de calcium. [31]

Hu et al. (2013) examinaient déjà des cendres volantes provenant de cinq usines chinoises d'incinération des ordures ménagères et leur post-traitement thermique à 1 023-1 323 K, soit environ 750-1 050 °C, sous air ou sous azote. Le résumé de l'éditeur décrit la formation de $CaCrO_4$ à partir de Cr_2O_3 et de CaO lors du traitement thermique. Les cendres initialement examinées ne présentent en revanche que de faibles proportions de Cr(VI) et une faible lixiviation. Le résultat porte sur la modification due au post-traitement ; ce n'est pas une affirmation générale sur l'ensemble des cendres brutes. [32]

Gong et al. (2017) complètent cet aspect pour une cendre volante chinoise issue de l'épuration des fumées : après traitement thermique, la lixiviation du chrome augmente, tandis que celle de plusieurs autres métaux diminue. Les auteurs rattachent cette modification à des composés du Cr(VI) tels que $CaCrO_4$. Dans l'éluat, c'est le chrome total qui a été mesuré ; la voie du chromate de calcium est l'explication mécanistique des auteurs, non une preuve de spéciation du Cr(VI) propre à cette série de mesures. Une immobilisation améliorée de certains métaux ne permet donc aucune mise hors de cause générale pour le chrome. [33]

Cendres de grille lors de l'arrêt : évolution de la température et arrivée d'oxygène

Lors de l'arrêt pour maintenance, des restes de cendres demeurent sur une grille contenant du chrome ou sur des surfaces de pièces chaudes alliées au chrome, tandis que la température et l'atmosphère changent. Ce processus est à distinguer du transport de poussières volantes en fonctionnement.

Paoletti fournit les éléments de ce processus : l'oxyde de calcium est présent dans les ordures ménagères à hauteur d'environ 3 % ; le chromate de calcium se forme entre 500 et 850 °C et est à nouveau réduit en chromate trivalent au-dessus de 850 °C ; l'oxygène est une condition impérative. Lors de l'arrêt, la grille et les restes de cendres traversent précisément cette fenêtre de température, tandis que l'achèvement de la combustion et l'ouverture apportent de l'oxygène supplémentaire. Une formation supplémentaire de chromate ou un enrichissement dans les résidus restants est donc chimiquement à attendre. [50]

L'importance de l'atmosphère est également confirmée par Leaching behavior of heat-treated waste ash (2006) : les auteurs étudient des cendres de fond provenant de deux installations municipales japonaises à grille et font varier la température, la concentration en oxygène et la durée de traitement. Un traitement thermique plus pauvre en oxygène réduit le Cr(VI) lixiviable. [43]

Que cet effet soit connu ressort d'un procédé de traitement des cendres de bois qui n'admet délibérément le contact avec l'oxygène qu'en dessous de 200 °C afin d'empêcher la formation de Cr(VI) (Brill 2002, cité dans le rapport de 2019 de l'Agence fédérale allemande de l'environnement (UBA), p. 72). Le rapport envisage par ailleurs un post-traitement inerte des cendres de crémation. [44]

Des mesures comparatives directes sur des usines d'incinération des ordures ménagères avant et après l'arrêt ne sont pas disponibles à ce jour ; elles détermineraient l'ordre de grandeur, non le mécanisme.

Pour un problème concret de cendres ou de dépôts, il faut attribuer la fraction, l'installation, l'état de fonctionnement, le prélèvement, l'analyse du Cr(VI) et l'activité.

La mesure du chrome total, l'essai de lixiviation et la mesure individuelle des poussières répondent chacun à des questions différentes.

22. État des connaissances en Europe sur les résidus d'incinération

Région / source	Connaissance documentée	Portée pour l'évaluation
UE, 2019 : JRC-BREF [34]	Le document de référence pour l'incinération des déchets cite le chrome hexavalent parmi les métaux problématiques du point de vue de la lixiviation à partir des cendres de fond.	Référence environnementale explicite. Une évaluation de l'éluat et de l'environnement ne remplace pas l'appréciation de l'exposition aux poussières lors de la maintenance et de la révision.

Région / source	Connaissance documentée	Portée pour l'évaluation
Grande-Bretagne : HSE / cas pratique [30, 40]	Le HSE exige l'évaluation des risques liés aux cendres volantes et la prévention des cendres en suspension dans l'air. Le cas pratique rapporte du Cr(VI) dans des dépôts lors de travaux de révision.	Géographiquement l'Europe, juridiquement distinct de l'UE. Le cas décrit une activité concrète ; il ne constitue pas une étude représentative du régime de protection.

La littérature environnementale européenne nomme également le Cr(VI) expressément : dans le document de référence MTD (BREF) européen sur l'incinération des déchets (JRC-BREF) de 2019, il figure aux côtés du cuivre, du molybdène et du zinc comme substance problématique du point de vue de la lixiviation à partir des cendres de fond. Pour cette affirmation, la référence officiellement indexée correspondante a été exploitée, non l'intégralité du volumineux document. La perspective environnementale répond à d'autres questions que l'évaluation de la sécurité au travail liée à l'activité. [34]

La contribution Euro-Environmental est prise en compte : elle décrit des dépôts positifs en Cr(VI) dans les parcours de chaudière 2-6 d'un exploitant britannique non nommé et l'exposition lors de la maintenance et de la révision. Le refroidissement qui y est décrit concerne le cheminement des fumées à travers des parcours de chaudière successifs ; il n'est pas à lire comme une mesure de la nouvelle formation de chromate lors de l'arrêt progressif. Sont rapportés la surveillance de l'air et de l'ambiance, le biomonitoring, le traitement au sulfate de fer, l'aspiration et des zones cloisonnées. Des valeurs numériques avant et après font défaut ; la coloration jaune ne fournit aucune identification fiable du sel. Le cas atteste du traitement d'un risque concret lors d'une révision et complète la question distincte des résidus sur la grille. [30]

Observations de terrain sur le régime de protection

Des observations de terrain dans des usines européennes d'incinération des ordures ménagères montrent que la protection contre les contaminations par le chromate n'est au mieux que partiellement mise en œuvre. Aucun échantillonnage systématique d'installations, aucune série de mesures concrète et aucune appréciation d'exploitants individuels n'y sont associés.

La question d'investigation qui en résulte est de savoir si les évaluations des risques couvrent aussi la révision, l'ouverture de la chaudière, l'enlèvement de dépôts, le nettoyage, la manipulation des cendres et la dispersion. Seraient à relever la fraction de résidus concernée dans chaque cas, la spéciation analytique, la libération lors de l'opération de travail et les mesures de protection effectivement mises en œuvre. Cela peut être vérifié à l'aide des autorisations de travail, des rapports de mesure et des documents de révision existants.

23. Crémations et autres produits incinérés contenant du chrome

En 2019, en raison de restrictions juridiques, l'Agence fédérale allemande de l'environnement (UBA) a examiné 25 cendres modèles issues d'incinérations à vide de cercueils dans cinq fours crématoires. Toutes contenaient du Cr(VI). Lors de l'extraction avec du $CaCl_2$ 0,01 M, rapport cendres/solution 1:50, 17 % en moyenne du chrome total sont passés en solution ; le chrome dissous se présentait entièrement sous forme de Cr(VI). Le rapport décrit des apports de chrome liés au procédé et des risques pour les sols et les eaux souterraines. Le calcium se présente essentiellement sous forme de phosphate de calcium ; le calcium total n'est pas une preuve de CaO libre. [44]

Les émissions dans les gaz d'échappement, les cendres restantes et la libération ultérieure à partir d'une urne sont des voies d'exposition ou des voies environnementales distinctes. Un facteur d'émission ne décrit pas une concentration dans les cendres ; une analyse d'éluat ne décrit pas une contamination de l'air respiré. Le lien technique constitue néanmoins le même motif d'investigation : source de chrome, composantes basiques disponibles pour la réaction, évolution température-temps et atmosphère du procédé sont à relever ensemble. Quelle phase de chromate concrète se forme est élucidé par une analyse de spéciation et de phases appropriée.

La référence de Porto 10216/21130 correspond à Ferreira, Almeida et Pinto (1999) : Influence of temperature and holding time on hexavalent chromium formation during leather combustion. Les échantillons étudiés étaient des déchets de cuir. Selon le résumé de l'éditeur, le Cr(VI) était inférieur à 5 mg/kg avant la combustion ; dans les cendres se sont formées des quantités notables, dépendant de la température et du temps de maintien. La source complète la transformation thermique Cr(III)/Cr(VI) pour un produit incinéré contenant du chrome. Le résumé a été exploité ; l'étude ne concerne pas les crémations humaines. [45]

F. Santé, réglementation, questions ouvertes et conclusion

24. Conséquences sanitaires et écologiques des chromates

Les produits de réaction ne sont pas seulement pertinents sur le plan chimique. Les chromates de calcium et de sodium considérés ici sont cancérogènes ; le contact cutané, les effets cutanés locaux et une absorption possible sont à évaluer en plus de l'inhalation. En présence de blessures, certains composés du Cr(VI) peuvent provoquer de graves ulcérations cutanées. [2, 3]

Entrée dans la cellule : le cheval de Troie

Les chromates solubles dans l'eau ont la même structure que les ions sulfate et phosphate. La cellule les absorbe donc par ses voies de transport du sulfate et du phosphate, comme s'il s'agissait d'un anion nutritif ordinaire. Le chrome(VI) parvient ainsi sans entrave à l'intérieur de la cellule, alors que le chrome trivalent ne franchit guère la membrane cellulaire. [53]

Réduction à l'intérieur de la cellule : lésions de l'ADN et stress oxydatif

À l'intérieur de la cellule, le chrome(VI) est réduit progressivement par l'ascorbate, le glutathion et la cystéine, en passant par les états intermédiaires réactifs chrome(V) et chrome(IV), jusqu'au chrome(III) stable. Selon l'évaluation du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), il se forme à cette occasion des adduits chrome(III)-ADN, des pontages ADN-protéine et ADN-ADN, des cassures de brin d'ADN y compris des cassures double brin ainsi que des lésions oxydatives des bases. La forme prédominante est celle d'adduits ternaires, dans lesquels le chrome(III) relie l'ADN à de petites molécules telles que la cystéine, l'histidine, le glutathion ou l'ascorbate. Les produits intermédiaires réactifs de la réduction génèrent en outre un stress oxydatif. [53]

Dans le noyau cellulaire, c'est donc le chrome trivalent qui endommage l'ADN. L'assimilation répandue du chrome(III) à l'innocuité est de ce fait trop courte : ce qui est déterminant, c'est de savoir si le chrome parvient dans la cellule.

Base épidémiologique : les cohortes de l'industrie du chromate

L'effet cancérogène n'est pas seulement déduit d'essais sur animaux, il est établi chez des salariés de l'industrie du chromate. L'autorité américaine de sécurité au travail OSHA a fondé la valeur limite de 5 µg/m³ édictée en 2006 principalement sur deux cohortes de la production de chromate : les salariés de l'usine de Baltimore (Gibb et al. 2000 ; 2 357 hommes, suivis de 1950 à 1992) et ceux de l'usine de Painesville, Ohio (Luippold et al. 2003). Le CIRC classe les composés du chrome(VI) comme cancérogènes pour l'homme (groupe 1), avec un effet établi sur le poumon et des associations observées avec le cancer du nez et des sinus paranasaux. [53, 54]

Classification des chromates cibles

Selon la classification européenne harmonisée, le chromate de calcium est cancérogène de catégorie 1B (H350) ainsi que très toxique pour les organismes aquatiques avec effets à long terme (H400, H410). Le chromate de sodium est en outre classé comme mutagène, toxique pour la reproduction, sensibilisant cutané et corrosif. [3]

Contact cutané

Le contact cutané est à évaluer de manière autonome. Un contact prolongé peut conduire à une dermatite et à des ulcérations cutanées ; une partie des personnes exposées développe une sensibilisation allergique pour laquelle de faibles quantités suffisent déjà à déclencher de graves réactions cutanées. Les composants, isolants, outils et gants contaminés demeurent donc un danger même lorsque la mesure dans l'air ne présente rien de particulier. En cas de contact cutané avec des composés du chrome(VI), la TRGS 561 allemande exige des mesures de protection particulières. [19, 56]

Les chrome(VI) ne sont pas tous identiques : les différents chromates

Dans la pratique, on parle le plus souvent de « chrome(VI) » de manière globale. Cette généralisation nuit, parce qu'elle fait perdre de vue les différents chromates. La solubilité, le comportement particulaire, le temps de séjour dans le poumon et la classification diffèrent sensiblement. Dans un essai comparatif britannique sur le poumon du rat (Levy et al. 1986), des chromates peu solubles ont provoqué des tumeurs pulmonaires de façon significative : le chromate de strontium chez 43 et 62 animaux sur 99, le chromate de calcium comme témoin positif chez 25 sur 100, le chromate de zinc en revanche seulement chez 5 et 3 sur 100. [55]

Le chromate de calcium, produit principal de la formation in situ sur les isolants contenant du calcium et dans les cendres, compte ainsi parmi les chromates les plus actifs en expérimentation animale. Une évaluation qui ne retient que le « chrome(VI) » et ne nomme pas le composé masque ces différences.

Toutes les voies d'exposition sont à évaluer individuellement

L'article 3, alinéas 2 et 3, de la directive européenne 2004/37/CE exige l'évaluation des expositions possibles, y compris d'autres voies d'exposition, en particulier l'absorption dans ou à travers la peau. Pour ces activités, les voies suivantes sont à prendre en compte chacune de manière autonome, puis dans l'évaluation globale : [18]

- Inhalation : libération et inhalation de poussières de chromate lors de la maintenance, de l'ouverture, du démontage, du nettoyage ou de la manipulation ; les mesures d'air liées à l'activité évaluent cette voie.
- Voie dermique : contact avec des composants, isolants, outils, gants ou liquides contaminés ; la charge cutanée, une absorption possible et les effets locaux sont à évaluer séparément.
- Voie orale : transfert main-bouche par des mains, des objets, des aliments ou des boissons contaminés ; les déroulements de travail, l'hygiène et la dispersion sont à prendre en compte.

Une faible concentration dans l'air n'est pas un critère général de mise hors de cause. Elle ne répond pas aux questions du contact cutané, de l'absorption orale ou de la contamination des surfaces. À la section 3.3.4, la TRGS 561 allemande exige des mesures de protection particulières en cas de contact cutané avec des composés du Cr(VI). [19]

Environnement

Pour les composés cibles qui s'imposent ici, le danger pour l'environnement est en outre essentiel. Le chromate de calcium et le chromate de sodium sont à classer comme très toxiques pour les organismes aquatiques avec effets à long terme (H410). La formation de ces chromates concerne donc à la fois la sécurité au travail, la gestion des déchets et des résidus ainsi que la protection des eaux.

La circonstance que le produit de départ soit vendu comme isolant ne change rien à la pertinence, au regard des agents dangereux, des produits de réaction qui se forment sous une sollicitation thermique conforme à l'usage prévu.

L'ampleur que peut prendre la diffusion du chrome(VI) dans l'environnement est illustrée par le cas de Hinkley en Californie, connu par le film Erin Brockovich (2000) : entre 1952 et 1966, l'entreprise énergétique américaine PG&E a utilisé du chrome(VI) comme protection anticorrosion dans l'eau des tours de refroidissement d'une station de compression. Les eaux usées ont atteint la nappe phréatique par des bassins non étanches et ont contaminé une surface d'environ trois kilomètres de longueur et un kilomètre et demi de largeur. [57]

Approfondissement des risques sanitaires par inhalation : Speer et al. (2022)

Le travail américain présenté étudie le chromate de zinc particulaire ($ZnCrO_4$) sur des fibroblastes bronchiques humains non malins et immortalisés. L'exposition a été réalisée à 0,1, 0,2 et 0,3 µg/cm² pendant 24, 72 et 120 heures. Les auteurs relèvent les modifications de l'expression des microARN par séquençage et vérifient en outre certains résultats par qPCR. Le composé étudié est le chromate de zinc, et non le chromate de calcium ou de sodium. [39]

D'après l'analyse bioinformatique des cibles et des voies de signalisation, les microARN modifiés concernent des domaines centraux de la cancérogenèse : instabilité chromosomique, inflammation, stress oxydatif, contournement de la mort cellulaire et transformation cellulaire. Les modifications de l'expression ont été mesurées ; tous les effets géniques ou sur les voies de signalisation qui en sont déduits n'ont pas été vérifiés directement en tant que critères d'évaluation fonctionnels. Le travail approfondit ainsi la compréhension mécanistique de l'exposition particulaire au Cr(VI) sur des cellules pulmonaires humaines. [39]

Pour l'évaluation des poussières de chromate, il s'agit d'un lien biologique pertinent : les processus cellulaires de régulation et de réparation peuvent être touchés, même si un examen de routine ultérieur ne reconstitue aucune exposition antérieure. La dose en culture cellulaire exprimée en µg/cm² n'est toutefois pas une concentration atmosphérique en µg/m³ ; la série d'essais n'est ni une étude de cohorte par inhalation ni une mesure du risque de maladie sur une installation déterminée. La nature du composé, sa solubilité, le comportement des particules et la dose effectivement absorbée restent à prendre en compte lors de la transposition à d'autres chromates. [39]

Mesure de l'air, biosurveillance et effet à long terme sont des niveaux différents

Une mesure de l'air au poste de travail décrit l'activité et la période échantillonnées. Le chrome urinaire sert à évaluer une charge en chrome absorbée ; l'EH40 britannique indique la valeur guide biologique comme chrome dans l'urine et non comme mesure directe de spéciation du Cr(VI). Une telle valeur ne reconstitue de façon fiable ni une exposition remontant loin dans le temps ni des altérations génotoxiques déjà survenues. Les trois niveaux ne doivent donc pas être utilisés comme preuves de substitution les uns pour les autres. [39, 42]

Dans la protection du travail britannique, l'autorité britannique HSE exige elle aussi la prise en compte de toutes les voies d'absorption, y compris la peau et l'ingestion ; pour les substances cancérogènes, l'exposition doit être réduite autant qu'il est raisonnablement praticable. Le cas pratique britannique est donc présenté comme un élément de preuve d'application européenne à part entière, et non comme une preuve du droit de l'UE actuellement en vigueur ou d'une valeur limite européenne commune. [41]

25. Fabriqué industriellement ou formé in situ : un contrôle inégal

Dans la réglementation comme dans le débat public, les composés du chrome(VI) sont considérés presque exclusivement sous leur forme fabriquée industriellement, telle que le brevet Udy la décrit comme produit d'un procédé ciblé. Cette forme est soumise à des exigences strictes : la fabrication et l'utilisation sont soumises dans l'UE à l'obligation d'autorisation et, à l'avenir, à une restriction, les postes de travail sont surveillés, les émissions limitées, et les mélanges tels que les peintures et apprêts contenant du chromate portent un étiquetage de danger avec pictogramme et la mention de danger H350. [1, 3, 59]

La formation in situ reste en revanche largement ignorée ou se trouve occultée. Le chromate de calcium et le chromate de sodium se forment pendant l'exploitation conforme à la destination, sur les pièces chaudes, dans les isolants et dans les résidus d'incinération, sans qu'un fabricant les mette sur le marché, sans étiquetage et le plus souvent sans fiche de données de sécurité décrivant l'état après usage. Sont exposés les monteurs, les techniciens de service, les calorifugeurs, les mécaniciens automobiles, le personnel de révision et les opérateurs d'élimination des déchets, souvent sans le savoir. Les conséquences sanitaires sont les mêmes que pour la forme fabriquée industriellement : cancer du poumon, cancer du nez et des sinus paranasaux, ulcères cutanés et dermatite de contact allergique. S'y ajoute la contamination des sols et des eaux par les poussières, les cendres et les déchets. [53, 56]

Évolution réglementaire

L'Australie franchit déjà le pas vers la minimisation : à compter du 1er décembre 2026, l'autorité australienne Safe Work Australia ne publie plus de valeurs limites d'exposition professionnelle pour les cancérogènes génotoxiques sans seuil ; les composés du chrome(VI) en font expressément partie. La valeur limite est remplacée par l'obligation d'éliminer l'exposition ou de la minimiser autant qu'il est raisonnablement praticable (SFAIRP, comparable au principe ALARP). [58]

Dans l'UE, l'Agence européenne des produits chimiques ECHA a proposé en avril 2025 une restriction des substances du chrome(VI) destinée à remplacer la procédure d'autorisation actuelle. Seules certaines utilisations resteraient alors admissibles, sous des conditions strictes, avec des valeurs limites d'exposition professionnelle comprises entre 0,1 et 5 µg Cr(VI)/m³ selon l'utilisation ainsi que des limites d'émission pour l'air et l'eau ; toutes les autres utilisations seraient interdites. [59]

Ce qui est déterminant ici, c'est la notion large d'utilisation du règlement européen REACH. Selon l'article 3 point 24, « utilisation » désigne toute « opération de transformation, de formulation, de consommation, de stockage, de conservation, de traitement, de chargement dans des conteneurs, de transfert d'un conteneur à un autre, de mélange, de production d'un article ou tout autre usage ». Le seul stockage d'une isolation thermique démontée et contaminée par des poussières de chromate peut dès lors constituer une utilisation ; la réutilisation d'une telle isolation en est une à plus forte raison. Si elle ne relève pas des utilisations autorisées à l'avenir, elle est interdite. [60]

Le contrôle inégal dans la pratique : la comparaison avec l'amiante

L'inégalité de traitement ne s'arrête pas à la réglementation, elle se poursuit dans la pratique. Le chrome(VI) fabriqué industriellement est utilisé dans des installations fermées, soumis à l'obligation d'autorisation, étiqueté, livré avec une fiche de données de sécurité et manipulé par du personnel instruit. Le chrome(VI) formé in situ se rencontre en revanche sous forme de dépôt sur une surface. Il n'a ni fabricant, ni fournisseur, ni étiquetage, ni fiche de données de sécurité. Il sort ainsi de la catégorie des substances dangereuses pour tomber dans celle de la salissure. Il est traité en conséquence, avec chiffon, brosse, aspirateur, air comprimé et produits en aérosol, par le personnel de maintenance et de nettoyage présent sur place. Le terme répandu de « neutralisation » provient lui aussi de cet univers de langage et non du droit des substances dangereuses.

La comparaison avec l'amiante met la lacune en évidence. Les deux substances sont classées comme cancérogènes pour l'homme, et dans les deux cas le danger ne naît pas à l'état installé, mais lorsque de la poussière est libérée lors de la maintenance, du démontage ou du nettoyage. Pour l'amiante, il en est résulté un régime procédural complet. La TRGS 519 allemande dans sa version du 28 février 2025 exige, à son point 3.2, que les travaux de démolition, d'assainissement et d'entretien soient « déclarés à l'autorité compétente au plus tard 7 jours avant le début des travaux ». Le point 2.7 régit la qualification et son justificatif, les points 5.1 à 5.3 la personne responsable, le responsable de la surveillance et le personnel spécialisé. Pour les produits d'amiante faiblement liés, les points 14.1 à 14.3 exigent le confinement et des mesures de ventilation ainsi que des sas pour les personnes et les matériaux [97].

Pour les chromates formés in situ, rien de tout cela n'existe. Il n'y a pas d'obligation de déclaration avant le début des travaux, pas de qualification propre, pas de responsable de la surveillance prescrit, pas d'installation noir-blanc et pas d'entreprises spécialisées agréées. La TRGS 561 allemande exige un équipement de protection individuelle, un travail à faible émission de poussière et le contrôle de substitution (section 6), mais n'instaure aucun régime procédural avec déclaration, justificatif de qualification et confinement. Personne n'aurait l'idée de traiter soi-même une plaque contenant de l'amiante avec un aérosol puis de l'essuyer. Sur une pièce chaude contaminée par du chromate, c'est précisément la pratique courante.

Sur deux points, la classification va même à l'encontre de cette inégalité de traitement. Le chromate de sodium porte trois mentions de danger relatives à la peau, nocif par contact cutané (H312), corrosif (H314) et sensibilisant cutané (H317) [65] ; l'amiante n'en porte aucune dans la classification harmonisée. Le chromate de calcium et le chromate de sodium sont en outre classés comme très toxiques pour les organismes aquatiques avec effets à long terme (H400, H410) [64, 65], alors que la classification harmonisée de l'amiante, avec Carc. 1A (H350) et STOT RE 1 (H372), ne fait état d'aucun danger pour l'environnement [98]. Les chromates sont ainsi classés plus sévèrement, dans la dimension dermique comme dans la dimension écologique, que la substance à laquelle s'applique le régime procédural complet.

L'appréciation du contact cutané conduit ici directement au rang le plus élevé. La TRGS 401 allemande dans sa version d'octobre 2022, modifiée pour la dernière fois le 19 septembre 2024, classe le danger selon le type de contact au tableau 2 de sa section 4.2. Pour la ligne « résorption cutanée accompagnée simultanément des propriétés dangereuses mentionnées en regard », les substances cancérogènes de catégorie 1A ou 1B (H350) relèvent, pour tout type de contact, de la classe « h », soit danger élevé, sans seuil de durée ou de surface. Les propriétés sensibilisantes pour la peau seules (H317) ne conduisent à cette classification qu'à partir de plus de 15 minutes de contact par journée de travail et en cas de contact sur une grande surface, et en outre, selon l'alinéa 4, lorsque l'expérience pratique montre une sensibilisation chez un nombre important de salariés [99].

Les composés du chrome(VI) remplissent les deux critères, et la mention est attribuée officiellement. Selon sa section 3.2.3 alinéa 2, la TRGS 401 reprend des TRGS 900, 905 et 910 la mention « H » désignant les substances à résorption cutanée ; si une substance n'y figure pas, la liste des valeurs MAK et BAT de la Deutsche Forschungsgemeinschaft peut être utilisée comme source d'information complémentaire [99]. À l'annexe 1 de la TRGS 910, les composés du chrome(VI) figurent avec 1 µg/m³ pour la fraction inhalable et un facteur de dépassement de 8, avec la mention « voir TRGS 561 », mais sans mention cutanée [101]. La liste des valeurs MAK et BAT 2026, communication 62, indique en revanche les deux mentions sous « Chrom(VI)-Verbindungen (einatembare Fraktion) » : résorption cutanée « H » et sensibilisation « Sh », ainsi que la catégorie de cancérogénicité 1 et la catégorie de mutagénicité sur les cellules germinales 2. Seuls les chromates de baryum, de plomb, de strontium et de zinc sont expressément exclus de la mention H, et seuls les chromates de baryum et de plomb de la mention Sh. Le chromate de calcium et le chromate de sodium, les composés traités ici, ne relèvent d'aucune de ces exceptions [102].

La classification du contact cutané est ainsi sans ambiguïté. Un composé qui, selon la liste des valeurs MAK et BAT, présente une résorption cutanée et appartient en même temps à la catégorie de cancérogénicité 1 relève, au tableau 2 de la TRGS 401, de la ligne « résorption cutanée accompagnée simultanément des propriétés dangereuses mentionnées en regard » et doit y être classé, pour tout type de contact, comme danger élevé, indépendamment de la durée et de la surface [99]. La mention Sh supplémentaire et la classification harmonisée sensibilisation cutanée 1, H317, viennent s'y ajouter ; l'institut de sécurité au travail de l'assurance accidents légale allemande indique pour les composés du chrome(VI) les voies d'absorption « par inhalation, par résorption cutanée » [100]. Pour l'amiante, il n'existe pas d'évaluation cutanée comparable, parce que la classification harmonisée n'y comporte aucune mention de danger relative à la peau.

La question se pose dès lors de savoir ce qui justifie la différence de traitement. Le classement comme cancérogène existe pour les deux groupes de substances, le mécanisme de libération par la poussière lors de la maintenance et du démontage est le même, et pour le chromate de calcium l'effet est documenté en expérimentation animale (section 24). La différence ne tient pas à la substance, mais au fait que l'une a été livrée comme produit et que l'autre s'est formée en exploitation.

Obligations avant le début des travaux : investigation, évaluation et interdiction de commencer

Dans les espaces juridiques examinés ici, les obligations avant le début des travaux sont pour l'essentiel formulées sans référence à une substance déterminée. Le règlement allemand sur les substances dangereuses (GefStoffV) oblige l'employeur, au paragraphe 6 alinéa 2a, à examiner les informations qui lui ont été transmises en application du paragraphe 5a alinéa 1 afin de déterminer si, lors des activités, des substances dangereuses peuvent être libérées par l'ouvrage ou l'installation technique et mettre en danger la santé des salariés. Si les indications du donneur d'ordre ne suffisent pas, il doit procéder lui-même à cet examen conformément à l'alinéa 2b et recourir à une expertise externe lorsqu'il ne dispose pas des connaissances nécessaires, en particulier lorsqu'une investigation technique devient nécessaire. Si une investigation technique est nécessaire pour réaliser l'évaluation des risques et définir les mesures de protection, elle constitue, selon l'alinéa 2c, une condition de l'exécution des activités. Le paragraphe 7 alinéa 1 interdit d'entreprendre l'activité avant que l'évaluation des risques n'ait été réalisée et que les mesures de protection nécessaires n'aient été prises, et le paragraphe 6 alinéa 8 phrase 1 exige la documentation pour la première fois avant le début de l'activité, indépendamment du nombre de salariés. Le terme employé dans ces alinéas est celui de substances dangereuses ; l'amiante n'y est pas mentionné. [120]

L'indication de l'année de construction figure à un autre endroit. Le paragraphe 5a alinéa 2 du règlement allemand sur les substances dangereuses oblige le donneur d'ordre, aux fins de déterminer si de l'amiante est présent, à communiquer la date du début des travaux de construction lorsque l'année de construction se situe entre 1993 et 1996, et sinon l'année de construction. Pour les chromates formés in situ, cette indication n'a aucune valeur informative, parce que le composé n'est pas introduit lors de la construction mais se forme en exploitation. Une installation érigée en 2024 avec des pièces chaudes alliées au chrome et une isolation contenant du calcium relève du même libellé qu'un ouvrage ancien. [120]

L'Arbeidsomstandighedenbesluit néerlandais exige à son article 4.2 alinéa 1 l'évaluation de la nature, du degré et de la durée de l'exposition dans le cadre de la Risico-Inventarisatie en -Evaluatie, même si de telles activités ne sont pas exercées actuellement. L'alinéa 3 exige la détermination du niveau d'exposition, l'alinéa 7 la comparaison avec la valeur limite fixée pour la substance et l'alinéa 8 le réexamen dès que de nouvelles activités impliquant des substances dangereuses sont entreprises. L'article 4.1b alinéa 2 cite cette évaluation parmi les conditions auxquelles l'obligation générale de protection est réputée satisfaite. L'article 4.2 ne contient pas d'interdiction expresse de commencer avant l'évaluation. Celle-ci figure, en lien avec l'amiante, à l'article 4.54a alinéa 1, selon lequel la présence d'amiante doit être inventoriée de manière complète avant que ne débutent la démolition ou le démontage, l'enlèvement ou le nettoyage après un incident, inventaire réalisé par une entreprise titulaire d'un certificat d'inventorisation de l'amiante. [121]

Au Royaume-Uni, l'interdiction est formulée sans référence à une substance déterminée à la Regulation 6(1) des Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 : « An employer shall not carry out work which is liable to expose any employees to any substance hazardous to health », tant qu'il n'existe pas de « suitable and sufficient assessment of the risk created by that work » et que les étapes qui en découlent ne sont pas mises en œuvre. La Regulation 6(2) énumère ce que l'évaluation doit prendre en compte, notamment les indications du fournisseur, y compris la fiche de données de sécurité, le niveau, la nature et la durée de l'exposition ainsi que les activités telles que l'entretien, susceptibles de conduire à une exposition élevée. En lien avec l'amiante s'y ajoute la Regulation 5 des Control of Asbestos Regulations 2012, selon laquelle un employeur ne peut exécuter des travaux de démolition, d'entretien ou d'autres travaux qui exposent des salariés à l'amiante ou sont susceptibles de les y exposer, s'il n'a pas soit réalisé une « suitable and sufficient assessment » de la présence, de la nature et de l'état de l'amiante, soit, en cas de doute, présumé sa présence et appliqué la réglementation. [122, 123]

Aux États-Unis, 29 CFR 1926.1126(d)(1) oblige tout employeur dont le lieu de travail ou le procédé de travail relève du standard à déterminer les moyennes pondérées sur huit heures de poste pour chaque salarié exposé au chrome(VI). Selon (d)(2), cela se fait par une mesure initiale comportant un nombre suffisant de prélèvements d'air individuels par poste, groupe d'activités et zone de travail, selon (d)(3) par une combinaison de données de mesure, de données historiques ou d'objective data. Selon (d)(2)(vi), des mesures supplémentaires doivent être effectuées lorsque le procédé, les matières premières, l'équipement, le personnel, les méthodes de travail ou les mesures de protection changent de telle manière que des expositions nouvelles ou supplémentaires peuvent apparaître. Le standard chrome(VI) ne contient pas d'interdiction de commencer sur le modèle du paragraphe 7 alinéa 1 allemand ou de la Regulation 6(1) britannique. L'équivalent structurel figure dans le standard amiante : 29 CFR 1926.1101(k)(2)(i) oblige les propriétaires de bâtiments et d'installations à établir la présence, l'emplacement et la quantité des matériaux contenant de l'amiante et de ceux présumés en contenir, et la définition au point (b) présume une teneur en amiante pour les isolations thermiques ainsi que pour les matériaux de surface appliqués dans les bâtiments dont l'année de construction n'est pas postérieure à 1980, tant que cette présomption n'est pas réfutée conformément à (k)(5). L'initial exposure assessment selon (f)(2)(i) doit être réalisée par une competent person immédiatement avant ou au début des travaux. [124, 125]

Pour le cas d'application traité ici, la TRGS 561 allemande rattache le régime de protection, à sa section 5.9.3 alinéa 5, aux activités sur des composants industriels « présentant une charge en chrome(VI) ou pour lesquels celle-ci ne peut être exclue ». L'obligation naît donc avant le constat. L'absence de mesure ne fonde aucune exclusion, et l'investigation est la voie par laquelle une exclusion pourrait seulement être établie. [19]

En appréciation : deux des quatre espaces juridiques contiennent l'interdiction de commencer avant l'évaluation sous une forme indépendante de la substance, l'Allemagne par le paragraphe 7 alinéa 1 du règlement sur les substances dangereuses et le Royaume-Uni par la Regulation 6(1) COSHH. Aux Pays-Bas et aux États-Unis, l'obligation préalable réside dans la règle générale sur les substances dangereuses, en tant qu'obligation d'évaluation et de constatation, tandis que l'interdiction anticipée dans le temps et la règle de présomption figurent dans le régime amiante. L'inégalité de traitement décrite au sous-chapitre précédent se retrouve ainsi également dans la structure normative, et ce comme une différence de profondeur procédurale, non comme une différence de principe.

26. Remèdes supposés : neutralisation, WD-40 et le chrome(III) « inoffensif »

« Neutralisation »

Plusieurs des fabricants cités dans cette analyse recommandent de « neutraliser » les résidus de chrome(VI) et présentent cela comme une mesure de protection du travail suffisante. Le terme suggère que le chrome(VI) pourrait être rendu inoffensif. Il s'agit en réalité d'une réaction d'oxydoréduction : un réducteur transforme le chrome(VI) en chrome(III). Cela ne réussit de manière quasi complète que dans des conditions favorables, c'est-à-dire avec un contact suffisant entre le réducteur et le chromate, une quantité, une humidité et un temps d'action suffisants. Sur des isolants poreux, dans les interstices entre fibres, sous des dépôts et sur des surfaces chaudes ou sèches, ces conditions sont rarement réunies dans la pratique. [22, 25]

[redacted] constate lui-même qu'une pièce n'est plus considérée comme neutralisée après une nouvelle sollicitation thermique (« If the component part is subjected to thermal stress again, it is no longer considered neutralized. »). La cause subsiste : tant que le chrome, le calcium ou le sodium, l'oxygène et la température se rencontrent, le chromate se forme à nouveau au cycle d'exploitation suivant. [11, 22, 50]

Le traitement du chrome(VI) par un réducteur constitue en outre lui-même une utilisation au sens de l'article 3 point 24 REACH (« traitement »). Le texte juridique définitif déterminera s'il relève de la restriction prévue au niveau de l'UE. [59, 60]

Le terme est déjà matériellement inexact. Une neutralisation au sens chimique est la réaction d'un acide avec une base donnant un sel et de l'eau, soit un déplacement du pH. Le chromate n'est pas un problème acide-base. Le passage du chrome(VI) au chrome(III) est une réaction d'oxydoréduction, qui suppose un réducteur approprié, une plage de pH appropriée, un temps de contact suffisant et une preuve d'efficacité.

L'instruction de travail « Instructie voorkomen blootstelling aan Chroom(VI) » de Vattenfall Generation NL, première version du 18 février 2019, dernière mise à jour complète le 29 avril 2024, montre à quoi ressemble l'application pratique. Elle décrit correctement la voie de formation : le chromate de calcium se formerait lorsqu'un métal de base contenant du chrome entre en contact avec du calcium et un oxydant à des températures voisines ou supérieures à 350 °C ; comme sources de calcium identifiées à ce jour, elle cite certaines pâtes anti-seize et des matériaux isolants contenant du calcium. Pour le traitement, elle prévoit deux produits, le Siemens Umwandler Spray et une solution d'acide ascorbique préparée sur place, tous deux de durée de conservation limitée et avec une date de préparation à indiquer de façon visible, deux ans pour la poudre, une semaine pour la solution humide. La surface est pulvérisée ou humidifiée, la solution doit être suffisamment collante ou maintenue durablement humide, parce que la transformation peut durer quelques minutes, après quoi le nettoyage se fait avec un chiffon. [115]

À la différence de l'huile dégrippante traitée plus loin, l'acide ascorbique est un véritable réducteur. L'objection ne porte donc pas sur la substance, mais sur les conditions. Les preuves d'efficacité pour la réduction du chrome(VI) proviennent de systèmes liquide-liquide. Il s'agit ici d'un traitement liquide-sec d'une surface ouverte, qui porte régulièrement des résidus d'huile et de graisse dans l'environnement des turbines et des moteurs. Une conversion complète n'est pas à attendre dans ces conditions, et pour les isolations haute température il n'existe aucune preuve d'efficacité.

Le contrôle du résultat repose entièrement sur le test rapide colorimétrique, dans l'instruction le kit de test TK11 de MATinspired. S'il est négatif, aucune autre mesure et aucun équipement de protection ne sont nécessaires selon le libellé. Toute opération de nettoyage doit s'achever sur un test négatif, et les outils comme les masques complets utilisés retournent eux aussi au magasin après un test négatif. L'instruction considère les mesures d'air comme superflues en règle générale. La portée d'un tel test est montrée par l'étude de terrain française : sur le turbocompresseur, l'analyse de laboratoire a mis en évidence 869 ng de Cr(VI), alors que le test rapide colorimétrique au même endroit s'est révélé négatif (section 19). [115]

Selon la même instruction, les matelas isolants sont brumisés d'acide ascorbique puis remis en place ; le reste du matériau isolant est brumisé et éliminé comme déchet d'exploitation. Le partenaire de réaction revient ainsi sur la pièce chaude avec le matériau, et au démarrage suivant toutes les conditions de formation sont de nouveau réunies. Pour l'amiante, il n'existe aucune instruction prescrivant de traiter des fibres et de remonter ensuite le matériau. [115]

Pour le matériel de GE, l'acide ascorbique est suspendu selon un courrier du fabricant, au motif qu'il influencerait négativement la microstructure du matériau ; le nettoyage avec du WD-40 y est prescrit à la place. [115]

La conférence du 6 novembre 2025 et un certificat qui énonce ses limites

Lors de la manifestation « Chroom-6 verbindingen onder thermische isolatie » d'iTanks et du Chroom 6 Informatie Kennis Centrum, le 6 novembre 2025, six prestataires ont présenté des pitches : Insulcon, Kavarmat, OOI, Ecopoint, Sherwin Williams et Econtras. Ecopoint a présenté le « Chrome-6 Neutralizer », selon sa propre description une solution d'acides qui réduit le Cr(VI) en Cr(III), prête à l'emploi et conservable au moins deux ans. Les conditions de formation sont correctement indiquées sur la diapositive : le chrome dans l'acier inoxydable, une température supérieure à 250 °C, une isolation contenant du calcium, à côté de cela le potassium, le sodium ou le magnésium, et en outre l'humidité et la condensation. [116]

Le certificat que SEEF B.V. a établi en août 2025 pour le compte d'Eco-Point International BV sur le Chrome-VI Neutralizer (PR269) est correct dans sa conception, parce qu'il n'affirme pas plus que ce qui a été vérifié. L'efficacité vaut selon lui « mits deze verbindingen oplosbaar zijn in de neutralizer-oplossing », donc seulement dans la mesure où les composés sont solubles dans la solution. Le produit vieillit et perd de son effet, la surface traitée doit être maintenue humide pendant au moins 15 minutes et être suffisamment refroidie, et si le test reste ensuite positif, le traitement était insuffisant et doit être répété. Sur le contrôle, le certificat précise : « Een negatieve uitslag is echter niet betrouwbaar », un résultat de swab négatif n'est pas fiable ; une analyse fiable est alors recommandée, SEEF TK01 ou analyse de laboratoire. Et plus loin : « Het is echter geen garantie dat blootstelling volledig wordt voorkomen », le produit serait « een hulpmiddel binnen een veiligheidsstrategie en geen oplossing die alle risico's zelfstandig elimineert ». Un document qui expose à ce point sa propre portée est l'étalon auquel se mesure ce qu'on en fait. [116]

Ce que cela devient sur la diapositive

La diapositive de pitch reprend quatre points : neutralisation efficace, 15 minutes de temps d'action sur un support refroidi, réduction significative de la probabilité d'exposition et moyen auxiliaire au sein d'une stratégie de sécurité. Ne sont pas reprises la condition de solubilité, le vieillissement, la répétition en cas de test positif et la phrase sur le manque de fiabilité du résultat de test négatif. La diapositive de clôture fait au contraire de la publicité avec « Bewezen actieve RTU vloeistof » et « Meten is weten! ». La mesure devient ainsi un argument, alors qu'elle est, dans le certificat, l'endroit où l'on met en garde contre le résultat négatif. Le nom de produit « Neutralizer » porte le même malentendu dans son titre, car ce qui est décrit est une solution acide qui réduit. [116]

L'instruction et sa date

L'instruction de travail de Vattenfall Generation NL est plus ancienne que ces documents. Selon son propre historique de versions, l'acide ascorbique y a été ajouté le 11 juin 2019, le nettoyage avec du WD-40 pour le matériel de GE le 28 octobre 2022, et la dernière mise à jour complète date du 29 avril 2024. Elle ne pouvait connaître ni le certificat d'août 2025 ni l'étude sur le WD-40 de septembre 2026. Ce qui peut être apprécié n'est donc pas sa genèse, mais sa persistance. Lors de la manifestation du 6 novembre 2025, trois mois après le certificat, Econtras, une entreprise d'isolation de l'Isolatiebedrijf C.J. van Waas BV, a présenté la même instruction inchangée sous le titre « Reinigen met Ascorbinezuur », y compris l'indication qu'il s'agit d'une solution d'acide ascorbique fabriquée par Vattenfall elle-même, et y compris la phrase selon laquelle aucune autre mesure n'est nécessaire en cas de résultat de test négatif. [115, 116]

Le même laboratoire, deux documents

Pour l'huile dégrippante prescrite dans l'instruction, le même laboratoire qui a certifié au Neutralizer une efficacité sous conditions a réfuté tout effet réducteur : 96,8 pour cent de taux de récupération pour du chrome(VI) déjà dissous, aucune relation dose-effet en extraction complète et 5,8 pour cent de taux de récupération sur le solide comme artefact de solubilité. Les deux constats ne se contredisent pas, ils séparent ce qui est efficace de ce qui ne l'est pas. Dans l'instruction de travail, les deux produits figurent côte à côte comme méthodes de nettoyage équivalentes.

La conséquence pour la protection du travail

Dans cette pratique, la dispense de mesures de protection repose sur un procédé dont le laboratoire d'essai déclare par écrit que le résultat négatif n'est pas fiable. Ce constat porte sur le procédé de test et non sur un produit particulier. L'étude de terrain française va dans le même sens, avec 869 ng de Cr(VI) à l'analyse de laboratoire sur le turbocompresseur contre un résultat de test rapide négatif au même endroit (section 19). Une mesure dont le contrôle de résultat peut être faussement négatif ne satisfait pas à l'obligation du paragraphe 7 alinéa 9 du règlement allemand sur les substances dangereuses de contrôler l'efficacité par des méthodes appropriées là où il n'existe pas de valeurs limites. En pratique, elle conduit à ce que l'équipement de protection soit retiré, que les outils et la protection respiratoire retournent dans le stock commun et que du matériau isolant brumisé soit remonté. Pour l'amiante, personne ne libérerait une zone noire sur la base d'un test colorimétrique rapide.

Le certificat est le document le plus précis de cette chaîne et le seul qui énonce ses propres limites ; aucune critique ne s'adresse à l'organisme d'essai, au contraire, il a exposé complètement le constat et sa portée. Ce qu'il en advient dans la circulation industrielle est autre chose : sous des logos connus, des attestations correctes sont réduites à quatre points publicitaires, les conditions disparaissent, et le lecteur non spécialiste se voit suggérer une sécurité que l'attestation n'accorde expressément pas. L'effet des instructions techniques des grands groupes porte le plus loin, car elles présentent la manipulation d'un composé cancérogène et dangereux pour les eaux comme une étape de travail normale, avec flacon pulvérisateur, chiffon, bandelette de test et réutilisation du matériau ensuite.

Le récit de la réduction en dehors des exploitants

La caisse professionnelle allemande du bâtiment indique sur sa page « Chrom(VI)-Verbindungen an Edelstahl » que « des liants de fibres réducteurs de chromate peuvent être employés », et : « Ceux-ci réduisent le chromate en composés du chrome(III) non critiques et lient les fibres. » La seule réserve qui suit est que l'application d'un réducteur peut « le cas échéant avoir des influences négatives sur les matériaux traités » et doit être convenue avec le donneur d'ordre. Une preuve d'efficacité, la présence d'huiles et de graisses et l'obligation, au paragraphe 7 alinéa 9 du règlement allemand sur les substances dangereuses, de contrôler l'efficacité par des méthodes appropriées là où il n'existe pas de valeurs limites, n'y figurent pas. Le classement du produit de réaction comme non critique reste en outre sans lien avec les constats traités plus loin : la mention de sensibilisation Sh que la liste des valeurs MAK et BAT 2026 indique pour les composés solubles du chrome(III), l'évaluation de l'agence française Anses de 2021 et la mobilisation du chrome(III) lié aux fibres sous forme de chrome(VI) selon Walter et al. 2022. La même page constate à un autre endroit que le mécanisme chimique de formation « n'est actuellement pas encore entièrement élucidé », et désigne dans le même texte les isolants thermiques contenant des métaux alcalins et alcalino-terreux comme facteur favorisant. [117]

Le ciment montre comment une réduction documentée est organisée. L'entrée 47 de l'annexe XVII du règlement REACH limite le chrome(VI) soluble dans le ciment à 0,0002 pour cent, soit 2 ppm de la masse sèche. Ce résultat est obtenu par ajout d'un réducteur, majoritairement du sulfate de fer(II), stœchiométriquement 3,22 mg de Fe(II) par mg de Cr(VI), surdosé en pratique de huit à vingt fois, mélangé de façon homogène, avec une réaction qui ne démarre qu'avec l'eau de gâchage, et contrôlé selon EN 196-10. L'effet diminue au stockage, l'humidité et l'oxygène accélèrent ce phénomène. Ce qui en est transposé, c'est la pulvérisation d'une solution sur une surface huileuse dans la salle des machines, sans contrôle de dosage, sans procédé d'essai normalisé et avec un test rapide en guise de réception. [118, 119]

La même caisse professionnelle, deux présentations

L'instruction d'exploitation « Ausbau chromatbelasteter Dämmstoffe » prévue au paragraphe 14 du règlement allemand sur les substances dangereuses, accessible par le système d'information sur les substances dangereuses WINGIS de la caisse professionnelle allemande du bâtiment, classe l'activité par la phrase « Ces activités ou procédés sont cancérogènes. », porte la mention d'avertissement Danger et constate : « Les composés du chrome(VI) peuvent provoquer le cancer ! » Elle prescrit la délimitation des zones de travail et d'assainissement avec panneau d'avertissement, des procédés et appareils de travail à faible émission de poussière, des travaux uniquement avec aspiration, des travaux avec apport d'air frais, des dépoussiéreurs et aspirateurs industriels de la classe de poussière H, le contrôle permanent du fonctionnement et de la puissance d'aspiration, un recouvrement par film en cas de possibilités de nettoyage insuffisantes, la découpe du matériau exclusivement au couteau, aux ciseaux ou à la scie à main, la collecte immédiate des déchets, des vestiaires séparés et un local de lavage avec douches comme installation noir-blanc, la collecte des combinaisons jetables à la fin du poste et la phrase « Ne pas réutiliser les produits en laine minérale démontés. » En matière d'équipement de protection individuelle, elle exige des lunettes-masque pour les travaux au-dessus de la tête et en cas de forte production de poussière, des gants de protection en cuir exempt de chromate ou des gants de coton imprégnés de nitrile, une combinaison jetable de type 5 et une protection respiratoire avec la consigne « Toujours porter une protection respiratoire. », réalisée sous forme de filtre à particules P3 sur demi-masque ou quart de masque, ou de demi-masque filtrant les particules FFP3. Dans cette énumération, « Utiliser des liants de fibres réducteurs de chromate. » figure en deuxième position, entre le zonage et les procédés de travail à faible émission de poussière. [126]

Par rapport à la TRGS 561 allemande, l'instruction d'exploitation va plus loin sur plusieurs points. La section 5.9.3 alinéa 5 admet pour les activités de courte durée une protection respiratoire de classe FFP2, l'instruction d'exploitation ne connaît pas de niveau pour les courtes durées et exige en permanence P3 ou FFP3. La classe de poussière H, l'apport d'air frais et l'installation noir-blanc ne sont pas mentionnés par la TRGS à cet endroit. Pour la protection des yeux, l'instruction d'exploitation reste en dessous, parce que la TRGS l'exige sans restriction, tandis que l'instruction d'exploitation la lie aux travaux au-dessus de la tête et à une forte production de poussière. Le liant de fibres réducteur de chromate n'apparaît à aucun endroit de la TRGS 561 ; les notions de liant de fibres, de liant et de neutralisation y font entièrement défaut. [126, 19]

La page d'information publiquement accessible de la même caisse professionnelle ne reprend aucun point de ce catalogue. Elle décrit la voie de formation, nomme comme facteurs favorisants les aciers à haute teneur en chrome, l'oxygène, des températures d'environ 350 à 800 °C et des isolants thermiques contenant des alcalins ou des alcalino-terreux, désigne des dépôts jaunâtres composés majoritairement de chromate de calcium comme constat le plus fréquent et propose comme seule action le liant de fibres, avec les phrases selon lesquelles celui-ci réduit le chromate « en composés du chrome(III) non critiques » et lie les fibres, et : « La charge s'en trouve abaissée. » La seule réserve qui suit est l'indication d'influences négatives possibles sur les matériaux traités et de la concertation avec le donneur d'ordre. La protection respiratoire, le zonage, l'aspiration, l'installation noir-blanc, l'interdiction de réutilisation, l'évaluation des risques, la substitution et la TRGS 561 n'apparaissent pas sur la page. Pour les mesures de protection, elle renvoie à la caisse professionnelle allemande Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, compétente au premier chef. [117, 126]

Le même raccourci apparaît du côté industriel, avec le même champ lexical. La page produit en langue allemande d'Eco-Point International BV consacrée au Chrome-6 Neutralizer décrit le produit comme un liquide de neutralisation acide et biodégradable « qui transforme le chrome-6 nocif en chrome-3 inoffensif », et indique parmi les avantages particuliers : « Le chrome-6 est transformé en chrome-3, donc d'une substance cancérogène en une substance inoffensive. » La formulation « le chrome-3 inoffensif » figure à deux autres endroits de la page. Sur le temps d'action, l'équipement de protection, l'évaluation des risques et l'élimination, la page ne contient rien. Le contrôle est évoqué par la phrase selon laquelle le Chrome-6-Neutralizer a été testé et certifié par le laboratoire indépendant SEEF ; les conditions que ce certificat nomme expressément n'y figurent pas. La caisse professionnelle allemande du bâtiment avec « des composés du chrome(III) non critiques » et le fournisseur avec « chrome-3 inoffensif » énoncent ainsi la même chose. L'état des constats sur le chrome(III) se trouve à la section 27, avec la mention de sensibilisation Sh pour les composés solubles du chrome(III), l'évaluation de l'agence française Anses de 2021 et la mobilisation du chrome(III) lié aux fibres sous forme de chrome(VI) selon Walter et al. 2022. [127, 116]

En appréciation : dans la présentation publique, un régime de protection complet devient une mesure unique, assortie d'une affirmation d'effet qui ne figure ni dans l'instruction d'exploitation ni dans la TRGS 561 et pour laquelle aucune preuve d'efficacité n'est exigée. Une entreprise qui cherche à connaître ses obligations rencontre d'abord cette présentation, parce qu'elle constitue l'entrée publique, alors que l'instruction d'exploitation doit être appelée dans le système d'information sur les substances dangereuses. La question de savoir si ce raccourci a été envisagé lors de la rédaction reste ouverte. L'effet se produit indépendamment de cela, et il porte plus loin que toute indication de fabricant, parce qu'il se présente sous le signe d'une caisse professionnelle et est ainsi citable.

Un troisième fournisseur et le cercle de la vérification

Un troisième fournisseur porte le même énoncé. La page produit de MATinspired B.V. consacrée au TK20 Chromium-6 Neutralizer décrit le produit par « neutralizes and removes chromium-6 in surface contaminations on metals » et explique l'effet en indiquant que le chrome(VI) présent est « converted to non-toxic chromium-3 ». Il existe ainsi trois qualifications concordantes du produit de réaction, non critique chez la caisse professionnelle allemande du bâtiment, inoffensif chez Eco-Point et non-toxic chez MATinspired. [131]

Les questions et réponses du même fournisseur nomment les limites qui manquent sur la page produit. Le produit n'agit pas contre les particules en suspension dans l'air, il suppose des composants refroidis, il n'est pas prévu pour du métal présentant des fentes ou des perçages, son temps d'action ne doit pas dépasser environ dix minutes et il est ensuite essuyé puis rincé à l'eau. Sur l'exhaustivité de la transformation, il est indiqué : « We cannot guarantee that the neutralizer liquid will remove/neutralizer all chromium-6. » Sur la stabilité du résultat, il est indiqué qu'aucune reformation n'a été observée à température ambiante, ce qui ne couvre pas le composant traité et remonté à la température de service. Sur l'équipement de protection, les réponses nomment des gants de protection et une protection des yeux comme minimum, mentionnent la protection respiratoire P3 et des vêtements de protection à titre de recommandation et concluent par la phrase : « It is the sole responsibility of the user which appropriate security measures should be used. » [132]

Dans les deux documents, la preuve de l'effet repose sur le kit de test TK11 du même fournisseur. Le même kit de test est, dans l'instruction de travail de Vattenfall Generation NL, le critère selon lequel l'équipement de protection est retiré, l'outillage rendu et le matériau isolant nébulisé remonté. Sur ce procédé, le certificat de l'organisme d'essai constate qu'un résultat négatif n'est pas fiable, et l'étude de terrain française montre le même constat avec 869 ng de chrome(VI) à l'analyse de laboratoire sur le turbocompresseur contre un résultat de test rapide négatif au même endroit (section 19). [115, 116, 132]

En appréciation : un produit dont le fabricant ne garantit pas l'effet complet est réceptionné par un test dont le laboratoire indépendant déclare le résultat négatif non fiable, et le choix des mesures de protection est transféré à l'utilisateur, alors que la TRGS 561 allemande les fixe pour ce cas d'application à la section 5.9.3 alinéa 5. La substitution du matériau contenant des oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux, qui mettrait fin à la nouvelle formation, n'apparaît dans aucun des documents des fabricants. [19]

L'Instruction WS00Q563 de Wärtsilä porte le même schéma. Pour le traitement, elle indique une solution à préparer soi-même à partir de 900 ml d'eau distillée, 110 ml de poudre d'acide citrique et 2 ml de savon liquide, appliquée pendant six à dix minutes puis rincée à l'eau. Le document ne contient aucune indication d'efficacité, et aucun contrôle après le traitement n'est prévu, alors qu'un essai par lingette est exigé avant le début des travaux. Le fabricant indique lui-même que le procédé réduit la mise en suspension des poussières et ne garantit pas l'absence de Cr(VI). [137]

L'acide citrique n'est pas un réducteur usuel pour le chromate. Sans accélérateur, la réduction est lente ; à pH 4,5, moins de 5 pour cent de 50 µmol/l de Cr(VI) ont été transformés en 22 heures, et le manganèse(II) accélère le même processus d'un facteur d'environ 45. C'est le pH qui décide. Pour les réducteurs organiques, la conversion atteint 99,6 à 99,9 pour cent à pH 2,0 à 2,5 et se situe entre 15,4 et 36,3 pour cent à pH 3 à 8 dans l'essai stérile. La quantité indiquée dans le bulletin chiffre une poudre en millilitres, de sorte que la concentration n'est pas définie sans ambiguïté. [258, 259]

Des mélanges acides formulés pour le même usage sont disponibles dans le commerce. Leurs fournisseurs décrivent l'effet par leurs propres indications, sans laboratoire nommé et sans données publiées. [260]

Reste la question de savoir pourquoi il est demandé au technicien de service de préparer une solution faiblement réductrice, alors que la source de calcium demeure dans la pièce et que le chromate se reforme au démarrage suivant au-dessus de 400 °C.

Ce à quoi ressemble une indication qui nomme sa propre portée, une page produit issue de mon environnement le montre. Je détiens une participation dans Kavarmat® Sp. z o.o. Sp.k., qui commercialise KavarClean®Redox Powder. La page produit nomme le terme courant de neutralisateur et précise qu'il ne s'agit pas chimiquement d'une neutralisation mais d'une réduction. Elle désigne le produit comme une aide lors de travaux d'assainissement et de maintenance et là où une substitution n'est pas prévue. Elle ne garantit pas une conversion complète et précise qu'un essai rapide négatif ne prouve pas l'absence de Cr(VI). Aucune preuve d'efficacité n'existe pour ce produit, et aucune n'est affirmée. L'indication n'est donc pas mieux étayée que celle des autres fournisseurs, mais elle ne revendique rien non plus qui demanderait à être étayé. [261]

WD-40

Dans la pratique, l'huile dégrippante WD-40 est en partie considérée comme un moyen contre le chrome(VI) et employée lors de travaux de maintenance. L'origine de cette pratique peut être nommée. Le Safety Bulletin Summary de la fédération professionnelle britannique Energy UK, de septembre 2019, constate que des membres ont une expérience de l'emploi de WD-40 ou de produits comparables et de chiffons « to immobilise and wipe away Cr(VI) residue ». Il s'agit là d'une fixation de la poussière avant l'essuyage, pas d'une transformation chimique. Le même document nomme déjà les trois conditions de la formation, produit contenant du calcium, températures supérieures à 300 °C et acier contenant du chrome, et exige de présumer la présence sur tous les sites de centrales. [92]

WD-40 n'a pas d'effet réducteur. SEEF B.V. l'a vérifié expérimentalement. Pour du chrome(VI) déjà dissous, le taux de récupération est resté à 96,8 pour cent après ajout de 2 ml de WD-40, 240,7 contre 248,7 µg/l. Sur un échantillon de peinture de référence avec mise en solution complète, aucune relation dose-effet n'est apparue ; les valeurs se situaient entre 1 280,0 et 1 384,5 mg/kg contre 1 265,0 mg/kg dans le témoin, et donc toutes au-dessus du témoin. Selon la fiche de données de sécurité du fabricant, le produit est composé de 55 à 75 pour cent en masse d'hydrocarbures aliphatiques et d'huile de base et ne contient aucun composant à effet réducteur. [91]

Le troisième essai explique pourquoi la mesure apparaît néanmoins efficace. Du chrome(VI) solide en contact direct avec WD-40, puis dissous dans l'eau, a donné un taux de récupération de 5,8 pour cent, parce que le chromate s'est aggloméré dans la phase huileuse et est resté soustrait à la mesure. Qui effectue un prélèvement après un traitement à l'huile mesure une fraction du chromate présent. Le constat confirme la mesure, tandis que le chromate reste inchangé sur le composant, dans le matériel de nettoyage et dans les déchets (section 17). [91]

Le chrome(III) prétendument inoffensif

Le chrome(III) réduit est souvent présenté comme un oligoélément essentiel et naturel. L'Autorité européenne de sécurité des aliments EFSA n'a cependant trouvé en 2014 aucune preuve d'une essentialité du chrome(III) et a jugé non approprié de fixer un apport adéquat. [61]

En outre, l'étude sur le chrysotile de Walter et al. (2022) montre que du chrome(III) lié aux fibres peut, dans des conditions oxydantes et à pH physiologique, être mobilisé sous forme de chrome(VI), que les cellules pulmonaires et mésothéliales absorbent. Les poussières industrielles peuvent ainsi servir de vecteurs par lesquels un chrome(III) prétendument inoffensif revient à une forme qui pénètre dans la cellule. Dans le noyau cellulaire, c'est alors de nouveau le chrome(III) qui forme les adduits à l'ADN. [4, 53]

27. Le chrome(III) : l'état final supposé

Tous les procédés traités à la section 26 reposent sur la même hypothèse. Avec la transformation du chrome(VI) en chrome(III), la partie dangereuse du processus serait terminée. Cette section examine cette hypothèse au regard des documents, des classifications et de la chimie du processus.

La figure d'argumentation dans les documents des fabricants

L'instruction technique [redacted] d'[redacted], approuvée le 31 mai 2023, la développe complètement. Le chrome(VI) serait, par la solution réductrice, « almost completely converted into the much less dangerous chromium of oxidation state 3 ». Sur l'appréciation de cet état, il est indiqué : « Cr-3, for example, is found in many foods. Daily intake levels in Europe are generally in a range where no health risk is expected. Whether Cr-3 is an essential trace element for humans at all has not been conclusively clarified. Since the possible concentration of Cr-3 after application of the reduction solution is far below the applicable limit values (occupational exposure limit values), a health hazard from Cr-3 can be ruled out. » Suit, en caractères mis en évidence : « Unlike Cr-6, Cr-3 is not carcinogenic. » [25]

Le paragraphe concède dans sa troisième phrase que l'essentialité n'est pas définitivement clarifiée, et exclut dans la quatrième un danger pour la santé. La motivation s'appuie sur des valeurs limites sans en nommer aucune. La question de l'essentialité est tranchée par l'évaluation de 2014 de l'Autorité européenne de sécurité des aliments, qui n'a trouvé aucune preuve d'une essentialité du chrome(III) et a jugé non approprié de fixer un apport adéquat. [61]

Ce qui se forme lors de la réduction

La justification MAK relative aux composés du chrome(VI) de la fraction inhalable décrit le processus comme une réaction à plusieurs étapes : « La réduction du chrome(VI) passe par le chrome(V) et le chrome(IV) pour aboutir au chrome(III), avec formation de composés radicalaires de l'oxygène et du soufre. » L'étape intermédiaire qui apparaît dépend du réducteur. Lors de la réaction avec l'ascorbate, deux électrons sont transférés à la première étape et du chrome(IV) se forme, avec le glutathion un électron est transféré et il se forme du chrome(V), qui produit des radicaux hydroxyle dans des réactions analogues à la réaction de Fenton. Comme produit final se forme dans tous les cas l'état d'oxydation stable chrome(III). [128]

Cette description porte sur la réduction à l'intérieur de la cellule. Sa transposition au traitement d'une surface de composant est une analogie et est signalée ici comme telle. Ce qui est transposable, c'est le fait que la transformation n'est pas une réaction en une seule étape vers une substance finale définie.

Pour le traitement sur l'installation s'ajoute ce qui se trouve sur la surface. Le réducteur est, selon l'instruction, de l'acide ascorbique, un mélange d'acides ou du sulfate de fer(II), parfois complété par de l'acide citrique. Sur la surface traitée se trouvent des huiles, des graisses, des restes d'isolant et des pâtes de montage. Le chrome(III) forme des complexes solubles avec les acides organiques et leurs produits d'oxydation. L'oxyde de chrome(III), qui est visé dans les énoncés des produits, se forme par voie thermique et non par pulvérisation et essuyage.

L'espèce inconnue

Aucun des documents examinés n'indique quels composés du chrome(III) sont effectivement présents après un traitement. L'instruction de travail de Vattenfall Generation NL ne nomme pas le produit de réaction, les pages produit d'Eco-Point et de MATinspired parlent de chrome-3 et de non-toxic chromium-3 sans indiquer de composé, le certificat de l'organisme d'essai porte sur l'efficacité de la transformation et non sur son produit, et la page de la caisse professionnelle allemande du bâtiment parle au pluriel de composés du chrome(III) non critiques sans en nommer un. [115, 116, 117, 131, 132]

L'analytique employée ne répond pas davantage à la question. Le test rapide colorimétrique indique le chrome(VI) ou non. Les procédés de laboratoire déterminent le chrome(VI) ou le chrome total. Une analyse de spéciation des composés du chrome(III) formés n'est prévue dans aucun des procédés et n'est exigée dans aucun des documents.

Classification des composés du chrome(III)

La liste des valeurs MAK et BAT 2026 de la Deutsche Forschungsgemeinschaft mentionne les composés du chrome(III) sans valeur MAK, sans limitation de pointe, sans groupe de grossesse, sans mention d'absorption cutanée et sans catégorie pour la cancérogénicité ou la mutagénicité sur les cellules germinales. Sous sensibilisation, le groupe porte la mention Sh pour un effet sensibilisant cutané, avec l'ajout : « Ne s'applique pas à l'oxyde de chrome(III) ni aux composés du chrome(III) de solubilité comparablement faible. » À titre de comparaison, la même liste mentionne les composés du chrome(VI) de la fraction inhalable avec la mention d'absorption cutanée H, la mention de sensibilisation Sh, la catégorie de cancérogénicité 1 et la catégorie de mutagénicité sur les cellules germinales 2. [102]

La mention Sh vaut ainsi pour les composés solubles du chrome(III) et expressément pas pour l'oxyde ni pour les composés de solubilité comparablement faible. Le rattachement au groupe sans mention suppose la connaissance de l'espèce formée, laquelle, d'après le sous-chapitre précédent, n'est pas relevée. Dans la présentation des fournisseurs, il s'opère sans constat.

Pour l'oxyde de chrome(III) lui-même, une valeur limite d'exposition professionnelle de 2 mg/m³ dans la fraction inhalable s'applique en Allemagne, avec le facteur de dépassement 1 et la catégorie de valeur de courte durée I. Il n'existe pas de classification harmonisée au titre du règlement européen CLP pour l'oxyde de chrome(III). [130]

L'agence française Anses a examiné l'oxyde de chrome(III) dans le cadre de l'évaluation des substances au titre du règlement REACH, en qualité d'État membre évaluateur, et a présenté son avis le 28 juillet 2021. Elle estime indiquée une classification comme sensibilisant cutané de la catégorie 1 et considère cela expressément comme pertinent aussi pour d'autres composés du chrome(III). Pour la voie inhalatoire, une classification harmonisée comme STOT RE 2 avec H373 doit être examinée, parce que les lésions pulmonaires observées en expérimentation animale sont considérées comme irréversibles. Pour l'environnement, elle recommande la classification harmonisée comme Aquatic Acute 1 avec H400 et Aquatic Chronic 1 avec H410. Pour la mutagénicité sur les cellules germinales, elle aboutit au résultat que les critères du règlement CLP ne sont pas remplis après évaluation globale ; sur les nanoformes, deux études soulevant des préoccupations sont disponibles, dont la portée est limitée par l'absence d'indications sur la teneur en chrome(VI). Pour la toxicité pour la reproduction, elle juge les données insuffisantes et recommande d'ordonner une étude multigénérationnelle selon OECD 443 et une étude de développement prénatal selon OECD 414. [129]

Le même avis constate que l'inventaire européen des classifications et des étiquetages contient, pour l'oxyde de chrome(III), des autoclassifications notamment comme Carc. 1A, Muta. 1B et Repr. 2, qui sont en partie liées à des impuretés de chrome(VI), et recommande aux autorités de surveillance de vérifier si du chrome(VI) au-delà de 0,1 pour cent est contenu sans classification correspondante. [129]

Entre l'évaluation allemande et l'évaluation française subsiste un point ouvert. La liste des valeurs MAK et BAT exclut l'oxyde de chrome(III) de la mention Sh, l'Anses estime indiquée pour la même substance une classification comme sensibilisant cutané de la catégorie 1. Les deux évaluations coexistent. [102, 129]

L'étape sensibilisante est l'étape du chrome(III)

La justification MAK décrit le déroulement de la sensibilisation cutanée par les chromates. Les composés du chrome(VI) pénètrent la couche cornée et sont réduits dans la peau en chrome(III), probablement surtout par des acides aminés soufrés et par le glutathion. « Ces composés trivalents du chrome sont, à la différence des hexavalents, en mesure de se lier à des molécules porteuses de haut poids moléculaire telles que les protéines et peuvent agir comme haptènes » et induire ainsi une sensibilisation de la peau. Le chrome trivalent intervient également dans la génotoxicité : le chrome(III) formé dans le noyau cellulaire forme des adduits avec l'ADN, « majoritairement des complexes ternaires d'ADN, de chrome(III) et de petites molécules telles que l'ascorbate, le glutathion, la cystéine ou l'histidine », qui peuvent causer des mutations géniques, des cassures double brin de l'ADN, des cassures chromosomiques et des micronoyaux. [128]

Le précédent du cuir

La même justification MAK décrit un cas d'application dans lequel le chrome(III) est employé depuis longtemps comme matière de travail : « Le tannage est certes réalisé avec des composés du chrome(III), mais de faibles quantités de composés du chrome(VI) peuvent s'en former en cas de méthodes de transformation ou de stockage inadéquates. Si le chrome(III) est formé in situ par réduction de composés du chrome(VI), du chrome(VI) soluble peut également subsister dans le cuir en cas de réduction incomplète. » [128]

Les deux énoncés de cette phrase concernent le processus traité ici. Du chrome(VI) peut se former à partir du chrome(III) dans des conditions inadéquates, et une réduction in situ incomplète laisse subsister du chrome(VI) soluble. Pour le traitement sur la pièce chaude, l'exhaustivité de la réduction n'est pas garantie selon les indications des fournisseurs eux-mêmes.

Mobilité et la conséquence d'un travail sans écoulement

Les procédés de la section 26 travaillent par voie humide. Une solution est pulvérisée, l'essuyage se fait avec des chiffons, le rinçage se fait à l'eau selon l'instruction de MATinspired. Il en résulte une phase liquide qui, en l'état des indications des fournisseurs, peut continuer à contenir du chrome(VI), parce que la transformation complète n'est pas garantie et que la procédure de libération n'est pas fiable dans son résultat négatif selon le certificat de l'organisme d'essai. S'y ajoutent les complexes solubles du chrome(III), dont la composition n'est pas déterminée. [132, 116]

Sur l'élimination de cette phase liquide, les pages produit et les questions et réponses de MATinspired ne contiennent aucune indication, et le lavage des chiffons utilisés y est expressément prévu. L'instruction d'exploitation de la caisse professionnelle allemande du bâtiment exige pour la même activité la collecte des déchets au lieu de leur production, dans des sacs en PE ou des big-bags, et leur étiquetage. Des deux découle l'exigence d'exécuter de tels travaux sans écoulement et de traiter le liquide produit comme déchet dangereux, tant que sa teneur en chrome(VI) n'est pas déterminée par un procédé fiable. [126, 132]

Le retour du chrome(III) exposé sur la pièce chaude

Dans l'alliage, le chrome est lié et n'est accessible à une réaction que par la surface. Après une réduction, des composés du chrome(III) se trouvent finement répartis et non liés sur la surface et dans le matériau adhérent. Cet état est l'état de départ de la formation de chromate telle qu'elle est documentée dans cette analyse : le brevet de 1939 décrit la production ciblée de chromate de calcium à partir de matériau contenant du chrome, avec de la chaux et l'oxygène de l'air, Mao et al. démontrent la formation de chromate de calcium à partir de chrome(III) en présence d'oxyde de calcium dans la fenêtre de température de 500 à 900 °C, et Verbinnen et al. montrent la même dépendance pour les composés alcalins et alcalino-terreux. [1, 9, 10]

Si du matériau isolant traité est remonté selon l'instruction de Vattenfall Generation NL et que l'installation est remise en service, toutes les conditions sont de nouveau réunies, et le partenaire de réaction chrome se présente sous une forme plus facilement accessible qu'auparavant. Aucune étude de ce cas n'existe. L'indication du fournisseur selon laquelle aucune reformation n'a été observée à température ambiante ne le couvre pas. [115, 132]

Délimitation

La toxicité moindre des composés du chrome(III) par rapport aux composés du chrome(VI) est incontestée et n'est pas mise en question ici. Les composés du chrome(III) ne portent aucune catégorie de cancérogénicité ni aucune catégorie de mutagénicité sur les cellules germinales. Les énoncés selon lesquels le produit de réaction serait non critique, inoffensif ou non-toxic vont au-delà. Ils énoncent quelque chose sur des substances qui ne sont pas déterminées, ils laissent sans mention la mention Sh des composés solubles du chrome(III), ils laissent sans mention l'évaluation administrative d'un État membre sur la sensibilisation cutanée et sur le danger pour les eaux, et ils supposent une exhaustivité de la transformation qu'aucun fournisseur ne garantit.

28. Nos propres constats de terrain

Le fondement de cette expertise n'est pas constitué uniquement de documents de tiers. Depuis 2019, nous menons nos propres investigations sur le terrain, en partie nous-mêmes, en partie par des tiers mandatés, et elles sont documentées.

Les examens ont porté sur des installations en service et en maintenance : moteurs et unités de cogénération, centrales électriques, installations d'incinération à l'intérieur et à l'extérieur, moteurs marins, véhicules et engins de chantier. Nous avons à cette occasion contrôlé sur différentes installations presque chaque matériau isolant disponible sur le marché.

Ont été mis en œuvre des prélèvements surfaciques, des prélèvements de matériau et des analyses de laboratoire, exploités en laboratoire mobile et par des laboratoires externes. Au début, nous avons nous aussi utilisé le test rapide. Nous ne l'utilisons plus, pour les raisons exposées à la section 19.

Cette expertise n'affirme pas que chaque composant est concerné, et elle ne veut rien exagérer. Après sept années de travail de terrain, nous ne pouvons cependant, pour aucun des domaines d'application cités, constater une absence de contamination ni donner de levée d'alerte.

29. Ce qui peut encore être étudié et ce qui n'est plus ouvert

Technique d'isolation et véhicules

Dans le cas d'installation considéré, un besoin d'investigation peut exister sur la cinétique, sur les conditions locales d'oxygène et d'humidité, sur l'influence des cycles de température, sur la chimie de surface ou sur le rapport quantitatif entre les différents chromates. Ces questions concernent la forme que prend le processus réactionnel.

Elles ne suppriment pas la voie de formation. Celle-ci est documentée sous forme de brevet depuis 1939, confirmée expérimentalement à l'interface métal-isolant et objet d'avertissements de fabricants depuis avril 1990. Elle est en même temps une réalité d'exploitation : les instructions de travail des exploitants la décrivent avec la fenêtre de température et la source de calcium, et nos propres constats de terrain sur sept ans la confirment sur des moteurs, des turbines, des centrales électriques, des navires et des véhicules. Les questions ouvertes portent sur la forme qu'elle prend, pas sur son occurrence.

La formation in situ continue néanmoins d'être présentée comme une impureté ou comme une conséquence inévitable de l'exploitation. Ce qui est exact, c'est qu'il s'agit d'une réaction thermochimique dont le second partenaire est déterminé par le choix du matériau. Qui pose un matériau contenant des oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux sur une pièce chaude alliée au chrome accepte la formation, et cela depuis que les relations sont documentées.

Au vu de la chimie de réaction publiquement documentée depuis 1939, de l'approche préventive de Toshiba de 2010 et de la preuve à l'interface de 2015, la question se pose de savoir pourquoi la voie de formation est aujourd'hui encore présentée, dans des informations produit et des avertissements, comme ouverte ou non reconstituable.

Du point de vue de l'expertise du chromate, un manque d'intérêt des fabricants d'isolants et de moteurs pour une présentation claire de la cause liée au matériau et pour son élimination préventive peut être nommé sur le plan technique, dans la mesure où cela s'appuie sur les lacunes d'information documentées. Une présentation aussi peu claire que possible peut servir des intérêts économiques. Cette appréciation porte sur la communication perceptible et sur son effet ; une intention interne concrète n'est pas pour autant affirmée comme un fait établi.

Les sources approfondies permettent des questions concrètes : lors des contrôles de compatibilité avec le chrome, a-t-on examiné seulement la tenue de l'isolant ou a-t-on aussi déterminé le Cr(VI) ? La réaction métal-isolant connue a-t-elle été intégrée dans les conditions d'emploi prévues ? Pourquoi des indications correspondantes manquent-elles dans certains documents spécifiques à des produits ? Quelles modifications d'avertissements, de matériaux ou de surfaces de contact ont suivi des constats propres ? Les réponses peuvent être rattachées à des rapports d'essai, des historiques de versions et des listes de diffusion.

Résidus d'incinération et transmission de la recherche

Dans les cendres, détermine-t-on seulement le chrome total ou aussi le Cr(VI) ? Le prélèvement couvre-t-il aussi les restes de cendres demeurés sur la grille et les résidus de la chambre de combustion avant et après l'arrêt, ainsi que les dépôts pertinents pour la révision et le nettoyage ? Quelles modifications résultent de l'historique de température et d'oxygène lors de l'arrêt, d'un post-traitement thermique ou du vieillissement ? Confond-on l'évaluation relative à l'élimination et à l'éluat avec une évaluation de l'exposition par inhalation, cutanée et orale ? Quels résultats de projets de recherche proches de l'industrie ont été transposés dans des avertissements et des instructions de travail ?

Le noyau factuel est une possible lacune de mise en œuvre entre le savoir disponible sur la substance, l'information liée à l'application et la protection effectivement pratiquée. Les sources existantes et les observations de terrain justifient un examen ciblé de ces interfaces. Il n'en est pas déduit comme un fait une intention de dissimulation ou un comportement fautif de l'ensemble des exploitants.

30. Conséquences juridiques en cas de non-respect

Les sections précédentes traitent de la voie de formation, de l'état des preuves et des obligations. Cette section traite de ce qui se produit lorsque ces obligations ne sont pas remplies. L'exposé se limite au droit en vigueur et indique pour chaque énoncé la référence. Ce qui est déterminant, c'est que dans les quatre ordres juridiques présentés, la sanction se rattache à l'obligation non remplie et non à un dommage sanitaire survenu.

Allemagne : contravention administrative, infraction pénale et recours

Le règlement allemand sur les substances dangereuses énumère les infractions à ses obligations centrales au paragraphe 22 alinéa 1. La disposition énonce en introduction : « Commet une contravention administrative au sens du paragraphe 26 alinéa 1 numéro 8 lettre b de la loi allemande sur les produits chimiques quiconque, intentionnellement ou par négligence ». Trois numéros sont pertinents pour l'état de fait traité ici. Le numéro 1a vise l'évaluation des risques qui, contrairement au paragraphe 6 alinéa 8 phrase 1, n'est pas documentée, ou l'est de façon incorrecte, incomplète ou tardive. Le numéro 3 vise celui qui laisse entreprendre une activité contrairement au paragraphe 7 alinéa 1, donc avant que l'évaluation des risques ait été réalisée et que les mesures de protection nécessaires aient été prises. Le numéro 5 vise celui qui, contrairement au paragraphe 7 alinéa 7 phrase 1, ne contrôle pas, ou pas en temps utile, le fonctionnement et l'efficacité des mesures techniques de protection [103].

Le cadre de l'amende ne découle pas du règlement lui-même, mais de la loi allemande sur les produits chimiques. Le paragraphe 26 alinéa 3 échelonne les montants maximaux ; pour les infractions visées au paragraphe 26 alinéa 1 numéro 8 lettre b, donc pour les dispositions relatives à la protection des salariés, l'amende s'élève jusqu'à 50 000 euros [104].

Au-dessus de la contravention administrative commence le droit pénal, et cela sans qu'un dommage doive être survenu. Le paragraphe 22 alinéa 2 du règlement allemand sur les substances dangereuses dispose : « Quiconque, par un acte visé à l'alinéa 1, met en danger la vie ou la santé d'autrui ou des biens d'autrui de valeur importante est punissable selon le paragraphe 27 alinéas 2 à 4 de la loi allemande sur les produits chimiques. » [103] Le paragraphe 27 alinéa 2 de la loi allemande sur les produits chimiques prévoit, pour la mise en danger intentionnelle, une peine privative de liberté pouvant aller jusqu'à cinq ans ou une peine pécuniaire, l'alinéa 4, pour un acte de négligence, une peine privative de liberté pouvant aller jusqu'à deux ans ou une peine pécuniaire. La tentative est punissable selon l'alinéa 3. L'élément constitutif est la mise en danger de la vie ou de la santé, non leur atteinte [105].

Cette construction revêt une importance considérable pour l'état de fait traité ici. Une maladie professionnelle due au chrome(VI) survient avec une latence de plusieurs années à plusieurs décennies. Une infraction pénale qui exigerait la survenance du dommage resterait pratiquement sans effet sur cette durée. L'infraction de mise en danger s'applique en revanche au moment où l'activité est exécutée sans évaluation et sans mesures de protection.

À cela s'ajoute l'action récursoire de l'organisme d'assurance accidents. Selon le paragraphe 110 du septième livre du Sozialgesetzbuch allemand, les personnes dont la responsabilité est limitée par les paragraphes 104 à 107 répondent envers les organismes d'assurance sociale des dépenses nées de la survenance du sinistre, lorsqu'elles ont « causé intentionnellement ou par négligence grave » le sinistre. La faute ne doit porter que sur l'action ou l'omission qui a causé le sinistre. La responsabilité est limitée en montant à la créance de dommages-intérêts de droit civil ; au lieu d'une rente, la valeur capitalisée peut être réclamée. L'organisme peut renoncer en tout ou en partie à la créance selon son appréciation équitable [106]. En cas de maladie professionnelle reconnue avec une charge de rente, de traitement et de réadaptation s'étendant sur de longues années, cette action récursoire est régulièrement, sur le plan économique, le poste le plus important, et elle atteint celui dont la responsabilité envers le salarié lui-même est limitée.

Du côté environnemental, le paragraphe 326 alinéa 1 du Strafgesetzbuch allemand s'applique. Est visé quiconque collecte, transporte, traite, valorise, stocke, dépose, déverse, élimine des déchets ou en fait commerce en dehors d'une installation autorisée à cet effet ou en s'écartant de manière substantielle d'un procédé prescrit ou autorisé, dès lors que les déchets relèvent de l'une des catégories de danger énumérées. En font partie les déchets qui « sont cancérogènes, toxiques pour la reproduction ou mutagènes pour l'homme ». La peine encourue va jusqu'à cinq ans de privation de liberté ou une peine pécuniaire, et jusqu'à trois ans en cas d'agissement par négligence selon l'alinéa 5 numéro 1 [107]. Les isolants, dépôts et cendres contenant du chromate entrent dans cette considération dès qu'ils sont manipulés comme des déchets ; le classement ne découle alors pas de l'état de livraison, mais de l'état après usage.

Pays-Bas : obligation de substitution, bestuurlijke boete et délit économique

L'Arbeidsomstandighedenbesluit néerlandais règle les activités avec des substances cancérogènes au chapitre 4 section 2. L'article 4.17 porte l'intitulé « Voorkomen van blootstelling; vervangen » et exige des mesures techniques et organisationnelles qui empêchent la possibilité d'une exposition autant que possible à la source, et cela avant tout par le remplacement des substances ou procédés cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction, « voor zover dit technisch uitvoerbaar is », par des substances ou procédés par lesquels les salariés ne sont pas ou sont moins mis en danger [109]. La priorité de la substitution est ainsi formulée comme en droit allemand, mais avec le critère de la faisabilité technique.

Le non-respect des obligations issues de l'Arbeidsomstandighedenwet et des prescriptions qui en découlent constitue, selon l'article 33 alinéas 1 et 2, une overtreding. L'article 34 alinéa 1 confie l'infliction de la bestuurlijke boete à un fonctionnaire désigné à cet effet. Selon l'article 34 alinéa 3, l'amende s'élève au maximum au montant de la cinquième catégorie prévu à l'article 23 alinéa 4 du code pénal néerlandais [108] ; ce montant est, depuis le 1er janvier 2026, de 110 000 euros, celui de la sixième catégorie de 1 100 000 euros [111]. En cas d'infraction de même nature au cours des cinq années précédentes, l'amende est majorée de 100 pour cent selon l'article 34 alinéa 5 ; en cas de deux infractions antérieures ou d'infractions classées comme graves, elle est majorée de 200 pour cent selon les alinéas 6 et 7 ; pour les infractions graves, l'alinéa 9 porte la période de référence à dix ans [108].

La disposition pénale figure à l'article 32 de l'Arbeidsomstandighedenwet : « Het is de werkgever verboden handelingen te verrichten of na te laten in strijd met deze wet of de daarop berustende bepalingen indien daardoor, naar hij weet of redelijkerwijs moet weten, levensgevaar of ernstige schade aan de gezondheid van een of meer werknemers ontstaat of te verwachten is. » [108] Le critère n'est donc pas la connaissance positive seule, mais aussi ce que l'employeur doit raisonnablement savoir. L'article 1 numéro 1 de la Wet op de economische delicten mentionne expressément l'article 32 de l'Arbeidsomstandighedenwet comme délit économique. Selon l'article 2 alinéa 1 de la même Wet, ces délits sont des misdrijven dans la mesure où ils sont commis intentionnellement, et des overtredingen dans le cas contraire. L'article 6 alinéa 1 numéro 1 prévoit, pour le délit commis intentionnellement, une privation de liberté jusqu'à six ans, une peine de travail ou une peine pécuniaire de la cinquième catégorie, et le numéro 4, pour l'overtreding, une détention jusqu'à un an, une peine de travail ou une peine pécuniaire de la quatrième catégorie [110].

Royaume-Uni : les COSHH et le Health and Safety at Work etc. Act

La regulation 7(1) des Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 dispose : « Every employer shall ensure that the exposure of his employees to substances hazardous to health is either prevented or, where this is not reasonably practicable, adequately controlled. » La regulation 7(2) établit clairement la priorité de la substitution : « substitution shall by preference be undertaken », l'employeur remplaçant l'utilisation de la substance dangereuse, dans la mesure où cela est raisonnablement praticable, par une substance ou un procédé qui supprime ou réduit le danger. Lorsque la prévention de l'exposition à un agent cancérogène n'est pas raisonnablement praticable, la regulation 7(5) exige en outre l'encoffrement complet du procédé et des systèmes de manipulation dans la mesure du praticable, l'interdiction de manger, boire et fumer dans les zones éventuellement contaminées, le nettoyage régulier et ponctuel des sols, des murs et des autres surfaces, le marquage des zones et installations concernées par des panneaux d'avertissement appropriés ainsi que le stockage, la manipulation et l'élimination sûrs dans des récipients fermés et clairement identifiés [113].

Ces obligations sont pénalement sanctionnées. Selon la section 33(1)(c) du Health and Safety at Work etc. Act 1974, constitue une infraction le fait de contrevenir aux health and safety regulations ou à une injonction prise sur leur fondement. La section 33(2) renvoie, pour le type de procédure et la peine maximale, au Schedule 3A. L'infraction prévue à la section 33(1)(c) y est poursuivable au choix selon la procédure sommaire ou selon la procédure d'accusation ; dans la procédure d'accusation, la peine maximale est une privation de liberté jusqu'à deux ans, une peine pécuniaire ou les deux, et dans la procédure sommaire une privation de liberté jusqu'à la limite générale du Magistrates Court, une peine pécuniaire ou les deux. L'ancienne limite sommaire de 20 000 livres a disparu ; le texte en vigueur ne mentionne plus que « a fine » [112]. Ici aussi, la punissabilité ne suppose pas la survenance d'un dommage pour la santé, elle s'attache à la violation de la règle.

États-Unis : amendes de l'OSHA, disposition pénale et droit de la commande publique

Aux États-Unis, le standard 29 CFR 1910.1026 s'applique au chrome(VI), avec une valeur d'exposition admissible de 5 µg/m³ et un action level de 2,5 µg/m³ (section 18). Les amendes civiles prévues à la section 17 de l'Occupational Safety and Health Act sont ajustées chaque année à l'inflation. Pour les décisions postérieures au 15 janvier 2026, elles s'élèvent jusqu'à 16 550 dollars américains par infraction pour les serious et other-than-serious violations ainsi que pour les manquements aux obligations d'affichage, jusqu'à 16 550 dollars américains par jour en cas de non-élimination après l'expiration du délai imparti et jusqu'à 165 514 dollars américains par infraction pour les willful ou repeated violations [114]. Comme chaque position concernée peut être citée séparément, le montant total n'est pas limité par ces montants unitaires.

S'y ajoute la disposition pénale de la section 17(e) : un employeur qui contrevient intentionnellement à un standard édicté en vertu de la section 6 et cause ainsi la mort d'un salarié est puni d'une peine pécuniaire jusqu'à 10 000 dollars américains ou d'une privation de liberté jusqu'à six mois ou des deux ; après une première condamnation, le cadre est porté à 20 000 dollars américains ou un an [114]. En droit de la commande publique s'ajoute la clause DFARS 252.223-7008 présentée à la section 18, qui s'attache à la livraison et non à l'exposition.

Ce que les quatre ordres juridiques ont en commun

Les points de rattachement se situent uniformément avant le dommage. L'Allemagne sanctionne l'absence de documentation, le commencement de l'activité sans évaluation et le défaut de contrôle d'efficacité, et érige en infraction la mise en danger de la vie ou de la santé. Les Pays-Bas répriment le non-respect des obligations par une amende et érigent en infraction l'action ou l'omission dont l'employeur sait ou doit raisonnablement savoir qu'il en résulte ou qu'il est à prévoir un danger de mort ou un dommage grave pour la santé. Le Royaume-Uni s'attache à la violation des Regulations. Les États-Unis s'attachent à la violation du standard et élèvent le cadre en cas d'intention et de répétition.

Pour la situation de fait traitée ici, il en découle un état des preuves clair. Comme les mesures de protection prévues par la TRGS 561 allemande s'appliquent déjà lorsqu'une contamination par le chrome(VI) ne peut être exclue (section 6), et comme un résultat de mesure négatif sans indication du taux de récupération sur la même matrice ne permet aucune conclusion sur la teneur (section 17), ce n'est pas la mesure qui décide en cas de litige, mais la documentation : si une évaluation des risques existe qui couvre le couple de matériaux formé par la pièce chaude alliée au chrome et l'isolant basique, si le contrôle de substitution a été réalisé et motivé et si l'efficacité des mesures prises a été vérifiée.

Une évaluation absente ou inexacte d'une exposition au chrome(VI) n'est donc, dans aucun des quatre ordres juridiques, une question marginale de l'organisation de l'entreprise. Elle est passible d'amende, pénalement sanctionnée dans le haut du spectre, et elle déclenche en cas de dommage l'action récursoire de l'organisme d'assurance sociale.

31. Sur le choix du corpus réglementaire cité

Dans cette analyse, le corpus réglementaire allemand est fréquemment cité, en particulier la TRGS 561 et le règlement allemand sur les substances dangereuses (GefStoffV). Il y a deux raisons à cela. Je travaille depuis l'Allemagne, avec un autre expert du chromate actif dans la protection du travail et de l'environnement. Et la TRGS 561 allemande décrit expressément le cas d'application traité ici, avec des composants industriels alliés au chrome sollicités thermiquement, avec des oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux provenant d'isolants et de pâtes de montage, et avec un catalogue de mesures propre. [19]

Elle ne fixe pas pour autant des critères plus stricts que le droit européen. Elle explicite l'approche de la directive 2004/37/CE pour ce cas. La directive exige depuis plus de vingt ans, pour toutes les activités comportant une possibilité d'exposition, de déterminer la nature, le degré et la durée de l'exposition et de tenir compte à cette occasion des autres voies d'exposition, y compris l'absorption dans ou à travers la peau. Elle s'applique dans tous les États membres. [18]

Dans la pratique, l'appréciation s'appuie majoritairement sur des mesures d'air, parce que les valeurs contraignantes sont fixées comme concentrations dans l'air. Pour le danger par contact cutané, il existe en Allemagne, avec la TRGS 401, une procédure d'appréciation propre, qui vient à côté de la mesure d'air. [99]

Les composés du chrome(VI) sont inhabituels à cet égard. La liste des valeurs MAK et BAT 2026 les mentionne avec la mention d'absorption cutanée H, la mention de sensibilisation Sh, la catégorie 1 de cancérogénicité et la catégorie 2 de mutagénicité sur les cellules germinales. Selon le tableau 2 de la TRGS 401 allemande, la combinaison de l'absorption cutanée et du classement comme cancérogène de catégorie 1 donne un danger élevé pour tout type de contact, sans seuil de durée ni de surface. Le chromate de calcium et le chromate de sodium sont en outre classés comme très toxiques pour les organismes aquatiques avec effets à long terme. Quatre niveaux d'appréciation se trouvent ainsi côte à côte, inhalatoire, cutané, oral et environnemental. L'amiante ne porte ni mention de danger cutané ni danger pour les eaux. [102, 99, 98]

Il en découle pour la mesure d'air une limite pratique. Les nids de poussière contenant du chromate dans les isolations, sur les brides et dans les cavités ne sont libérés qu'au moment de la manipulation. Une mesure générale de l'air ambiant ne les saisit pas. La TRGS 561 allemande part donc, au point 5.9.3 alinéa 5, de l'activité et exige la minimisation de la formation et de la propagation des poussières, jusqu'au recouvrement des caillebotis, et avec cela une combinaison de protection chimique de type 5 à capuche, des gants textiles revêtus de nitrile, une protection des yeux, une protection respiratoire au minimum FFP2 et, pour les activités de plus longue durée, des demi-masques à filtres P3 ainsi que l'élimination des vêtements de protection jetables contaminés. [19]

Il en va de même pour les cendres contenant du chromate lors de la révision à l'intérieur des fours d'incinération. Des échafaudages y sont montés, et les composants en acier inoxydable de la grille ne sont pas seulement parcourus et inspectés, mais aussi traités en surface, démontés et remplacés. Des expositions atmosphériques accrues à des composés du chrome(VI) lors de tels travaux sont connues par mon propre travail de terrain ; les valeurs de mesure correspondantes ne sont pas publiques et ne sont pas reproduites ici.

Une mesure isolée ne vaut de toute façon pas là comme critère, ni pour disculper ni pour charger. La teneur en oxydes basiques dans la matière brûlée varie, et elle n'est pas déterminée par la seule composition des déchets. Paoletti indique la teneur en oxyde de calcium dans les ordures ménagères à environ 3 pour cent et décrit sur cette base la formation de chromate de calcium entre 500 et 850 °C sous une pression partielle d'oxygène suffisante. S'y ajoute l'apport de sorbants calciques dans l'exploitation de l'installation. Dans la sorption sèche conditionnée, cela se produit en aval de la chaudière, à des températures de gaz de fumée d'environ 130 à 150 °C, dans l'absorption par pulvérisation au lait de chaux entre 140 et 200 °C, et donc en dehors de la fenêtre de formation. Dans la désulfuration directe en revanche, de l'hydroxyde de calcium ou de la farine de calcaire est introduit dans le foyer à environ 900 °C ou dans les parcours de chaudière en aval à environ 350 °C, dans l'application documentée avec des taux de dosage de 140 à 375 kilogrammes par heure. Pour l'appréciation d'une révision, il convient donc de clarifier quel procédé de désulfuration l'installation exploite et à quel endroit le sorbant est introduit. [50, 149, 150]

Ce que la mesure d'air ne reflète pas : le constat sur les mains de l'étude de terrain française

L'étude de terrain française ne mesure pas seulement des surfaces, mais aussi des mains. Avant le démontage, la valeur se situait sous la limite de quantification de 40 ng, après le démontage à 45,4 ng, et les auteurs consignent expressément la contamination des mains malgré le port de gants nitrile jetables. Étaient portés en outre des demi-masques jetables FFP3 et une combinaison de travail de type 5. Dans le même passage, les valeurs d'air sont restées faibles, et les valeurs urinaires des onze mécaniciens examinés se situaient en moyenne à 0,26 µg par gramme de créatinine et donc en dessous de la valeur biologique de référence de 0,54. L'exposition cutanée n'est, dans cette constellation, reflétée ni par la mesure d'air ni par la biosurveillance. [5]

Le gant n'est pas ici le point faible. Le gant nitrile sépare la peau de la substance ; restent ouverts la fermeture de manche, par laquelle la poussière pénètre, et le moment du retrait, où la face extérieure contaminée touche la paume. Dans la pratique, le passage entre le gant et la manche de la combinaison est donc adhésivé, de même que le passage entre la combinaison et les chaussures. Pour les combinaisons de protection des types 5 et 6, les coutures étanchées et les fermetures recouvertes font partie des caractéristiques du produit, et les deux passages adhésivés ferment les endroits que le produit lui-même ne peut pas fermer. La règle allemande DGUV 112-189 retient à ce sujet, de manière générale, que seul un vêtement fermé remplit la fonction de protection, et mentionne, pour le risque de contamination, l'étanchéité comme exigence applicable aux vêtements de protection. Les auteurs de l'étude française tirent de leur constat la même direction et recommandent expressément d'améliorer les protocoles de retrait de l'équipement de protection individuelle et de lavage des mains avant et après le port. [5, 133]

La même étude a trouvé dans les matériaux isolants prélevés des traces de chrome(VI) de 0,01 à 0,2 mg/kg ainsi que, dans un échantillon, des fibres céramiques réfractaires classées comme cancérogènes de catégorie 1B par inhalation. Les autres échantillons étaient constitués de fibres de verre ou de silicate. [5]

L'Australie montre la direction de l'évolution. À partir du 1er décembre 2026, Safe Work Australia ne publie plus de valeurs limites d'exposition professionnelle pour les cancérogènes génotoxiques sans seuil, composés du chrome(VI) inclus. À la place de la valeur limite vient l'obligation de supprimer l'exposition ou de la minimiser dans la mesure où cela est raisonnablement praticable. [58]

32. Ordre de grandeur : une expérience de pensée

Cette section ne calcule pas combien d'installations sont contaminées. Ce nombre n'est relevé nulle part, et toute indication à ce sujet serait inventée. Ce qui est calculé, c'est la fréquence à laquelle se présente la situation dans laquelle il y aurait lieu d'examiner si une contamination par le chrome(VI) peut être exclue. Les chiffres de parc proviennent d'indications publiques des fabricants, de statistiques de flottes et de registres d'installations. Les conversions et les hypothèses d'intervalle sont signalées dans le texte.

Chiffres de parc issus de sources publiques

Caterpillar indique pour la série 3500 un parc en service de 190 000 moteurs et 3 milliards d'heures de fonctionnement, pour une durée de production de plus de 35 ans, avec des applications dans les mines, le rail, la production d'électricité, le pétrole et le gaz ainsi que la navigation. État de septembre 2016. [134]

Rolls-Royce Power Systems cite pour les séries mtu 2000 et 4000 plus de 100 000 moteurs vendus, dont 52 000 de la série 4000 et plus de 65 000 de la série 2000, ensemble plus de 320 millions d'heures de fonctionnement, avec des applications dans les groupes électrogènes, les tombereaux, les yachts, les ferries et les locomotives. État 2021. [135]

INNIO fait état, au 31 décembre 2025, d'une base installée active des marques Jenbacher et Waukesha d'environ 44 GW, contre 42 GW l'année précédente, pour 3,4 GW livrés en 2025. L'entreprise ne cite pas de nombres d'unités. Avec une puissance unitaire moyenne retenue de 1,0 à 1,5 MW, cela correspond à 29 000 à 44 000 moteurs. [136]

GE Vernova cite sur sa propre page produit plus de 7 000 turbines à gaz totalisant plus de 800 GW de puissance installée dans plus de 120 pays et indique fournir environ la moitié de la base mondiale installée de turbines à gaz. Il en résulte une flotte mondiale de l'ordre de 14 000 turbines à gaz. Quelques séries à titre de comparaison : la 7F avec plus de 950 unités installées et environ 175 GW, la 9F avec plus de 400 unités dans plus de 40 pays, la LM6000 avec plus de 1 500 unités vendues. [138]

Le Global Coal Plant Tracker fait état de plus de 2 200 GW de capacité charbon en service, seuil de recensement 30 MW. Avec une taille moyenne de tranche de 300 MW, cela représente environ 7 300 tranches avec turbine à vapeur ainsi que conduites de vapeur vive et de resurchauffe en aciers alliés au chrome résistants à chaud. Le Global Oil and Gas Plant Tracker recense 16 559 tranches de centrales à pétrole et à gaz, y compris celles planifiées et celles mises hors service, seuil de recensement 50 MW et, dans l'Union européenne ainsi qu'au Royaume-Uni, 20 MW. [139, 140]

La flotte marchande mondiale comprend environ 109 000 navires à partir de 100 tonneaux de jauge brute, chacun avec une ligne d'échappement isolée pour les moteurs principaux et auxiliaires. [141]

L'ACEA fait état pour l'Union européenne de 6 162 673 camions de plus de 3,5 tonnes avec 96,3 pour cent de diesel et de 699 238 autobus avec 88,7 pour cent, pour un âge moyen de la flotte de camions de 14,0 ans. Pour l'Europe y compris l'AELE et le Royaume-Uni, il s'agit de 7 072 260 camions et 852 180 autobus, auxquels s'ajoutent 302 281 600 voitures de tourisme. L'âge moyen renvoie aux niveaux d'émission Euro V et Euro VI, donc à des véhicules avec catalyseur d'oxydation, filtre à particules et ligne SCR, tous des pièces chaudes isolées en acier allié au chrome. [142]

Dans l'incinération des déchets, l'Europe compte 498 installations, état 2022, dont la France 116, l'Allemagne 91, le Royaume-Uni 57, l'Italie 36 et les Pays-Bas 12. Pour les États-Unis, 75 installations sont indiquées. La Chine exploitait, à la fin de l'année 2023, 975 installations avec 2 151 lignes d'incinération pour une capacité de 327 millions de tonnes par an. Le Japon comptait, pour l'exercice 2024, 991 installations, dont 415 avec production d'électricité. Dans ces quatre régions ensemble, cela représente 2 539 installations. En transposant le rapport chinois de 2,2 lignes par installation, le nombre de lignes d'incinération s'établit à environ 5 600. [144, 145, 146, 147]

Occasions par an

Pour les moteurs à gaz, une entreprise de service Jenbacher cite des entretiens intermédiaires toutes les 10 000 heures de fonctionnement et des révisions générales à 30 000 et 60 000 heures de fonctionnement. Avec 5 000 heures de fonctionnement par an retenues de façon conservatrice, cela donne une révision générale tous les six ans, soit pour la flotte citée plus haut 4 800 à 7 300 événements par an. [148]

Pour les tranches au charbon, une révision tous les deux ans donne environ 3 650 événements par an. Pour les lignes d'incinération, une révision par ligne et par an donne environ 5 600 événements. Pour les navires, une intervention sur la ligne d'échappement tous les deux ans et demi donne environ 44 000 événements. Pour les véhicules utilitaires dans l'Union européenne, un passage en atelier par véhicule et par an donne environ 6,9 millions de passages, soit, pour 250 jours ouvrés, environ 27 000 par jour ouvré.

Pour les voitures de tourisme, la Deutsche Automobil Treuhand indique 0,35 réparation par véhicule et par an, en 2022 c'était 0,40 et en 2019 encore 0,51 ; les entretiens et inspections ne sont pas compris dans ce chiffre. Rapporté aux 255 999 373 voitures de tourisme de l'Union européenne, cela représente environ 90 millions de réparations par an ou 358 000 par jour ouvré. Quelle part en touche le compartiment moteur ou la ligne d'échappement n'est pas relevée. [143, 142]

Les hypothèses de cette section

Ont été retenues une puissance unitaire moyenne pour les moteurs à gaz, une taille moyenne de tranche pour les centrales au charbon, le nombre de lignes d'incinération par installation en dehors de la Chine, les heures de fonctionnement annuelles, l'intervalle de révision pour les centrales, les lignes d'incinération et les navires ainsi que la fréquence des passages en atelier pour les véhicules utilitaires. Les chiffres des fabricants Caterpillar et Rolls-Royce sont des chiffres cumulés de parc et de ventes et non une flotte active. Toutes les applications citées ne comportent pas une isolation dans la fenêtre de température concernée. Les segments ne sont pas additionnés, parce qu'ils ont des unités de comptage différentes et se recoupent ; les moteurs marins par exemple sont déjà en partie contenus dans les chiffres des fabricants.

Ce qui en découle

Les événements retenus dans les quatre segments industriels totalisent environ 58 000 à 61 000 par an, encore sans déduction des recoupements. S'y ajoutent environ 6,9 millions de passages en atelier de véhicules utilitaires et environ 90 millions de réparations de voitures de tourisme dans l'Union européenne, dont la part pertinente n'est pas chiffrée.

Ce n'est donc pas un processus isolé qui est soumis à appréciation. La libération a lieu quotidiennement, dans des compartiments moteurs, sur des véhicules, sur des turbines, dans des centrales et dans des installations d'incinération, dans un nombre qui ne peut pas être chiffré, et majoritairement sans être remarquée. Elle est déclenchée par la substance qui donne son titre à cette analyse.

Chacune de ces occasions serait en Allemagne une activité au sens du point 5.9.3 alinéa 5 de la TRGS 561 allemande. Dans les autres espaces juridiques considérés, l'obligation d'appréciation avant le début des travaux découle des prescriptions citées à la section 25. Une valeur seuil en dessous de laquelle le régime de protection disparaîtrait n'existe dans aucun de ces ordres. Une exclusion de la contamination ne peut pas être conduite de manière solide avec les procédés répandus, parce que le test rapide colorimétrique peut se révéler faussement négatif et qu'il n'existe pas de méthode normalisée pour la matrice isolante (sections 17 et 19). [19]

33. Les obligations en France

La France est membre de l'Union européenne et a transposé la directive 2004/37/CE dans le Code du travail. Le cas traité ici n'y est pas davantage nommé en tant que tel ; les obligations sont formulées indépendamment des substances. Trois circonstances distinguent néanmoins la France de l'Allemagne : la valeur limite est cinq fois plus basse que la valeur européenne, le dépassement d'une VLEP contraignante entraîne l'arrêt du travail, et l'obligation d'investigation pour l'amiante couvre expressément les installations industrielles, les matériels roulants ferroviaires, les navires et les aéronefs. La seule étude de terrain publiée qui décrive par la mesure le constat sur des moteurs dans des conditions de maintenance vient de France et est analysée à la section 19. [5, 151]

Évaluation avant l'activité et substitution

L'article R. 4412-61 du Code du travail exige, pour toute activité susceptible de présenter un risque d'exposition à des substances cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction, que l'employeur évalue « la nature, le degré et la durée de l'exposition des travailleurs », afin de pouvoir apprécier les risques pour la santé et la sécurité et de déterminer les mesures de protection. Selon l'exposé de l'institut français INRS, l'évaluation couvre toutes les expositions susceptibles de créer un risque, y compris l'absorption par la peau, et elle doit être renouvelée avant toute nouvelle activité ainsi qu'en cas de modifications. Cela correspond à la prescription de la directive 2004/37/CE, dont la transposition est assurée en Allemagne par le paragraphe 6 du règlement allemand sur les substances dangereuses. [151, 154]

L'ordre de priorité est le même qu'en Allemagne, l'obligation de documentation est toutefois formulée de manière plus expresse. L'article R. 4412-67 exige en priorité l'évitement du risque. Lorsque celui-ci n'est pas possible, l'article R. 4412-66 exige le remplacement de la substance, de la préparation ou du procédé par des moins dangereux, « dans la mesure où cela est techniquement possible », et retient : « L'employeur consigne le résultat de ses investigations dans le document unique. » Lorsque le remplacement n'est pas non plus réalisable, l'article R. 4412-68 exige l'utilisation en système clos. Un contrôle de substitution non réalisé ou non documenté est ainsi en France un défaut du document unique et pas seulement une mesure omise. Pour l'isolation haute température, cela signifie : des produits de substitution sans oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux sont disponibles, le contrôle est réalisable avec un résultat, et le résultat a sa place dans le document unique. [151, 154]

Minimisation, zones, hygiène et surveillance médicale

Les articles R. 4412-70 à R. 4412-75 exigent l'abaissement du risque au niveau le plus bas atteignable, la limitation des quantités présentes au poste de travail, la limitation du nombre de salariés exposés, l'aspiration et la ventilation ainsi que la délimitation et la signalisation des zones de danger à accès restreint. L'article R. 4412-72 interdit dans les zones contaminées de manger, boire et fumer et exige que les vêtements de protection fournis ne soient pas portés en dehors de l'établissement. Les articles R. 4624-22 à R. 4624-28 soumettent les salariés exposés au suivi individuel renforcé avec visite d'embauche, visite intermédiaire et visites périodiques ; le dossier médical en santé au travail est conservé au moins cinquante ans après la fin de l'exposition. Le contenu recoupe les sections 4.1 et 4.2 de la TRGS 561 allemande ; le délai de conservation correspond à la finalité du registre des expositions allemand. [151, 154, 19]

La valeur limite de 0,001 mg/m³ et la conséquence de son dépassement

Selon l'article R. 4412-149 du Code du travail, une VLEP contraignante de 0,001 mg/m³ en moyenne sur huit heures et une valeur à court terme de 0,005 mg/m³ s'appliquent aux composés du chrome(VI). L'institut français INRS mentionne en même temps le groupe de substances avec l'indication « risque de pénétration percutanée » et comme substances CMR. La valeur limite contraignante européenne est de 0,005 mg/m³ depuis le 17 janvier 2025 ; la valeur française sur huit heures est donc cinq fois plus basse et correspond à la valeur néerlandaise. [152, 153]

La conséquence juridique est formulée plus clairement en France qu'en Allemagne. Le respect d'une VLEP contraignante doit être contrôlé au moins une fois par an par un organisme accrédité selon les articles R. 4412-76 à R. 4412-80, et le dépassement d'une VLEP contraignante entraîne l'arrêt du travail aux postes concernés. La question de savoir si cette valeur est respectée lors de la manipulation d'isolation contenant du chromate, lors du démontage de composants d'échappement ou lors de la révision à l'intérieur d'une installation d'incinération est une question de mesure ; la section 31 décrit pourquoi une mesure générale de l'air ambiant ne reflète pas la libération depuis les nids de poussière et pourquoi le contact cutané n'est pas saisi par les mesures d'air. Avec une valeur limite de ce niveau et une conséquence d'arrêt, le poids se déplace de la mesure vers l'évitement. [151, 154]

Investigation avant le début des travaux : la substance nommée dans six domaines

Pour l'amiante, la France connaît une obligation d'investigation propre avant le début des travaux, le repérage avant travaux. Selon l'article L. 4412-2 et l'article R. 4412-97, celui qui décide d'une opération au cours de laquelle des salariés peuvent être exposés à l'amiante, soit le donneur d'ordre, le maître d'ouvrage ou le propriétaire, fait réaliser la recherche d'amiante. Elle est « adapté à sa nature, à son périmètre et au niveau de risque qu'elle présente » et doit être disponible au moment de l'appel d'offres ; le donneur d'ordre doit mandater un opérateur certifié, fournir les documents et ne doit pas imposer la méthodologie. Un rapport préalable incomplet ne satisfait pas à l'obligation d'information. [155, 159]

Déterminant pour cette analyse est le champ d'application. L'article R. 4412-97 II nomme six domaines : immeubles bâtis, immeubles non bâtis y compris les ouvrages d'art et les infrastructures de transport, matériels roulants ferroviaires et autres matériels roulants de transport, navires, bateaux et engins flottants, aéronefs ainsi que installations, structures ou équipements concourant à la réalisation ou à la mise en œuvre d'une activité. Les arrêtés correspondants sont publiés : 19 juin 2019 pour les navires, 16 juillet 2019 pour les immeubles bâtis, 13 novembre 2019 pour les matériels roulants ferroviaires et les autres véhicules, 24 décembre 2020 pour les aéronefs, 22 juillet 2021 pour les installations, structures et équipements avec application de la partie principale à compter du 1er juillet 2023 et 4 juin 2024 pour les immeubles non bâtis. [155, 156]

Ces six domaines correspondent aux classes d'installations et de véhicules traitées dans cette analyse : installations et équipements industriels, matériels roulants ferroviaires, navires, aéronefs et ouvrages. Pour la substance nommée, il existe là une obligation d'investigation avant le début des travaux, qui incombe au donneur d'ordre, exige un opérateur certifié et doit être achevée avant l'attribution. Pour la formation de chromate sur des pièces chaudes alliées au chrome, il n'existe pas d'obligation correspondante, bien que les mêmes installations soient concernées et que le composé appartienne à la même classe de danger. Selon l'exposé de l'administration française du travail, le repérage absent ou incomplet est passible d'une amende de 3 750 euros et d'une sanction administrative de 9 000 euros. La même asymétrie que celle décrite par cette analyse pour l'Allemagne et la Suisse existe donc en France, et elle y est la plus développée. [155, 156, 159]

Sanctions et la faute inexcusable

L'article L. 4741-1 du Code du travail punit l'employeur qui, par faute personnelle, enfreint les dispositions des livres I à V et des décrets pris pour leur application d'une amende de 10 000 euros. La phrase déterminante est la suivante : « L'amende est appliquée autant de fois qu'il y a de travailleurs de l'entreprise concernés. » En cas de récidive, un an d'emprisonnement et 30 000 euros sont encourus. La sanction se rattache à l'infraction et se multiplie avec le nombre de salariés concernés, non avec le nombre de cas de dommage. [157]

S'y ajoute la faute inexcusable de l'employeur. Selon la jurisprudence de la Cour de cassation, elle est constituée lorsque l'employeur « a eu ou aurait dû avoir conscience du danger » auquel le salarié était exposé et « n'a pas pris les mesures nécessaires pour l'en préserver ». Les conséquences sont la majoration de la rente selon l'article L. 452-2 du Code de la sécurité sociale et une indemnisation complémentaire selon les articles L. 452-1 et L. 452-3. Le critère de responsabilité ne se fonde donc pas sur la connaissance effective, mais sur le devoir de connaître. L'état des sources documenté dans les sections 1, 2 et 16, du brevet jusqu'aux notes de service des années 2019 à 2025, est précisément la matière sur laquelle ce critère est appliqué. [158]

Ce qui existe en France et ce qui manque

Trois contributions françaises existent sur ce sujet : l'étude de terrain de Passeron et autres, dans laquelle 45,4 ng de chrome(VI) ont été mesurés sur la main après le démontage, bien que des gants aient été portés, et dans laquelle le test rapide colorimétrique a donné un résultat négatif à un endroit où l'analyse de laboratoire a mis en évidence 869 ng ; la traduction française du bulletin Caterpillar, qui a fait connaître le sujet dans les ateliers de service français ; et l'initiative de l'Anses sur l'oxyde de chrome(III) au niveau européen. [5, 12, 129]

Je n'ai pas trouvé de publication de l'INRS, d'une Carsat ou de l'administration du travail qui traiterait la formation de chromates sur des pièces chaudes isolées ou dans des résidus d'incinération comme un cas propre. Cela ne dit rien sur la question de savoir si le phénomène se produit dans des installations françaises ; l'étude de terrain montre qu'il y a été mesuré.

Conclusion pour les entreprises en France

Le besoin d'agir est le même qu'en Allemagne, le cadre est plus strict sur trois points. La valeur limite est de 0,001 mg/m³, son respect doit être attesté chaque année par un organisme accrédité, et son dépassement entraîne l'arrêt des travaux. Le contrôle de substitution doit être documenté dans le document unique. Pour la substance nommée, une obligation d'investigation existe précisément dans les catégories d'installations où des chromates se forment. Et la responsabilité se rattache au devoir de connaître le danger. Qui isole, entretient ou déconstruit en France des pièces chaudes alliées au chrome rencontre ainsi un cadre qui reprend juridiquement et directement la question de cette analyse. [151, 152, 155, 158]

34. Les obligations en Suisse

La section 31 indique les raisons pour lesquelles cette analyse cite principalement la réglementation allemande. Pour les entreprises en Suisse, c'est donc la référence qui est nommée, non l'ordre juridique applicable. La Suisse n'est pas membre de l'Union européenne, la directive 2004/37/CE et le règlement allemand sur les substances dangereuses n'y sont pas applicables, et il n'existe pas de réglementation qui nomme le cas traité ici comme le fait la TRGS 561 allemande sous 5.9.3. Les obligations découlent de la loi sur l'assurance-accidents et de l'ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles ; elles sont formulées sans référence à une substance déterminée. [160, 161]

Obligation fondamentale et état de la technique

L'article 82 alinéa 1 de la loi sur l'assurance-accidents oblige l'employeur à prendre, pour prévenir les accidents et maladies professionnels, « toutes les mesures dont l'expérience a démontré la nécessité, que l'état de la technique permet d'appliquer et qui sont adaptées aux conditions données ». L'alinéa 2 exige d'associer les travailleurs à cette tâche, l'alinéa 3 oblige ceux-ci à seconder l'employeur, à utiliser l'équipement de protection individuelle et à employer correctement les dispositifs de sécurité. [160]

L'article 3 alinéa 1 de l'ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles exige de l'employeur toutes les dispositions et mesures de protection qui répondent aux prescriptions de l'ordonnance, aux prescriptions applicables en sus et « aux règles reconnues en matière de technique de sécurité et de médecine du travail » ; selon l'alinéa 2, l'efficacité des mesures doit être contrôlée à des intervalles appropriés. Le renvoi aux règles reconnues n'est pas limité aux publications suisses. La question de savoir si les documents de fabricants et d'exploitants analysés dans la section 16, la TRGS 561 allemande et l'indication de la caisse professionnelle allemande BG ETEM comptent parmi ces règles pour une entreprise suisse est une question d'appréciation, qui se pose dès que les mêmes installations et véhicules sont entretenus en Suisse. [161, 2, 19]

S'y ajoutent trois dispositions de la même ordonnance qui correspondent aux obligations allemandes avant le début des travaux exposées à la section 25. L'article 6 alinéa 1 exige que tous les travailleurs occupés dans l'entreprise soient informés des dangers qui se présentent dans leurs activités et instruits des mesures de prévention correspondantes, lors de l'entrée en service, en cas de modification essentielle des conditions de travail et au besoin de manière répétée. L'article 8 alinéa 1 ne permet de confier des travaux comportant des dangers particuliers qu'à des travailleurs formés à cet effet et exige une surveillance en cas de travail isolé. L'article 11a alinéa 1 oblige l'employeur à faire appel à des médecins du travail et à d'autres spécialistes de la sécurité au travail lorsque cela est nécessaire à la protection de la santé des travailleurs et à leur sécurité. Cela correspond sur le fond au paragraphe 6 alinéa 2b du règlement allemand sur les substances dangereuses, qui exige le recours à une expertise externe en l'absence de compétence technique. [161, 120]

Fabriquer, manipuler, entreposer

Pour les substances dangereuses elles-mêmes, l'article 44 alinéa 1 de l'ordonnance s'applique : lorsque des substances nocives pour la santé sont « fabriquées, traitées, utilisées, conservées, manipulées ou entreposées », ou lorsque des travailleurs peuvent par ailleurs être exposés à des substances à des concentrations nocives pour la santé, les mesures de protection nécessaires au vu des propriétés de ces substances doivent être prises. L'énumération couvre expressément la manipulation et l'entreposage. Le démontage d'un composant chargé en chromates, son stockage intermédiaire et son remontage relèvent donc de la disposition, sans qu'il importe de savoir comment l'isolant est classé à l'état de livraison. [161]

L'alinéa 2 de la même disposition exige que les travailleurs se lavent ou prennent d'autres mesures de nettoyage lorsque la sécurité l'exige, notamment avant les pauses et après la fin du travail ; le temps utilisé à cet effet compte comme temps de travail. Cela couvre la partie hygiénique du régime de protection que la TRGS 561 allemande décrit sous 4.1 et 4.2. [161, 19]

Pas de valeur MAK pour les composés du chrome(VI)

La base légale des valeurs limites suisses est l'article 50 alinéa 3 de l'ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles, selon lequel la Suva peut, après avoir entendu les milieux concernés, édicter des directives sur les concentrations maximales admissibles au poste de travail de substances nocives pour la santé. Dans les explications relatives aux valeurs MAK et BAT, la Suva retient sous 1.3.3.6 que les composés du chrome(VI) sont des substances cancérogènes « sans seuil d'effet cancérogène connu », et, pour ce groupe de substances, qu'une valeur limite fondée sur la santé ne peut pas être déduite. L'obligation de minimisation prend la place de la valeur limite : la durée et le degré de l'exposition doivent être maintenus aussi bas que cela est proportionnellement possible, selon le principe STOP avec la substitution au premier rang. Là où des valeurs sont fixées, la Suva se fonde sur un risque additionnel inférieur à 4:1000 par vie professionnelle. [161, 162]

Pour l'appréciation d'une opération de maintenance en Suisse, il en résulte que le respect d'une concentration dans l'air n'est pas la pierre de touche. En Allemagne et dans l'Union européenne, la valeur limite contraignante de 0,005 mg/m³ s'applique depuis le 17 janvier 2025, et la section 31 décrit pourquoi les mesures atmosphériques ne saisissent ni le contact cutané ni le transfert. En Suisse, la valeur limite disparaît entièrement comme point de référence ; reste l'obligation d'abaisser l'exposition autant que cela est techniquement possible et raisonnablement exigible sur le plan de l'exploitation. Le contrôle de substitution ne se situe donc pas à la fin, mais au début. [162]

Interdiction d'utilisation et obligation de déclaration selon l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques

La Suisse a repris la liste d'autorisation du règlement européen REACH à l'annexe 1.17 de l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). Le chiffre 1 contient des interdictions, le chiffre 2 des exceptions, le chiffre 3 une obligation de déclaration. Pour les composés du chrome(VI), selon les explications de la Suva, l'exception s'applique aux procédés dont les produits finis ne contiennent pas le chrome sous forme hexavalente ; dans ce cas, l'obligation de minimisation est considérée comme remplie lorsque l'exposition moyennée sur huit heures ne dépasse pas 0,001 mg/m³, calculée en chrome. Cette valeur n'est donc pas une valeur MAK générale, mais une condition de l'exception. [162, 163]

L'obligation de déclaration est aménagée de manière concrète. Celui qui utilise du trioxyde de chrome, les acides qui en résultent et leurs oligomères ou du dichromate de sodium sans que le produit fini contienne du chrome sous forme hexavalente doit adresser chaque année, jusqu'au 31 mars, une déclaration pour l'année civile précédente à l'organe suisse de réception des notifications des produits chimiques. Les entreprises qui chroment des pièces sont expressément mentionnées. [164]

Sont donc visés les composés fabriqués industriellement qu'une entreprise achète. Le chromate de calcium et le chromate de sodium qui se forment à l'interface entre l'isolant et la pièce chaude alliée au chrome, personne ne les a fabriqués, achetés ou déclarés ; ils ne figurent sur aucune de ces listes. La question de savoir si la manipulation, l'entreposage et la réutilisation d'un composant chargé en chromates constituent une utilisation au sens du droit des produits chimiques se pose en Suisse sous la même forme que sous le règlement REACH à la section 25. Les obligations découlant de l'article 44 de l'ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles s'appliquent indépendamment de cela, parce qu'elles se rattachent aux propriétés de la substance et non à son origine. [163, 161]

Travaux de construction : la substance nommée et les autres

Pour les travaux de construction, l'ordonnance sur les travaux de construction s'y ajoute. L'article 3 alinéa 1 exige une planification qui réduise autant que possible les risques d'accident, de maladie professionnelle et d'atteinte à la santé. L'alinéa 2 exige, en cas de soupçon de substances particulièrement nocives pour la santé telles que l'amiante ou les polychlorobiphényles, de déterminer et d'apprécier les dangers de manière approfondie et de planifier sur cette base les mesures nécessaires. L'alinéa 3 oblige l'entrepreneur à examiner, avant la conclusion du contrat d'entreprise, quelles mesures sont nécessaires pour la sécurité au travail et la protection de la santé. L'alinéa 4 exige que les mesures dépendant du résultat de cette appréciation soient réglées dans le contrat d'entreprise de façon aussi concrète que les autres contenus contractuels. L'alinéa 7 lie celui qui transmet l'exécution à la mise en œuvre par l'employeur mandaté. [165]

La directive 6503 de la Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail montre quel régime la substance nommée déclenche. Sous 5.1, elle exige la détermination et l'appréciation précises des dangers avant le début des travaux, en renvoyant à l'article 3 alinéa 2 de l'ordonnance sur les travaux de construction. Sous 6.1.1, les procédés générant de la poussière sont à éviter et les fibres libérées à aspirer à la source, sous 6.1.1.1 seuls des aspirateurs de la classe de poussière H peuvent être utilisés, sous 6.1.3.1 une protection respiratoire de type FFP3 est en règle générale requise pour les degrés de danger moyens et un appareil isolant ou à ventilation assistée pour le degré le plus élevé, sous 6.1.3.2 une combinaison de la catégorie 3 type 5/6 lorsqu'une contamination ne peut pas être exclue. Pour les assainissements, la directive exige des zones séparées avec interdiction d'accès, une dépression d'au moins 20 pascals avec surveillance continue, enregistrement et alarme, un sas pour personnes à quatre chambres, la présence permanente d'une spécialiste ou d'un spécialiste sur le chantier et le retrait humide contrôlé. Selon l'article 86 de l'ordonnance sur les travaux de construction, les travaux doivent être annoncés à la Suva au moins quatorze jours avant leur exécution. [166, 165]

La même asymétrie que celle décrite par cette analyse pour l'Allemagne existe ainsi en Suisse. La substance nommée dans l'ordonnance déclenche une obligation d'investigation propre et un régime de protection entièrement formulé. Pour la formation de chromates sur des pièces chaudes isolées alliées au chrome, il n'existe pas d'entrée correspondante, bien que la substance appartienne à la même classe de danger et soit libérée lors des activités décrites. Le champ d'application doit être pris en compte : l'ordonnance sur les travaux de construction s'applique aux travaux de construction, non à la maintenance de moteurs, de turbines et de véhicules. Pour ces activités, la loi sur l'assurance-accidents et l'ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles restent les prescriptions applicables. [165, 161, 160]

Ce qui n'existe pas en Suisse

Je n'ai pas trouvé de publication de la Suva ou de la Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail qui nomme la formation de chromates sur des pièces chaudes isolées ou dans des résidus d'incinération. Cela ne dit rien sur la question de savoir si le phénomène se produit dans des installations suisses. Les documents analysés dans la section 16 concernent des moteurs, des véhicules et des systèmes d'isolation qui sont exploités et entretenus en Suisse comme en Allemagne, en Autriche ou aux Pays-Bas, et la réaction thermochimique ne se règle pas sur les frontières nationales.

Conclusion pour les entreprises en Suisse

Le besoin d'agir ne diffère pas de celui en Allemagne, le chemin pour y parvenir, si. En Allemagne, la TRGS 561 nomme le cas et décrit le régime de protection ; en Suisse, la chaîne passe par la détermination des dangers et les mesures nécessaires selon les articles 3 et 44 de l'ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles, par le recours à des spécialistes de la sécurité au travail en l'absence de compétence technique propre selon l'article 11a, par l'obligation de minimisation pour les substances cancérogènes sans seuil d'effet avec la substitution au premier rang et, pour les travaux de construction, par l'examen avant la conclusion du contrat d'entreprise selon l'article 3 alinéas 3 et 4 de l'ordonnance sur les travaux de construction. Qui invoque l'absence d'entrée pour la substance invoque l'absence d'une désignation, non l'absence d'une obligation. [160, 161, 162, 165]

35. Les obligations en Allemagne

La section 31 nomme les raisons pour lesquelles le corpus réglementaire allemand est majoritairement cité dans cette analyse. La présente section rassemble en un seul endroit les prescriptions allemandes en vigueur et indique pour chaque énoncé sa source. Elle répète ce faisant des points qui figurent ailleurs dans leur contexte, afin qu'une entreprise en Allemagne n'ait pas à rassembler ses obligations à partir de l'ensemble de l'analyse.

La notion de substance dangereuse couvre aussi ce qui ne se forme qu'ensuite

Le règlement allemand sur les substances dangereuses (GefStoffV) ne se rattache pas à l'achat. Le paragraphe 2 alinéa 1 numéro 3 compte parmi les substances dangereuses les « substances, mélanges et articles à partir desquels, lors de la fabrication ou de l'utilisation, des substances au sens du numéro 1 ou du numéro 2 se forment ou sont libérées ». Le numéro 4 couvre en complément les substances et mélanges qui, en raison de leurs propriétés et de la manière dont ils sont présents ou utilisés au poste de travail, peuvent mettre en danger la santé et la sécurité des salariés. Un chromate qui se forme à l'interface entre l'isolation et la pièce chaude est ainsi couvert, bien que personne ne l'ait acheté et que personne n'ait voulu le fabriquer. [198]

La notion d'activité est tout aussi large. Le paragraphe 2 alinéa 5 phrase 1 nomme « tout travail avec des substances, des mélanges ou des articles, y compris la fabrication, le mélange, l'usage et la consommation, le stockage, la conservation, le traitement et la transformation, le transvasement et le reconditionnement, l'enlèvement, l'élimination et la destruction ». Le démontage, le stockage, le remontage et l'élimination d'une isolation contaminée sont ainsi des activités au sens du règlement. [198]

L'évaluation des risques commence donc par un constat et non par une mesure. Le paragraphe 6 alinéa 1 phrase 1 exige de l'employeur qu'il détermine « si les salariés exercent des activités avec des substances dangereuses ou si, lors d'activités, des substances dangereuses peuvent se former ou être libérées ». Le paragraphe 6 alinéa 5 phrases 1 et 2 nomme expressément le groupe de cas pertinent ici : sont à prendre en considération les activités pour lesquelles, même après épuisement de l'ensemble des mesures techniques de protection, la possibilité d'une mise en danger subsiste, et cela vaut « en particulier pour les travaux de maintenance, y compris les travaux d'entretien ». Pour les substances sans classification du fournisseur, le paragraphe 6 alinéa 3 phrase 1 exige que l'employeur procède lui-même à la classification. [198]

Investigation avant le début des travaux et obligations du donneur d'ordre

Depuis le 5 décembre 2024, le règlement comporte au paragraphe 5a une prescription propre pour le donneur d'ordre d'activités sur des installations de construction ou techniques. Il doit, avant le début des activités, mettre à la disposition de l'entreprise exécutante, par écrit ou par voie électronique, toutes les informations dont il dispose sur l'histoire de la construction ou de l'utilisation concernant des substances dangereuses présentes ou supposées, et il doit recourir à cette fin, dans la limite d'un effort raisonnable, aux documents qui lui sont accessibles. La phrase 3 dispose que les substances dangereuses au sens de cette prescription sont celles « qui sont libérées par les activités et peuvent conduire à une mise en danger particulière de la santé ». [199]

Du côté de l'entreprise exécutante se trouve le paragraphe 6 alinéa 2c. Si une investigation technique est nécessaire pour déterminer si des substances dangereuses sont libérées lors des activités sur des installations de construction ou techniques et peuvent constituer une mise en danger de la santé, cette investigation est « une condition de l'exécution des activités ». L'absence d'examen n'est donc pas un état dans lequel il est permis de travailler. [199]

Le libellé est « installations de construction ou techniques ». Le règlement ne dit pas si les véhicules, les navires et les locomotives en relèvent, et je n'ai pas trouvé d'aide à l'interprétation sur ce point. Pour les installations fixes, donc pour les unités de cogénération, les chaudières, les tuyauteries et les turbines, la question ne se pose pas. [199]

L'évaluation des risques est à documenter avant la prise en charge de l'activité et ne peut, selon le paragraphe 6 alinéa 11 phrase 1, être réalisée que par des personnes qualifiées. Le paragraphe 6 alinéa 8 phrase 2 numéro 5 exige dans la documentation « une justification lorsque, lors d'activités avec des substances dangereuses cancérogènes ou mutagènes sur les cellules germinales de catégorie 1A ou 1B, des salariés n'ont pas été inscrits au registre des expositions prévu au paragraphe 10a alinéa 1 phrase 1 ». La non-inscription est donc soumise à obligation de justification. [198]

Substitution et ordre de priorité des mesures

Le paragraphe 7 alinéa 3 exige, sur la base du résultat du contrôle de substitution, « de procéder en priorité à une substitution », et cela par des substances, mélanges, articles ou procédés qui, dans les conditions d'utilisation respectives, ne sont pas dangereux ou le sont moins. Le paragraphe 7 alinéa 4 ordonne les étapes suivantes : conception des procédés et formes d'utilisation à faible émission selon l'état de la technique, ensuite mesures techniques collectives à la source du danger et mesures organisationnelles, et seulement ensuite mesures individuelles y compris l'équipement de protection individuelle. Le paragraphe 7 alinéa 5 phrase 2 dispose que l'utilisation d'un équipement de protection individuelle contraignant ne peut être une mesure permanente. [198]

Pour les substances cancérogènes de catégorie 1A ou 1B, le paragraphe 10 alinéa 1 durcit cet ordre. Si une substitution n'est pas techniquement possible, l'employeur doit assurer la fabrication et l'utilisation en système clos ; si cela n'est pas non plus techniquement possible, il doit minimiser l'exposition selon l'état de la technique. Le paragraphe 10 alinéa 4 nomme les cas dans lesquels un équipement de protection individuelle doit être porté, parmi lesquels les activités dans le domaine à risque élevé et une exposition sensiblement accrue à des substances dangereuses sans valeur limite d'exposition professionnelle ni concentration de tolérance. [198]

La TRGS 561 allemande met en œuvre cet ordre de priorité pour le cas traité ici. La section 4.1 alinéa 1 exige le contrôle de substitution et nomme expressément l'examen de la question « de savoir si des matériaux pulvérulents peuvent être remplacés par des matériaux moins poussiérants ». La section 4.2 alinéa 1 phrase 1 qualifie les mesures d'évitement et de réduction de la production de poussière d'« impérativement nécessaires ». La section 5.9.3 alinéa 5 rattache le régime de protection complémentaire aux activités sur des composants industriels « sur lesquels une charge en chrome(VI) est présente ou pour lesquels elle ne peut être exclue ». [19]

La valeur de 1 µg/m³ et ce qu'elle n'apporte pas

Pour les composés du chrome(VI), il n'existe pas en Allemagne de valeur limite d'exposition professionnelle. La TRGS 910 mentionne au tableau 1 une concentration de tolérance de 1 µg/m³ pour la fraction inhalable, avec un facteur de dépassement de 8 et la mention « voir TRGS 561 » ; aucune concentration d'acceptation n'est fixée pour cette entrée. La concentration se rapporte à la teneur élémentaire du métal et est définie comme moyenne de poste sur huit heures. [101]

La TRGS 561 chiffre à la section 3.3.4 alinéa 2 le risque correspondant : pour une exposition de 1 µg/m³ pendant toute la vie professionnelle, il en résulte un risque statistique additionnel de cancer du poumon de l'ordre d'environ 4:1000. Au-dessus de cette valeur, il existe un risque élevé, en dessous un risque non quantifiable, plus faible. La règle exige de respecter la concentration et de viser une minimisation supplémentaire aussi poussée que possible. [19]

Les obligations issues des paragraphes 6 et 7 du règlement allemand sur les substances dangereuses ne dépendent pas du dépassement de cette valeur. Une mesure d'air ne répond en outre ni à la question du contact cutané ni à celle de la contamination des surfaces ; pour la mise en danger par contact cutané, la TRGS 401 allemande s'applique. [198, 99]

Registre des expositions

Depuis la modification du 2 décembre 2024, le registre des expositions figure dans une prescription propre. Le paragraphe 10a alinéa 1 phrase 1 exige un registre des salariés qui exercent des activités avec des substances dangereuses cancérogènes, mutagènes sur les cellules germinales ou toxiques pour la reproduction de catégorie 1A ou 1B « pour lesquels l'évaluation des risques révèle une mise en danger de leur santé », avec indication de l'activité ainsi que du niveau et de la durée de l'exposition. Selon l'alinéa 2, il est à conserver, pour les substances dangereuses cancérogènes ou mutagènes sur les cellules germinales, pendant 40 ans après la fin de l'exposition ; à la fin de la relation de travail, le salarié reçoit un extrait. Selon l'alinéa 3, l'employeur peut satisfaire à ces obligations en transmettant les données à l'organisme d'assurance accidents compétent ou à sa fédération. [200]

La banque centrale de données d'exposition de l'assurance accidents légale allemande est la voie établie à cet effet. Elle y est décrite comme une offre gratuite permettant aux employeurs de satisfaire à leur obligation issue du règlement allemand sur les substances dangereuses ; en cas d'utilisation, l'obligation de remise et d'archivage est transférée à l'assurance accidents légale allemande, et les données sont conservées au moins 40 ans après la fin de l'exposition. [202]

La version de la TRGS 410 allemande du 25 septembre 2026 a introduit pour le chrome(VI) un critère d'inscription propre. Selon la section 4 alinéa 1 numéro 10, les salariés sont à inscrire lorsque, « lors d'activités avec des composés du chrome(VI), la concentration de 1 µg/m³ est dépassée en moyenne de poste ». D'autres critères du même alinéa s'appliquent indépendamment de cela, parmi lesquels le numéro 5, lorsqu'une protection respiratoire doit être portée comme mesure de protection, et le numéro 7, lorsqu'il n'existe pas d'information suffisante sur le niveau d'une exposition possible. [201]

La section 4 alinéa 4 de la même règle couvre directement les activités traitées ici. Les salariés sont également à inscrire lorsque des travaux de réparation et de remise en état, des travaux d'entretien, des travaux de nettoyage, des prélèvements sur des systèmes non clos, des travaux de démolition ou des activités dans des zones contaminées sont exécutés de manière répétée et qu'une mise en danger ne peut être exclue sur la base de l'évaluation des risques. L'alinéa 3 nomme la mise en danger dermique comme motif d'inscription propre. Pour le niveau de l'exposition, la section 5 alinéa 1 dispose que les effets du port d'un équipement de protection individuelle restent hors de compte. [201]

L'obligation s'impose aussi aux entreprises extérieures. La section 3 alinéa 7 constate que l'évaluation des risques et la tenue du registre valent également pour elles, qu'elles doivent se procurer auprès du donneur d'ordre les informations nécessaires et que le donneur d'ordre doit mettre ces informations à disposition. Pour les travailleurs intérimaires, selon l'alinéa 8, l'entreprise utilisatrice documente pendant la mise à disposition, et l'entreprise de travail temporaire reprend ensuite les indications dans son propre registre. [201]

Suivi de médecine du travail et maladie professionnelle

L'annexe partie 1 alinéa 1 numéro 1 du règlement allemand sur le suivi de médecine du travail mentionne les « composés du chrome VI » dans la liste des substances. Un suivi obligatoire est notamment à faire assurer lorsqu'une exposition répétée ne peut être exclue et que la substance dangereuse est cancérogène de catégorie 1A ou 1B. Selon le paragraphe 4 alinéa 2, l'employeur ne peut faire exercer une activité que si le salarié a participé au suivi obligatoire. Indépendamment de cela, un suivi obligatoire existe selon la partie 1 alinéa 1 numéro 2 lettre i pour les activités avec des laines haute température, dans la mesure où des poussières de fibres classées comme cancérogènes peuvent y être libérées. [203]

L'annexe 1 du règlement allemand sur les maladies professionnelles mentionne sous le numéro 1103 les « maladies dues au chrome ou à ses composés ». Le numéro de liste est formulé de manière ouverte et n'est limité à aucun composé déterminé ni à aucune activité déterminée. [204]

Surveillance et sanctions

La surveillance est une mission étatique. Le paragraphe 21 alinéa 1 de la loi allemande sur la protection au travail l'attribue aux autorités compétentes des Länder ; depuis l'année civile 2026, selon le paragraphe 21 alinéa 1a, au moins 5 pour cent des établissements présents dans le Land sont à visiter chaque année, et il n'est pas possible de s'écarter de ce quota minimal de visites par le droit du Land. Le paragraphe 22 alinéa 2 donne le pouvoir d'examiner les procédés de travail et de procéder à des mesures, le paragraphe 22 alinéa 3 le pouvoir d'injonction et, en cas d'inexécution, l'interdiction du travail concerné. [205]

Le règlement allemand sur les substances dangereuses complète ces pouvoirs. Selon le paragraphe 19 alinéa 3 numéro 3, l'autorité compétente peut ordonner que l'employeur fasse cesser le travail lorsqu'il ne prend pas sans délai ou pas dans le délai imparti les mesures nécessaires ordonnées. Selon le paragraphe 19 alinéa 4, il lui est à présenter sur demande une preuve que l'évaluation des risques a été établie avec la qualification requise. [200]

Les organismes d'assurance accidents exercent en outre une surveillance. Le paragraphe 17 alinéa 1 du septième livre du Sozialgesetzbuch allemand leur attribue la surveillance des mesures de prévention et le conseil aux entreprises. Le paragraphe 19 alinéa 1 donne aux agents de contrôle le pouvoir d'injonction dans le cas particulier et, en cas de danger imminent, des injonctions immédiatement exécutoires, le paragraphe 19 alinéa 2 numéro 5 le pouvoir de déterminer ou de faire déterminer aux frais de l'entrepreneur la présence et la concentration de substances dangereuses, et le numéro 6 le pouvoir de prélèvement. Cette prescription ne comporte pas de pouvoir de fermeture ; la fermeture est attribuée aux autorités étatiques. [206, 205]

Les contraventions administratives figurent au paragraphe 22 alinéa 1 du règlement allemand sur les substances dangereuses. Sont visées notamment l'évaluation des risques non documentée, documentée de manière incorrecte ou documentée tardivement, l'inventaire des substances dangereuses non tenu ou tenu de manière incorrecte, la prise en charge d'une activité contrairement au paragraphe 7 alinéa 1, l'utilisation permanente d'un équipement de protection individuelle contraignant ainsi que le registre des expositions non tenu, tenu de manière incorrecte ou incomplète et non conservé pendant la durée prescrite. [103]

Le montant découle de la loi allemande sur les produits chimiques. Pour le renvoi pertinent ici, un cadre allant jusqu'à 50 000 euros s'applique selon le paragraphe 26 alinéa 3. Quiconque, par un tel acte, met intentionnellement en danger la vie ou la santé d'autrui encourt, selon le paragraphe 27 alinéa 2, une peine privative de liberté pouvant aller jusqu'à cinq ans ou une peine pécuniaire ; en cas de négligence, le cadre est, selon le paragraphe 27 alinéa 4 numéro 2, de deux ans au plus. Selon la loi allemande sur la protection au travail, le cadre de l'amende pour les infractions à des injonctions exécutoires va jusqu'à 30 000 euros, et le paragraphe 26 érige en infraction pénale la répétition opiniâtre ainsi que la mise en danger intentionnelle de la vie ou de la santé d'un salarié. [207, 205]

Déchets

Le règlement allemand sur la liste des déchets (AVV) ne connaît pas de code déchet qui désigne les isolants chargés en chromate. L'attribution passe par les paires formées d'une entrée pertinente au regard du danger et d'une entrée non pertinente au regard du danger. Pour les matériaux isolants autres que l'amiante, le code 17 06 03* « autres matériaux d'isolation à base de ou contenant des substances dangereuses » entre en considération, avec 17 06 04 comme pendant. Pour les revêtements et matériaux réfractaires valent 16 11 03* pour les procédés métallurgiques et 16 11 05* pour les procédés non métallurgiques, avec 16 11 04 et 16 11 06 comme pendants. Pour les chromates séparés vaut 16 09 02* « chromates, par exemple chromate de potassium, dichromate de potassium ou de sodium ». L'astérisque signifie, selon le paragraphe 3 alinéa 1, dangereux au sens du paragraphe 48 de la loi allemande sur l'économie circulaire. [208]

Quelle entrée de la paire s'applique est déterminé par la teneur. L'introduction de l'annexe dispose au numéro 2.2.1 qu'un déchet est classé comme dangereux lorsqu'il contient des substances dangereuses pertinentes en raison desquelles il présente une ou plusieurs des propriétés énumérées à l'annexe III de la directive 2008/98/CE. Pour la propriété HP 7 cancérogène, pertinente ici, la limite de concentration pour une substance classée comme cancérogène de catégorie 1A ou 1B avec H350 est de 0,1 pour cent. [208, 69]

Le paragraphe 9a alinéa 1 de la loi allemande sur l'économie circulaire interdit « le mélange, y compris la dilution, de déchets dangereux avec d'autres catégories de déchets dangereux ou avec d'autres déchets, substances ou matières ». L'alinéa 3 oblige les producteurs et les détenteurs à séparer sans délai les déchets mélangés de manière illicite, dans la mesure où cela est nécessaire à une valorisation régulière et sans nuisance. Le paragraphe 326 alinéa 1 numéro 2 du Strafgesetzbuch allemand érige en infraction pénale le maniement illicite de déchets cancérogènes pour l'homme. [209, 107]

L'écart avec le régime de l'amiante

Pour l'amiante, il existe en Allemagne une procédure propre. La TRGS 519 allemande exige à la section 2.7 la preuve de la compétence technique par la participation réussie à une formation reconnue par l'autorité avec examen ; la preuve vaut six ans. Le règlement allemand sur les substances dangereuses exige au paragraphe 11a alinéa 3 un agrément administratif pour les activités dans le domaine à risque élevé, depuis le 20 décembre 2025 au paragraphe 11a alinéa 4a une autorisation pour les travaux de démolition dans le domaine à risque faible et moyen, et au paragraphe 11a alinéa 4 la déclaration au plus tard une semaine avant le début des activités. La section 14.5 de la TRGS 519 ne permet la levée des mesures de protection que lorsqu'un contrôle visuel ne montre aucune salissure résiduelle visible et qu'une mesure donne une concentration de fibres inférieure à 500 fibres par mètre cube. [97, 200]

Pour le chrome(VI) sur des pièces chaudes isolées, aucun de ces points n'existe. Il n'y a pas d'obligation de compétence technique, pas d'agrément, pas d'autorisation, pas de déclaration avant le début et pas de mesure de libération. La seule intervention de l'autorité est la communication prévue au paragraphe 10a alinéa 5 du règlement allemand sur les substances dangereuses, et elle a lieu dans les deux mois suivant la prise en charge de l'activité et seulement lorsque la valeur limite d'exposition professionnelle n'est pas respectée ou que le travail a lieu dans le domaine à risque élevé. La section 25 décrit la même asymétrie pour les autres ordres juridiques examinés. [200]

Ce que le corpus réglementaire allemand nomme

L'Allemagne est, parmi les ordres juridiques examinés ici, le seul dans lequel le cas d'application dispose d'une section propre dans le corpus réglementaire infralégislatif. La TRGS 561 décrit à la section 5.9.3 que des composés du chrome(VI) peuvent se former sur des composants industriels alliés au chrome sollicités thermiquement, que ceux-ci peuvent se déposer dans des isolants ou des pâtes de montage et qu'une exposition peut suivre lors de travaux de démontage et de maintenance. Comme facteurs d'influence, elle nomme la température de l'acier, la part de chrome de l'alliage, le temps de réaction, la présence d'oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux provenant d'isolants ou de pâtes de montage ainsi que l'oxygène et l'humidité de l'air à proximité de la surface. Sur le mécanisme, elle retient qu'il n'est actuellement pas encore élucidé. [19]

Trois caisses professionnelles allemandes décrivent le même état de fait sur leurs pages sectorielles. La BG ETEM nomme la plage de température d'environ 350 à 800 °C et le contact d'aciers alliés au chrome avec des isolants ou des pâtes de montage contenant des métaux alcalins et alcalino-terreux. La BG Verkehr nomme des dépôts jaunâtres sur l'acier inoxydable lors du retrait de matériaux isolants et retient que la question fait l'objet d'études propres pour les salles des machines de navires et les moteurs d'automobiles. La BG BAU distingue selon la présence d'isolants thermiques contenant des métaux alcalins et alcalino-terreux et indique que la coordination est assurée par la BG ETEM. [2, 210, 211]

Le règlement allemand sur les substances dangereuses lui-même ne nomme pas le cas. Il le couvre par la notion de substance dangereuse, la notion d'activité et l'obligation de constat du paragraphe 6 alinéa 1. La TRGS 910 ne le nomme pas et renvoie seulement, dans la colonne des mentions, à la TRGS 561. Le règlement allemand sur la liste des déchets ne connaît pas de code propre. Le règlement allemand sur le suivi de médecine du travail nomme séparément les composés du chrome(VI) et les laines haute température, sans les relier. [198, 101, 208, 203]

Ce qui en découle pour une entreprise en Allemagne

Des prescriptions citées résulte un ensemble de documents vérifiable. En font partie l'évaluation des risques documentée et établie avec la qualification requise pour l'appariement de matériaux formé d'une pièce chaude alliée au chrome et d'un isolant à charge basique ainsi que le contrôle de substitution réalisé et justifié selon le paragraphe 7 alinéa 3. En font partie l'information du donneur d'ordre selon le paragraphe 5a et l'investigation technique selon le paragraphe 6 alinéa 2c. En font partie la consigne d'exploitation et l'instruction annuelle selon le paragraphe 14. En font partie l'inscription au registre des expositions ou sa justification selon le paragraphe 10a combiné avec la TRGS 410, l'organisation du suivi obligatoire et la classification du déchet selon la teneur. [198, 199, 200, 201, 203, 208]

Aucun de ces points ne suppose une mesure, et aucun ne disparaît du fait d'un résultat de mesure négatif. L'obligation naît avec la possibilité de la formation, et l'exclusion de cette possibilité est le point qui devrait être établi.

36. Les obligations dans l'Union européenne

Les corpus réglementaires nationaux des États membres transposent le droit de l'Union. La présente section rassemble ce que le droit de l'Union exige lui-même, en distinguant le droit de la protection au travail du droit des substances et du droit des déchets. L'exécution incombe aux États membres ; pour une entreprise, les obligations naissent du droit national respectif.

Champ d'application de la directive 2004/37/CE

La directive s'applique selon l'article 3 paragraphe 1 « aux activités dans lesquelles les travailleurs sont ou peuvent être exposés, du fait de leur travail, à des agents cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction ». Elle se rattache ainsi à l'exposition lors d'une activité. L'article 2 point a) i) définit l'agent cancérigène par les critères de classification de l'annexe I du règlement (CE) n° 1272/2008 et ne comporte aucune restriction aux substances achetées, mises sur le marché ou mises en œuvre délibérément. Le chromate de calcium et le chromate de sodium sont classés de manière harmonisée à l'annexe VI partie 3 dudit règlement comme cancérogènes de catégorie 1B. [212, 63]

Par ailleurs, l'article 2 point a) ii) couvre les substances et mélanges qui sont « libérés par un procédé visé à cette annexe ». L'annexe I comporte à cette fin des entrées liées à des procédés, parmi lesquelles les travaux exposant à la poussière de silice cristalline alvéolaire et aux émissions de moteurs diesel. Le législateur de l'Union a nommé la finalité de cette annexe au considérant 17 de la directive (UE) 2017/2398 : pour la poussière de silice cristalline alvéolaire produite lors d'un procédé de travail, il n'existe pas de classification au titre du règlement (CE) n° 1272/2008, raison pour laquelle son inscription à l'annexe I serait indiquée. Pour une substance issue d'un procédé qui porte une classification harmonisée, le point i) s'applique donc déjà. [212, 86]

L'article 3 paragraphe 2 exige, pour toute activité au cours de laquelle une exposition peut survenir, la détermination de la nature, du degré et de la durée de l'exposition et la réévaluation lors de toute modification des conditions. L'article 3 paragraphe 3 dispose que, lors de l'évaluation du risque, « tous les autres modes d'exposition, par exemple l'absorption dans et/ou par la peau, sont à prendre en considération ». [18]

Remplacement, système clos, minimisation

L'article 4 paragraphe 1 exige de l'employeur qu'il réduise l'utilisation, « notamment en le remplaçant, dans la mesure où cela est techniquement possible, par une substance, un mélange ou un procédé qui, dans ses conditions d'emploi, n'est pas ou est moins dangereux ». L'article 5 paragraphe 2 exige, dans le cas où la substitution n'est pas techniquement possible, la fabrication et l'utilisation en système clos. L'article 5 paragraphe 3 exige, dans le cas où cela n'est pas non plus techniquement possible, que l'exposition soit « réduite à un niveau aussi bas qu'il est techniquement possible ». [212]

L'article 5 paragraphe 5 nomme les mesures particulières. Le point c) exige la conception des procédés de travail et des mesures techniques avec pour objectif d'éviter ou de maintenir aussi faible que possible la libération au poste de travail. Le point l) exige d'assurer un stockage, une manipulation et un transport sûrs, notamment par des récipients hermétiquement clos et clairement étiquetés. Le point m) exige la même chose pour la collecte, le stockage et l'évacuation des déchets. Pour le démontage, le stockage intermédiaire et l'élimination d'une isolation contaminée, les trois étapes sont ainsi directement réglées. [212]

L'ordre de priorité général figure dans la directive-cadre 89/391/CEE. L'article 6 paragraphe 2 nomme comme principes notamment l'évitement des risques, la lutte contre les risques à la source, la prise en compte de l'état de la technique et la priorité de la protection collective sur la protection individuelle. L'article 9 paragraphe 1 point a) exige de disposer d'une évaluation des risques existants au poste de travail ; le paragraphe 2 laisse aux États membres l'aménagement de la documentation. [213]

La valeur limite contraignante

L'annexe III partie A de la directive 2004/37/CE comporte l'entrée « composés du chrome(VI) qui sont des agents cancérigènes au sens de l'article 2 point a) i) (en chrome) » avec une valeur limite de 0,005 mg/m³ en moyenne pondérée dans le temps sur huit heures. Aucune valeur à court terme n'est fixée, et la colonne des mentions est vide. La colonne transitoire indique 0,010 mg/m³ jusqu'au 17 janvier 2025 et 0,025 mg/m³ jusqu'à la même date pour les travaux de soudage et de coupage au plasma ainsi que les procédés similaires générant des fumées. [212, 86]

L'article 5 paragraphe 4 dispose que l'exposition ne doit pas dépasser les valeurs limites de l'annexe III. Les obligations issues des articles 3, 4 et 5 paragraphes 1 à 3 ne dépendent pas du fait que cette valeur soit atteinte ; elles se rattachent au résultat de l'évaluation. L'Allemagne applique pour le chrome(VI), avec 1 µg/m³, une valeur plus basse, les Pays-Bas avec 0,001 mg/m³ la même valeur plus basse, l'une et l'autre calculées en chrome. [212, 101]

Registre, surveillance de la santé et quarante ans

La liste des travailleurs exposés figure à l'article 12 point c). L'employeur tient selon cette disposition une liste actualisée des travailleurs occupés à des activités pour lesquelles l'évaluation révèle un risque, « avec l'indication de l'exposition à laquelle ils ont pu être soumis », dans la mesure où cette information est disponible. L'article 15 paragraphe 1 exige, pour les agents cancérigènes et mutagènes, la conservation de cette liste et du dossier médical pendant au moins 40 ans après la fin de l'exposition. [212]

L'article 15 paragraphe 2 règle le cas de la cessation d'activité : si l'entreprise cesse son activité, ces documents sont à mettre à la disposition de l'autorité compétente. L'article 14 paragraphe 8 exige de déclarer à l'autorité compétente tous les cas de cancer constatés, conformément au droit national, comme résultant d'une exposition au travail. L'article 10 paragraphe 2 dispose que les coûts des mesures d'hygiène et de protection ne peuvent être à la charge des travailleurs. [212]

Droit des substances : classification, autorisation, restriction

La classification harmonisée figure à l'annexe VI partie 3 du règlement (CE) n° 1272/2008. Le chromate de calcium porte le numéro index 024-008-00-9 et est classé comme cancérogène de catégorie 1B avec H350. Le chromate de sodium porte le numéro index 024-018-00-3 et est classé comme cancérogène, mutagène sur les cellules germinales et toxique pour la reproduction, chaque fois de catégorie 1B. L'entrée collective 024-017-00-8 couvre les « composés du chrome(VI), à l'exception du chromate de baryum et de ceux qui sont nommément désignés dans la présente annexe » avec H350i. [63]

L'obligation d'autorisation prévue au titre VII du règlement (CE) n° 1907/2006 concerne les substances inscrites à l'annexe XIV. Y figurent notamment le trioxyde de chrome comme entrée 16, le dichromate de sodium comme entrée 18, le chromate de potassium comme entrée 21 et le chromate de sodium comme entrée 22, chaque fois avec une date d'expiration en 2017. Le chromate de calcium ne figure pas à l'annexe XIV. L'article 56 paragraphe 1 interdit aux fabricants, aux importateurs et aux utilisateurs en aval de mettre sur le marché en vue d'une utilisation une substance de l'annexe XIV ou de l'utiliser eux-mêmes, en l'absence d'autorisation ou d'exemption. [214, 66]

La notion d'utilisation est définie largement à l'article 3 point 24 et comprend notamment le stockage, la mise à disposition et le traitement. L'article 2 paragraphe 2 exclut les déchets de la notion de substance du règlement. La question de savoir si la formation d'un chromate sur un composant et son utilisation ultérieure constituent une utilisation au sens de ce règlement n'est pas traitée dans les textes juridiques et les documents officiels examinés ; je n'ai pas trouvé de source sur ce point. [60, 66]

L'Agence européenne des produits chimiques a publié le 29 avril 2025 une proposition de restriction pour les substances du chrome(VI). Elle prévoit une interdiction dont six catégories d'utilisation devraient être exemptées, pour autant qu'elles respectent des limites fixées pour l'exposition des travailleurs et pour les émissions dans l'environnement ; ces catégories sont la formulation de mélanges, la galvanisation sur substrats plastiques et sur substrats métalliques, l'utilisation d'apprêts et d'autres suspensions, les autres traitements de surface et les additifs fonctionnels ou auxiliaires technologiques. L'Agence décrit la proposition comme un remplacement possible de l'obligation d'autorisation actuelle et mentionne une consultation de six mois à compter du 18 juin 2025. Je n'ai pas pu établir l'état de la procédure en octobre 2026. [215, 59]

La proposition est taillée pour les substances du chrome(VI) mises sur le marché et mises en œuvre délibérément et pour les catégories d'utilisation mentionnées. Les isolants, les isolations et les chromates formés in situ n'apparaissent ni dans le communiqué de presse ni dans l'entrée du registre. [215]

Droit des déchets de l'Union

L'article 7 paragraphe 1 de la directive 2008/98/CE dispose que la liste des déchets est contraignante en ce qui concerne la détermination des déchets à considérer comme dangereux. Le paragraphe 2 permet aux États membres de considérer un déchet comme dangereux même lorsqu'il ne figure pas comme tel sur la liste, dès lors qu'il présente une des propriétés de l'annexe III. Le paragraphe 4 interdit d'obtenir un reclassement comme non dangereux « par dilution ou par mélange du déchet ». L'article 18 paragraphe 1 interdit le mélange de déchets dangereux et dispose que le mélange comprend la dilution de substances dangereuses. [216]

La liste figure à l'annexe de la décision 2000/532/CE. Sont pertinents 17 06 03* pour les autres matériaux d'isolation à base de ou contenant des substances dangereuses, 16 11 03* et 16 11 05* pour les revêtements et matériaux réfractaires usés provenant de procédés métallurgiques et de procédés non métallurgiques ainsi que 16 09 02* pour les chromates. La communication de la Commission 2018/C 124/01 explique la notion d'entrées miroir et mentionne dans son annexe la norme EN 15192 pour la détermination du chrome hexavalent dans les matières solides. [217, 218]

L'écart avec la directive sur l'amiante

La directive 2009/148/CE règle pour l'amiante des obligations que la directive 2004/37/CE ne comporte pas de manière générale pour les agents cancérigènes. L'article 11 exige, avant le début de travaux de démolition, de maintenance ou de rénovation, toutes les précautions nécessaires pour identifier les matériaux présumés contenir de l'amiante, et cela en recueillant des informations auprès du propriétaire et dans les registres pertinents. L'article 4 exige une notification à l'autorité compétente avant le début des travaux, avec l'indication notamment du nombre de travailleurs concernés et de leurs attestations de formation. L'article 13 exige un plan de travail avant le début et, à l'achèvement, la vérification qu'il n'existe plus de mise en danger. L'article 14 avec l'annexe I bis fixe des exigences minimales quant au contenu, à la durée et à la fréquence de l'instruction, l'article 15 une autorisation de l'entreprise. [219]

La directive 2004/37/CE ne connaît pas de déclaration avant le début. Son article 6 exige des informations à l'autorité seulement « sur demande ». La liste et le délai de quarante ans sont réglés de la même manière dans les deux directives. La différence porte sur l'identification préalable, la notification, le plan de travail, les exigences minimales en matière de formation et l'autorisation de l'entreprise. [212, 219]

Ce que l'Union ne nomme pas

Dans les actes juridiques et les documents officiels de l'Union examinés, la formation de chromates sur des pièces chaudes isolées alliées au chrome n'est pas nommée. Ont été examinées les versions consolidées des directives 2004/37/CE, 89/391/CEE, 2009/148/CE et 2008/98/CE, de la décision 2000/532/CE ainsi que des règlements (CE) n° 1907/2006 et n° 1272/2008, en outre la communication 2018/C 124/01 et les publications accessibles de l'Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail. Aucune des huit entrées liées à des procédés de l'annexe I de la directive 2004/37/CE ne concerne les isolations ou les pièces chaudes. [212, 216, 218]

Le document de la Commission thématiquement le plus proche traite du chrome(VI) formé par un procédé exclusivement lors du soudage, du coupage thermique et de procédés similaires générant des fumées. Les isolants thermiques, l'oxyde de calcium et la formation sur des surfaces chaudes en acier inoxydable en dehors de ces procédés n'y apparaissent pas. Il s'agit d'un constat sur le corpus examiné et non d'un énoncé sur les obligations ; celles-ci découlent du libellé des articles 2, 3, 4 et 5. [220, 212]

Ce qui en découle

Pour une entreprise établie dans un État membre, l'obligation naît du droit national de transposition. Le critère d'examen du droit de l'Union est à cet égard plus strict que la question d'une mesure sur trois points. L'évaluation prévue à l'article 3 paragraphe 2 est liée à l'activité et doit être renouvelée lors de toute modification des conditions. L'absorption cutanée est expressément à intégrer selon l'article 3 paragraphe 3. La réduction prévue à l'article 5 paragraphe 3 n'est liée à aucun seuil ; elle s'applique dès qu'un système clos n'est pas techniquement possible. Un État membre peut prévoir des prescriptions plus strictes ; la directive fixe des exigences minimales. [212]

37. Les obligations aux Pays-Bas

Les Pays-Bas sont membres de l'Union européenne et ont transposé la directive 2004/37/CE dans l'Arbeidsomstandighedenbesluit. Le cas d'application traité ici n'y est pas davantage nommé en tant que tel. La présente section rassemble les prescriptions néerlandaises en vigueur et indique pour chaque énoncé sa source.

La notion de substance est neutre quant à l'origine

L'article 1.1 alinéa 5 lettre b de l'Arbeidsomstandighedenbesluit définit les substances dangereuses comme « stoffen of mengsels waaraan werknemers bij de arbeid worden of kunnen worden blootgesteld die vanwege de eigenschappen van of de omstandigheden waaronder die stoffen of mengsels voorkomen gevaar voor de veiligheid of gezondheid kunnen opleveren ». La définition se rattache à l'exposition au travail et aux circonstances de la présence. L'achat, la mise sur le marché et l'utilisation intentionnelle n'y figurent pas. [222]

L'article 4.2 alinéa 1 exige l'évaluation de la nature, du degré et de la durée de l'exposition, et cela expressément « ongeacht of met deze stoffen daadwerkelijk arbeid wordt of zal worden verricht », donc indépendamment du fait qu'un travail soit effectivement réalisé avec ces substances. Cette évaluation fait partie de la Risico-Inventarisatie en -Evaluatie écrite prévue à l'article 5 alinéa 1 de l'Arbeidsomstandighedenwet. Selon l'article 4.2 alinéa 8, elle est en tout cas à réexaminer lorsque de nouveaux travaux impliquant des substances dangereuses sont entrepris. [121, 221]

L'article 4.1c alinéa 1 lettre c exige d'empêcher ou de minimiser l'exposition en « gebruik te maken van adequate voorzieningen bij het uitvoeren van reparatie- of onderhoudswerkzaamheden ». La lettre j exige des méthodes de travail appropriées, y compris des règles pour la manipulation, le stockage et le transport sûrs des substances dangereuses et des déchets qui contiennent de telles substances. L'alinéa 2 lie ces mesures à l'état de la science et de la technique. La lettre c est, dans la section 1 du quatrième chapitre, le seul endroit où les travaux de réparation et de maintenance sont nommés. [222]

Les obligations supplémentaires pour les substances cancérogènes

La section 2 du quatrième chapitre s'applique en sus, selon l'article 4.12, dès que des travailleurs sont ou peuvent être exposés à des substances cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction « of aan stoffen die vrijkomen bij kankerverwekkende of mutagene processen ». La définition de l'article 4.11 lettre b se rattache, à son point 1, aux critères de classification du règlement (CE) n° 1272/2008. Les composés du chrome(VI) sont ainsi couverts. [222, 63]

L'article 4.13 exige d'inscrire par écrit dans la Risico-Inventarisatie, au-delà de l'évaluation prévue à l'article 4.2, sept indications. La première est « de reden waarom het gebruik van een kankerverwekkende, mutagene of reprotoxische stof of het toepassen van een kankerverwekkend of mutageen proces voor het verrichten van de arbeid strikt noodzakelijk is en vervanging technisch niet uitvoerbaar is ». Suivent la quantité annuelle ou la fréquence d'application, la nature du travail, le nombre de travailleurs exposés, les mesures préventives, l'équipement de protection utilisé et les cas dans lesquels un remplacement a eu lieu. La justification de l'impossibilité d'une substitution fait ainsi partie de la documentation. [222]

L'article 4.17 exige des mesures techniques et organisationnelles qui empêchent l'exposition autant que possible à la source, en particulier par remplacement, dans la mesure où cela est techniquement réalisable. L'article 4.18 alinéa 1 exige, dans le cas où cela n'est pas réalisable, la fabrication et l'utilisation en système clos ; l'alinéa 2 nomme des mesures collectives et l'aspiration locale, l'alinéa 3 l'équipement de protection individuelle seulement ensuite et l'alinéa 4 la limitation de la durée de port au strict nécessaire. [109, 222]

L'article 4.19 règle les obligations accompagnatrices. La lettre a exige une information ou une instruction qui a lieu au moins une fois par an. La lettre c exige le marquage des zones de danger ; la notion est définie à l'article 4.11 lettre h comme le lieu où des travailleurs sont ou peuvent être exposés à de telles substances. La lettre e exige des moyens efficaces pour la collecte, le stockage et l'évacuation sûrs des déchets, autant que possible dans des récipients hermétiquement clos et clairement étiquetés. L'article 4.20 exige des zones pour manger et boire sans risque d'exposition, des vêtements de travail efficaces, leur conservation séparée ainsi que des locaux de lavage et de douche. [222]

La valeur limite de 0,001 mg/m³

La valeur limite légale figure à la Bijlage XIII partie B2 de l'Arbeidsomstandighedenregeling, la liste des valeurs limites fixées selon l'approche par le risque pour les substances cancérogènes. L'entrée est « Chroom (VI)-verbindingen (als Cr) » avec 0,001 mg/m³ en moyenne pondérée dans le temps sur huit heures. Aucun numéro CAS, aucune valeur sur quinze minutes et aucune mention cutanée n'y sont inscrits. Selon l'explication relative à la Bijlage XIII, la valeur se rapporte, pour les substances qui peuvent être présentes sous forme de particules, à la fraction prélevée comme poussière inhalable. [223]

La valeur s'applique depuis le 1er mars 2017. Elle a été introduite par un arrêté du ministre des Affaires sociales et de l'Emploi du 18 octobre 2016, qui a en même temps supprimé les entrées jusqu'alors distinctes pour le chromate de baryum, le chromate de calcium, les composés du chrome(VI) solubles et peu solubles, le trioxyde de chrome, le chromate de plomb, le chromate de strontium et le chromate de zinc. L'exposé des motifs officiel mentionne pour les composés du chrome(VI) l'estimation du conseil de la santé néerlandais de 4 pour 100 000 pour 40 ans d'exposition à 0,01 µg/m³ et de 4 pour 1 000 à 1 µg/m³. Il qualifie 1 pour 10 000 par an de risque d'interdiction et retient que la valeur est fixée sur ce risque maximal acceptable. [224]

Le même exposé des motifs constate que l'introduction de la valeur limite plus basse laisse intact le fait que certaines entreprises doivent remplacer la substance ou atteindre une exposition plus faible lorsque cela est techniquement réalisable, et renvoie pour cela aux articles 4.17 et 4.18 de l'Arbeidsomstandighedenbesluit. La valeur limite n'est donc, même selon l'exposé des motifs officiel, pas un critère dont le respect dispenserait du contrôle de substitution. [224]

Pour le cas traité ici, l'article 4.16 alinéa 2 est la phrase centrale. S'il n'existe pas de valeur limite légale pour une substance cancérogène ou pour une substance libérée lors d'un procédé cancérogène, l'employeur fixe lui-même « een zo laag mogelijke grenswaarde ». En cas de dépassement d'une valeur limite, l'alinéa 3 exige sans délai des mesures efficaces pour revenir en dessous de cette valeur, et l'alinéa 5 exige d'indiquer dans le plan de mesures comment le dépassement sera supprimé le plus rapidement possible. [222]

Liste des travailleurs et quarante ans

L'article 4.15 alinéa 1 exige une liste des travailleurs qui sont ou peuvent être exposés à de telles substances, « onder vermelding van de blootstelling die zij hebben ondergaan ». L'alinéa 2 donne à chaque travailleur le droit de consulter les données qui le concernent et d'en obtenir copie. L'article 4.10c alinéa 4 exige la conservation de cette liste et des résultats de l'examen de médecine du travail pendant au moins 40 ans après la fin de l'exposition. [222]

L'article 4.10c alinéa 5 règle le cas de la cessation d'activité. Si les activités cessent au cours de ces quarante ans, les documents sont « overgedragen aan de toezichthouder », donc remis à l'autorité de surveillance. La réglementation néerlandaise nomme ainsi l'instance à laquelle les documents sont destinés ; le règlement allemand sur les substances dangereuses ne règle pas expressément ce cas et connaît à la place le transfert des obligations par transmission des données à l'organisme d'assurance accidents. [222, 200]

Surveillance, amende administrative et délit économique

La Nederlandse Arbeidsinspectie peut, selon l'article 27 de l'Arbeidsomstandighedenwet, poser une eis tot naleving, donc déterminer de manière contraignante la manière dont une prescription est à respecter, assortie d'un délai. L'article 9.22 de l'Arbeidsomstandighedenbesluit admet ce moyen pour les articles du quatrième chapitre pertinents ici. Selon l'article 28, un agent de contrôle peut ordonner que certains travaux soient arrêtés ou ne puissent être entrepris lorsque, selon son appréciation raisonnable, ils constituent un danger grave pour des personnes ; ce pouvoir comprend la mise sous scellés d'équipements de travail et de lieux de travail. [221, 222]

Les infractions aux articles du quatrième chapitre mentionnés sont passibles d'une amende selon l'article 9.9b alinéa 1 lettre d de l'Arbeidsomstandighedenbesluit. Le montant maximal correspond, selon l'article 34 alinéa 3 de l'Arbeidsomstandighedenwet, à la cinquième catégorie de l'article 23 alinéa 4 du code pénal néerlandais, soit 110 000 euros depuis le 1er janvier 2026. En cas de répétition du même manquement dans les cinq ans, le montant est majoré de 100 pour cent selon l'article 34 alinéa 5. [108, 111, 222]

La Beleidsregel boeteoplegging arbeidsomstandighedenwetgeving chiffre les montants de base. L'absence totale de réalisation de l'évaluation de l'exposition prévue à l'article 4.2 alinéa 1 y est classée comme overtreding met directe boete, donc passible d'une amende sans avertissement préalable, avec le cinquième montant normé de 4 500 euros. Le dépassement de la valeur limite selon l'article 4.16 alinéa 3 est classé comme zware overtreding, avec le sixième montant normé de 9 000 euros et le facteur deux. Pour les articles 4.1b, 4.1c, 4.17 et 4.18 vaut également le sixième montant normé. Les montants s'appliquent aux entreprises à partir de 500 salariés et sont abaissés de manière échelonnée en dessous. [226]

Au-dessus du droit des amendes se situe l'article 32 de l'Arbeidsomstandighedenwet. Selon celui-ci, il est interdit à l'employeur d'agir ou de s'abstenir contrairement à la loi ou aux dispositions qui en découlent lorsqu'il en résulte ou est à prévoir, comme il le sait ou doit raisonnablement le savoir, un danger de mort ou une atteinte grave à la santé pour un ou plusieurs travailleurs. Une infraction à cette disposition constitue, selon l'article 1 de la Wet op de economische delicten, un délit économique et, en cas d'intention, un misdrijf avec un cadre allant jusqu'à six ans de peine privative de liberté. Pour les personnes morales, l'amende peut, selon l'article 23 alinéa 7 du code pénal néerlandais, aller jusqu'à la catégorie immédiatement supérieure. [108, 110, 111]

Aucune des obligations du quatrième chapitre relatives aux substances dangereuses et aux substances cancérogènes n'est classée comme ernstige overtreding. L'énumération exhaustive de l'article 9.10a alinéa 3 de l'Arbeidsomstandighedenbesluit nomme, pour ce chapitre, les prescriptions relatives à l'amiante, au propanesultone, aux interdictions de substances et à la céruse. L'avertissement suivi d'un ordre d'arrêt ne s'applique donc, pour les obligations traitées ici, qu'après constatation répétée. [222]

Déchets

La Regeling Europese afvalstoffenlijst déclare déterminante la liste figurant à l'annexe de la décision 2000/532/CE. Pour les matériaux isolants autres que l'amiante entre en considération 17 06 03* « overig isolatiemateriaal dat uit gevaarlijke stoffen bestaat of dergelijke stoffen bevat », pour les gravats de four 16 11 03* et 16 11 05*, pour les chromates en tant que substance 16 09 02*. L'article 4 alinéa 1 attribue le déchet à l'entrée marquée d'un astérisque lorsqu'il est constaté qu'il possède une des propriétés de l'annexe III de la directive-cadre sur les déchets. L'alinéa 2 dispose que les effets de l'évaporation, de la dilution, du mélange ou de la lixiviation ne sont pas pris en compte à cet égard. [228, 217]

La charge de la preuve incombe au producteur de déchets. L'explication officielle de l'Informatiepunt Leefomgeving la formule ainsi : « De Eural kent een omgekeerde bewijslast: zolang u niet kunt aantonen dat het geen gevaarlijk afval is, is het gevaarlijk afval. » L'article 10.39 alinéa 1 lettre a du Wet milieubeheer exige de celui qui remet le déchet une description de sa nature, de ses propriétés et de sa composition ; l'article 10.40 alinéa 2 interdit au destinataire de l'accepter sans cette description et sans document de suivi. L'article 10.54 alinéa 1 interdit, pendant la collecte et le transport, le mélange y compris la dilution. [228, 229]

L'écart avec le régime de l'amiante

La section 5 du quatrième chapitre règle l'amiante séparément. L'article 4.54a alinéa 1 exige d'inventorier complètement la présence d'amiante avant d'entreprendre la démolition ou le démontage d'ouvrages ou d'objets dans lesquels de l'amiante a, selon une attente raisonnable, été utilisé ; l'inventaire et le rapport sont, selon l'alinéa 4, réservés à une entreprise certifiée. L'article 4.54d alinéa 1 exige, pour l'enlèvement à partir de la classe de risque 2, une entreprise disposant d'un certificat, les alinéas 5 et 7 les certificats de compétence des personnes mises en œuvre. L'article 4.47c alinéa 1 exige la déclaration à l'autorité de surveillance au plus tard deux jours avant le début des travaux. L'article 4.51a exige, avant la levée de la zone de danger, une évaluation finale avec inspection visuelle et mesure par rapport à la valeur de 10 000 fibres par mètre cube. [121, 227]

Pour le chrome(VI), aucun de ces points n'existe. Il n'y a pas d'inventaire préalable, pas d'obligation de certification, pas de déclaration avant le début, pas d'évaluation finale et pas de système de classes de risque. La liste prévue à l'article 4.15 et le délai de quarante ans prévu à l'article 4.10c correspondent au registre que la section 5 prévoit pour l'amiante. [222, 227]

Le complexe néerlandais du chroom-6

Aux Pays-Bas, le chrome(VI) a depuis 2014 une histoire publique propre. Le Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu a étudié, sur mandat de la Paritaire Commissie Chroom-6, les sites du ministère de la Défense et a rendu compte en 2018 et 2021, et dans d'autres études les ateliers de NS et NedTrain ainsi que le projet de réinsertion tROM à Tilburg. Pour les personnes concernées au ministère de la Défense, il existe depuis 2018 un régime d'indemnisation étatique. [230, 231, 232, 234]

L'objet de ces études, ce sont les peintures et les apprêts contenant du chromate et leur traitement. La question posée par la Paritaire Commissie porte, dans le rapport de 2021, sur « chroom-6-houdende verf of verfstof ». Le rapport relatif à NS et NedTrain commence par la phrase selon laquelle d'anciennes couches de peinture de certains trains contiennent du chrome(VI). Le rapport relatif à Tilburg décrit l'enlèvement d'anciennes couches de peinture sur des trains de musée. Le régime d'indemnisation énumère à l'annexe 2 les activités pertinentes pour l'appréciation ; la seule position non liée à la peinture est « lassen of snijbranden van roestvast staal ». [230, 231, 232, 234]

Une recherche en texte intégral dans les cinq rapports principaux portant sur les termes néerlandais pour isolation, matériau isolant, laine minérale, laine de roche, laine de verre et protection thermique ne donne aucun résultat. Le complexe public le plus vaste d'Europe relatif au chrome(VI) n'a pas saisi la voie de formation traitée ici. [230, 231, 232]

Ce qui n'est pas publié aux Pays-Bas

Le chromate de calcium et le chromate de sodium figurent nominativement sur la SZW-lijst des substances cancérogènes, publiée en dernier lieu le 9 juillet 2026. La liste se qualifie elle-même de non exhaustive et indique quelles substances et quels procédés sont en tout cas visés à l'article 4.11 de l'Arbeidsomstandighedenbesluit. La liste correspondante des procédés cancérogènes comporte dix positions, de la fabrication d'auramine aux émissions lors de la fonderie de fer et d'acier ; un procédé avec formation de chromate n'y figure pas. Les procédés déterminés au niveau national selon l'article 4.20c de l'Arbeidsomstandighedenregeling ne comprennent eux aussi que les émissions de moteurs diesel et deux mélanges de substances. [225, 223]

Le rapport que le ministère des Affaires sociales et de l'Emploi a spécialement commandé pour dresser une vue d'ensemble des applications du chrome(VI) au poste de travail rattache l'exposition sur les revêtements réfractaires de fours et de chaudières au chrome(VI) présent dans le matériau, aux matières premières et aux ajouts. La formation thermochimique sur l'acier allié au chrome par des oxydes basiques provenant de l'isolant n'y apparaît pas, pas même comme hypothèse. Le rapport clôt sa vue d'ensemble en indiquant que, pour les domaines de la maintenance d'installations anciennes, de la démolition et du traitement des déchets de produits céramiques ainsi que pour certains travaux de l'industrie des métaux de base, « geen informatie over verkregen » a été obtenue. [233]

Les publications du ministère et de la Nederlandse Arbeidsinspectie nomment comme sources d'exposition l'enlèvement d'anciennes couches de peinture, la fabrication de chromate, le chromage, certaines sortes de ciment, le meulage et le soudage de surfaces contenant du chrome et le bois imprégné. Le Beheersregime chroom-6 porte le sous-titre « Toe te passen arbeidshygiëne bij het werken aan verven en coatings » et se limite, selon sa propre note de bas de page, à la poussière de peinture issue de surfaces peintes travaillées. La page thématique de l'Arbeidsinspectie nomme les travaux sur des métaux et des revêtements contenant du chrome et retient en même temps : « Een negatieve uitslag is echter niet genoeg om te besluiten om géén maatregelen te nemen. » [235, 236]

La Beleidsregel arbocatalogi 2019 énumère les catalogues sectoriels examinés par l'Arbeidsinspectie. La ligne « Installatie- en isolatie » nomme comme prescriptions revendiquées notamment les articles 4.11 à 4.20 de l'Arbeidsomstandighedenbesluit, donc les prescriptions relatives aux substances cancérogènes. Comme substances dangereuses, la même ligne nomme l'amiante et la poussière de quartz. Le chrome(VI) n'y figure pas. [237]

Il s'agit d'un énoncé sur le corpus examiné. Il ne prive pas les obligations de leur portée. La définition neutre quant à l'origine de l'article 1.1 alinéa 5, la formulation « ongeacht of met deze stoffen daadwerkelijk arbeid wordt of zal worden verricht » de l'article 4.2 alinéa 1 et la formule constante « stoffen die vrijkomen bij kankerverwekkende of mutagene processen » de la section 2 couvrent aussi les chromates formés involontairement. Ce qui manque, c'est la désignation de la voie de formation. [222, 121]

Ce qui en découle pour une entreprise aux Pays-Bas

Des prescriptions citées résulte un ensemble de documents vérifiable. En font partie l'évaluation écrite prévue à l'article 4.2 alinéa 1 pour l'appariement de matériaux formé d'une pièce chaude alliée au chrome et d'un isolant à charge basique ainsi que les sept indications prévues à l'article 4.13, y compris la justification des raisons pour lesquelles une substitution n'est pas techniquement réalisable. En fait partie la valeur limite fixée par l'employeur selon l'article 4.16 alinéa 2, dans la mesure où aucune valeur légale n'est pertinente. En font partie la liste prévue à l'article 4.15 avec une conservation de quarante ans, l'instruction annuelle prévue à l'article 4.19 lettre a et la description du déchet prévue à l'article 10.39 du Wet milieubeheer. [121, 222, 229]

L'absence totale de réalisation de l'évaluation est à cet égard le seul de ces points qui soit passible d'une amende sans avertissement préalable. Tous les autres supposent une constatation et un délai. L'écart avec le régime de l'amiante porte sur la procédure qui déclenche les obligations. Les obligations elles-mêmes figurent dans le libellé et s'appliquent sans désignation préalable du cas. [226, 227]

38. Les obligations au Royaume-Uni

La présente section rassemble en un seul endroit le corpus réglementaire britannique, comme le font les trois sections précédentes pour l'Allemagne, l'Union européenne et les Pays-Bas. Le Royaume-Uni n'est plus lié à la directive 2004/37/CE depuis le 1er janvier 2021. La prescription porteuse, les Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002, est plus ancienne que cette directive et continue de s'appliquer sans modification. [122, 113]

Le champ d'application territorial est divisé. Les COSHH Regulations 2002 et les Control of Asbestos Regulations 2012 portent la mention « E+W+S » et s'appliquent donc en Angleterre, au pays de Galles et en Écosse ; l'Irlande du Nord dispose, avec les Control of Substances Hazardous to Health Regulations (Northern Ireland) 2003 et les Control of Asbestos Regulations (Northern Ireland) 2012, de prescriptions propres, construites de manière identique sur le fond. En droit des déchets, les quatre parties du pays suivent chacune sa propre voie, avec des règlements propres pour l'Angleterre, le pays de Galles, l'Écosse et l'Irlande du Nord. Les indications de la présente section se rapportent, sauf mention contraire, à l'Angleterre et au pays de Galles. [257]

La notion de substance ne dépend pas de la classification

Regulation 2(1) détermine ce qu'est une « substance hazardous to health ». La lettre a couvre toute substance qui remplit les critères de classification dans une classe de danger pour la santé au titre du règlement CLP, et cela expressément « whether or not the substance is classified under that Regulation ». La lettre b couvre les substances ayant une valeur limite d'exposition professionnelle approuvée par l'autorité britannique HSE, la lettre d la poussière de toute nature au-dessus de la concentration qui y est indiquée. Un chromate qui se forme à l'interface entre l'isolation et la pièce chaude remplit les critères des lettres a et b, sans qu'il doive exister un fournisseur, une fiche de données de sécurité ou une classification formelle. [239]

La définition du cancérogène dans la même prescription reprend l'idée. Est couverte une substance qui remplit les critères de classification comme cancérogène de catégorie 1A ou 1B selon l'annexe I du règlement CLP, « whether or not the substance or mixture would be required to be classified under the Regulation », ou une substance ou un procédé qui est mentionné au Schedule 1. Le Schedule 1 ne comporte aucune entrée relative au chrome. La qualité de cancérogène d'un chromate formé in situ découle donc de la première voie, celle des critères de classification, et non d'une liste. [239]

C'est l'équivalent britannique de ce que le règlement allemand sur les substances dangereuses règle au paragraphe 2 alinéa 1 numéros 3 et 4. Les deux ordres juridiques rattachent les obligations à la propriété de la substance et non à la voie par laquelle elle entre dans l'entreprise. [198]

Évaluation, maintenance et le seuil de cinq salariés

Regulation 6(1) comporte une interdiction de commencer. Un employeur ne peut exécuter des travaux susceptibles d'exposer des salariés à une substance dangereuse pour la santé tant qu'il n'a pas réalisé une « suitable and sufficient assessment » de la mise en danger qui en résulte et des étapes nécessaires et qu'il n'a pas mis en œuvre ces étapes. La section 25 traite cette prescription en comparaison avec les autres espaces juridiques. [122]

Regulation 6(2) énumère ce que l'évaluation doit prendre en considération. La lettre e nomme expressément le cas pertinent ici : « activities, such as maintenance, where there is the potential for a high level of exposure ». La lettre b nomme les indications du fournisseur y compris la fiche de données de sécurité, la lettre c le niveau, la nature et la durée de l'exposition, la lettre f une valeur limite d'exposition professionnelle pertinente et la lettre i les résultats des mesures prévues à Regulation 10. La maintenance est ainsi nommée dans la prescription britannique comme objet d'évaluation propre, de même que le paragraphe 6 alinéa 5 du règlement allemand sur les substances dangereuses nomme les travaux de maintenance. [122, 198]

Regulation 6(4) limite l'obligation de documentation. Seul un employeur comptant cinq salariés ou plus doit consigner les résultats essentiels de l'évaluation et les étapes prises selon Regulation 7. Pour les entreprises plus petites, l'obligation d'évaluation existe, mais non l'obligation de consignation. La différence pèse dans le domaine traité ici, parce que les travaux d'isolation et de maintenance sont souvent exécutés par de petites entreprises. [239]

Une obligation d'investigation avant le début des travaux fait défaut. Regulation 6 intervient lorsque le travail est susceptible d'exposer des salariés et ne dit rien sur la manière dont l'employeur constate la présence de la substance. Une règle de présomption pour le cas de doute n'existe pas non plus dans le régime COSHH. Les deux figurent dans le régime de l'amiante, à la Regulation 5 des Control of Asbestos Regulations 2012. [122, 123]

Prévention, substitution et ce qui est raisonnablement praticable

Regulation 7(1) exige d'empêcher l'exposition ou, dans la mesure où cela n'est pas raisonnablement praticable, de la maîtriser de manière adéquate. Regulation 7(2) précise la priorité de la substitution ; Regulation 7(3) ordonne les étapes suivantes, de la conception des procédés à l'équipement de protection individuelle en passant par la maîtrise à la source. Regulation 7(4) lettre b exige expressément « the adoption of suitable maintenance procedures », la lettre c la réduction du nombre de salariés exposés, du niveau et de la durée de l'exposition et de la quantité présente au poste de travail au minimum nécessaire pour le travail. La section 30 reproduit le libellé des alinéas 1, 2 et 5. [113]

Pour les cancérogènes s'ajoute Regulation 7(5), avec le confinement complet du procédé et des systèmes de manipulation, dans la mesure où cela est raisonnablement praticable, l'interdiction de manger, de boire et de fumer dans les zones éventuellement contaminées, le nettoyage régulier et ponctuel des sols, des murs et des autres surfaces, le marquage des zones et des installations concernées et le stockage, la manipulation et l'élimination dans des récipients clos et clairement étiquetés. Ces mesures s'appliquent indépendamment de tout mesurage. [113]

Le critère de la maîtrise est fixé par Regulation 7(7). La maîtrise n'est tenue pour adéquate que si les principes de bonne pratique prévus au Schedule 2A sont appliqués, qu'une valeur limite d'exposition professionnelle approuvée n'est pas dépassée et que, pour une substance portant la mention de danger H340, H350 ou H350i ou pour une substance ou un procédé mentionné au Schedule 1, l'exposition est « reduced to as low a level as is reasonably practicable ». Les chromates du type traité ici portent H350 ou H350i. L'obligation de minimisation s'applique donc pour eux en sus de la valeur limite et indépendamment du fait qu'elle soit respectée. [239]

Les trois conditions sont reliées par « and ». Le respect de la valeur limite à lui seul ne satisfait donc pas à l'obligation de maîtrise. La minimisation prévue à la lettre c ne dépend pour sa part pas de la valeur limite, parce qu'elle se rattache uniquement à la mention de danger ou au Schedule 1 ; elle s'applique ainsi là où aucune valeur limite n'est fixée, et de même là où une valeur est fixée et respectée. Le membre de phrase introductif est libellé « where there is exposure to a substance hazardous to health » et ne connaît aucun seuil. [239]

Le critère est formulé autrement que celui du droit de l'Union. L'article 5 paragraphe 3 de la directive 2004/37/CE exige que le niveau d'exposition des travailleurs soit « réduit à un niveau aussi bas qu'il est techniquement possible », et l'article 5 paragraphe 4 dispose par ailleurs que les valeurs limites de l'annexe III ne doivent pas être dépassées. La prescription britannique se mesure à ce qui est raisonnablement praticable, celle du paragraphe 10 alinéa 1 du règlement allemand sur les substances dangereuses à l'état de la technique. [212, 198]

Le Schedule 2A nomme à la lettre b la prise en compte de toutes les voies d'absorption pertinentes, à savoir l'inhalation, l'absorption cutanée et l'ingestion. Une mesure d'air seule ne satisfait pas à cette exigence. La lettre a exige de concevoir les procédés et les activités de telle sorte que la libération et la diffusion de la substance restent aussi faibles que possible. [239, 41]

Le critère « so far as is reasonably practicable » agit dans la procédure autrement qu'il n'y paraît. La Section 40 du Health and Safety at Work etc. Act 1974 fait peser la charge de la preuve sur le prévenu : dans une procédure pénale pour violation d'une telle obligation, il lui appartient de prouver que davantage que ce qui a été fait n'était pas praticable ou pas raisonnablement praticable. Qui invoque que la substitution n'était pas praticable doit l'établir. [238]

La valeur limite de 0,01 mg/m³ et l'état des publications de l'autorité HSE

EH40/2005, dans sa quatrième édition 2020, mentionne au tableau 1 l'entrée « Chromium (VI) compounds (as Cr) » avec une moyenne sur huit heures de 0,01 mg/m³ et une valeur de 0,025 mg/m³ pour l'exposition générée par un procédé, avec les mentions Carc, sen et BMGV. La note de bas de page relative à cette entrée dispose : « 'Process generated' refers to exposures to Chromium (VI) Compounds generated as a result of a work process, such as fumes from welding. » La valeur abaissée s'applique depuis le 17 janvier 2020 ; la remarque préliminaire de l'édition mentionne les composés du chrome(VI) parmi les substances dont la valeur limite a été abaissée. [241]

Le tableau 2 de la même édition mentionne une valeur guide biologique de 10 µmol de chrome par mol de créatinine dans l'urine, à déterminer après le poste. La valeur porte sur le chrome et non sur le composé ; la section 24 traite ce qui en découle. [42]

La valeur plus élevée pour l'exposition générée par un procédé est significative pour ce cas. La note de bas de page nomme comme exemple le soudage. EH40 ne dit pas si un chromate qui s'est formé à l'interface sans apport d'énergie par l'activité et qui est libéré comme poussière lors du démontage est tenu pour généré par un procédé. Je n'ai pas trouvé d'aide à l'interprétation sur ce point. La réponse décide d'un facteur 2,5 dans la valeur limite applicable. [241]

La fiche d'information INDG346 de l'autorité indique encore 0,05 mg/m³ pour les composés du chrome(VI). C'est la valeur antérieure au 17 janvier 2020. L'autorité n'a pas mis à jour sa propre fiche d'information après l'abaissement ; consultée le 17 octobre 2026, elle porte l'ancienne valeur. Qui se fie à la publication généralement accessible de l'autorité travaille avec le quintuple de la valeur limite en vigueur. [88]

L'Union européenne a abaissé sa valeur limite contraignante pour le chrome(VI) à 0,005 mg/m³ au 17 janvier 2025. Le Royaume-Uni ne suit pas ; l'autorité britannique maintient 0,01 mg/m³ pour le chrome(VI). La valeur britannique est ainsi le double de celle du droit de l'Union. [241, 41, 212]

EH40 n'indique aucune mention cutanée pour le chrome(VI). La légende de l'édition circonscrit étroitement cette mention : « Sk Can be absorbed through the skin. The assigned substances are those for which there are concerns that dermal absorption will lead to systemic toxicity. » Est visé l'effet systémique après absorption par la peau. L'effet cutané local des chromates, l'ulcère chromique et la dermatite de contact allergique, n'en relève pas. La mention « sen » n'apporte rien de plus ici non plus, parce que la même légende la limite à « Capable of causing occupational asthma ». L'annexe III de la directive 2004/37/CE ne comporte elle non plus aucune mention « Peau » pour le chrome(VI). Les obligations de protection de la peau découlent donc du Schedule 2A et de Regulation 7, et non du tableau des valeurs limites. [241, 212]

Les mentions de danger déclenchent les obligations

En droit britannique, les mentions de classification sont le point de rattachement. Regulation 2(1) détermine la substance dangereuse pour la santé par les critères du règlement CLP et définit celui-ci, dans la même prescription, comme le règlement (CE) n° 1272/2008, dont les articles 6 paragraphe 5, 11 paragraphe 3, 12, 14, 18 paragraphe 3 lettre b, 23, 25 à 29 et 35 paragraphe 2 ainsi que les annexes I à VII « are to be read as amended from time to time ». Regulation 7(7) lettre c nomme ensuite des mentions de danger isolées dans leur libellé. Le point i couvre une substance portant « the hazard statement H340, H350 or H350i » ou une substance mentionnée au Schedule 1 ou un procédé qui y est mentionné, le point ii une substance portant « the hazard statement H334 ». [239]

Depuis le 1er janvier 2021, l'autorité britannique HSE tient, en tant que GB CLP Agency, une liste contraignante propre. Selon sa propre présentation, « all existing EU harmonised classification and labelling in force on 31 December 2020, are assimilated into Great Britain as GB mandatory classification and labelling (GB MCL) ». Pour l'Irlande du Nord, la version de l'Union continue de s'appliquer, parce que « substances and mixtures placed on the market in Northern Ireland are subject to the EU CLP Regulation ». [243]

Numéro index	Substance	Classification et mentions de danger
024-008-00-9	Chromate de calcium	Carc. 1B H350; Acute Tox. 4 H302; Aquatic Acute 1 H400; Aquatic Chronic 1 H410
024-017-00-8	Composés du chrome(VI), entrée collective sans le chromate de baryum et sans les composés nommés à un autre endroit de l'annexe	Carc. 1B H350i; Skin Sens. 1 H317; Aquatic Acute 1 H400; Aquatic Chronic 1 H410
024-018-00-3	Chromate de sodium	Carc. 1B H350; Muta. 1B H340; Repr. 1B H360FD; Acute Tox. 2 H330; Acute Tox. 3 H301; STOT RE 1 H372; Acute Tox. 4 H312; Skin Corr. 1B H314; Resp. Sens. 1 H334; Skin Sens. 1 H317; Aquatic Acute 1 H400; Aquatic Chronic 1 H410, avec des limites de concentration spécifiques de 0,2 pour cent pour H334 et pour H317

Regulation 7(7) lettre c point i s'applique ainsi aux trois entrées, pour le chromate de calcium par H350, pour l'entrée collective par H350i et pour le chromate de sodium par H350 et H340. Pour le chromate de sodium, le point ii s'applique en sus, par H334. [239, 242]

L'énumération de Regulation 7(7) lettre c ne nomme pas H317, et elle ne nomme pas non plus H314. La sensibilisation cutanée ne déclenche donc pas l'obligation de minimisation. Elle fait toujours de la substance une substance dangereuse pour la santé au sens de Regulation 2(1) lettre a, parce que celle-ci couvre toute classe de danger pour la santé. L'évaluation prévue à Regulation 6 et la maîtrise prévue à Regulation 7(1) s'appliquent sans changement, et le Schedule 2A lettre b exige la prise en compte de l'absorption cutanée. Le régime supplémentaire dépend de la cancérogénicité, de la mutagénicité sur les cellules germinales et de la sensibilisation respiratoire. [239]

Pour le cas traité ici, la répartition des mentions entre les deux sels est significative. Dans la liste britannique, le chromate de calcium ne porte ni H317 ni H334 ni H314. Le chromate de sodium porte les trois, et en outre la toxicité pour la reproduction et l'atteinte répétée aux organes. Les deux se forment à la même interface, selon l'oxyde basique de l'isolant. La section 3 traite ce que le terme collectif masque à cet endroit. [242]

Mesure, surveillance de la santé et quarante ans

Regulation 10(1) subordonne la mesure à une condition. Il est mesuré lorsque l'évaluation des risques révèle que la mesure est « requisite » pour maintenir la maîtrise adéquate ou pour protéger la santé des salariés. Regulation 10(2) permet d'y renoncer lorsque l'employeur peut établir d'une autre manière que les exigences de Regulation 7(1) sont satisfaites. Il n'existe pas d'obligation de mesure dans son principe. [239]

Regulation 10(4) renvoie, pour certaines substances et certains procédés, au Schedule 4 et au Schedule 5 avec des intervalles de mesure fixes. La seule entrée relative au chrome qui y figure est « Spray given off from vessels at which an electrolytic chromium process is carried on, except trivalent chromium », avec un intervalle de quatorze jours. Le chromage électrolytique est ainsi impérativement à surveiller. Pour les travaux sur des pièces chaudes isolées, il n'existe pas d'entrée correspondante. [239]

Regulation 10(5) règle la conservation. Si l'enregistrement est représentatif de l'exposition personnelle de salariés identifiables nominativement, il est à tenir disponible au moins quarante ans à compter de la dernière inscription, dans tous les autres cas au moins cinq ans. Les quarante ans ne naissent donc que si la mesure a été rapportée aux personnes. Sans mesure, il ne naît aucun registre à partir duquel une charge pourrait être reconstituée ultérieurement, et le régime COSHH ne connaît pas de prescription correspondant au registre des expositions allemand prévu au paragraphe 10a du règlement sur les substances dangereuses. [239, 200]

Regulation 11 règle la surveillance de la santé. Elle est impérative lorsque le salarié est exposé à une substance nommée au Schedule 6 lors du procédé qui y est nommé, et en outre lorsqu'une maladie ou une atteinte à la santé identifiable peut être liée à l'exposition, que sa survenance est suffisamment probable dans les conditions concrètes et qu'il existe pour sa détection une méthode appropriée et à faible risque pour le salarié. Le Schedule 6 ne nomme pour le chrome que « Potassium or sodium chromate or dichromate. In manufacture. » Le chromate de calcium n'y figure pas, et la restriction « in manufacture » ne couvre pas la maintenance d'une installation isolée. La voie impérative passant par le Schedule 6 est ainsi barrée ; reste la seconde voie, par les conditions de Regulation 11(1) lettre b. [239]

Regulation 11(3) exige un dossier médical comportant les indications approuvées par l'autorité, à tenir disponible au moins quarante ans à compter de la dernière inscription. Le délai correspond au délai allemand et à celui du droit de l'Union. Il ne s'applique que si la surveillance de la santé est déclenchée. [239]

Regulation 9 exige de maintenir les mesures de protection en état d'efficacité et prescrit pour les installations d'aspiration un examen approfondi au moins tous les quatorze mois, pour la protection respiratoire, à l'exception des modèles à usage unique, un examen approfondi à des intervalles appropriés. Les enregistrements de ces examens sont à conserver au moins cinq ans. [239]

Instruction et protection des tiers

Regulation 12(1) exige de l'employeur qui exécute des travaux susceptibles d'exposer un salarié à une substance dangereuse pour la santé une information, des consignes et une instruction appropriées et suffisantes. Regulation 12(2) nomme les contenus, parmi lesquels les noms des substances et les risques qui leur sont liés, l'accès aux fiches de données de sécurité, les valeurs limites pertinentes, les résultats essentiels de l'évaluation des risques, les précautions à prendre, les résultats des mesures et les résultats résumés de la surveillance de la santé. [239]

Regulation 12(4) va au-delà de l'entreprise propre. L'employeur doit assurer que toute personne, « whether or not his employee », qui exécute des travaux en lien avec ses obligations issues de ces prescriptions reçoive une information, des consignes et une instruction appropriées et suffisantes. Les entreprises extérieures et les entrepreneurs individuels qui travaillent sur une installation sont ainsi inclus. [239]

La même chose découle de la loi. La Section 2(1) du Health and Safety at Work etc. Act 1974 oblige chaque employeur à assurer, dans la mesure où cela est raisonnablement praticable, la santé, la sécurité et le bien-être de ses salariés au travail ; la Section 2(2) lettre c nomme à ce titre l'information, les consignes, l'instruction et la surveillance. La Section 3(1) étend l'obligation aux personnes qui ne sont pas employées par lui et qui peuvent être concernées par son activité. La Section 7 oblige chaque salarié à exercer une diligence raisonnable pour lui-même et pour autrui et à coopérer avec l'employeur dans l'accomplissement de ses obligations. [238]

Surveillance, infraction pénale et obligation de déclaration

La surveillance travaille avec deux types d'injonction. Selon la Section 21, un inspecteur peut délivrer un improvement notice lorsqu'une prescription est violée, avec un délai pour y remédier. Selon la Section 22, il peut délivrer un prohibition notice lorsqu'une activité comporte le risque d'une atteinte grave aux personnes ; ce notice peut prendre effet immédiatement et interdit l'activité jusqu'à ce que les manquements soient corrigés. Le droit britannique ne connaît pas de déclaration à l'autorité avant le début de travaux avec des cancérogènes. [238]

Les obligations sont assorties de sanctions pénales. La section 30 reproduit le cadre : les infractions prévues à la Section 33(1) lettres a et c sont poursuivables au choix par procédure sommaire ou sur acte d'accusation, dans ce dernier cas avec une amende illimitée et une peine privative de liberté pouvant aller jusqu'à deux ans selon le Schedule 3A. [112]

La détermination de la peine pour les entreprises suit une ligne directrice propre. La ligne directrice du Sentencing Council pour les infractions aux obligations de l'employeur et aux prescriptions de protection au travail s'applique depuis le 1er février 2016, dernièrement mise à jour le 5 octobre 2026. Elle forme une matrice du degré de culpabilité et de la catégorie de dommage et échelonne les fourchettes d'amende selon le chiffre d'affaires de l'entreprise ; le cadre global va de 50 livres à 10 millions de livres. La survenance d'un dommage n'est pas une condition, parce que la ligne directrice apprécie de manière autonome la probabilité du dommage et le nombre de personnes concernées. [250]

À côté de la sanction se trouve le remboursement des frais. Selon les Regulations 23 et 24 des Health and Safety and Nuclear (Fees) Regulations 2022, l'autorité facture les frais d'une intervention lorsqu'un inspecteur constate une violation substantielle d'une prescription de protection au travail, dans la limite des frais raisonnables effectivement engagés. Il n'existe pas de taux horaire fixé par la loi ; l'autorité le publie, et il s'élève, au 1er avril 2026, à 188 livres par heure. Regulation 24(13) exclut de ce remboursement des frais les travaux exécutés sous une licence amiante. Pour le chrome(VI), il n'existe pas de licence et donc pas d'exemption correspondante. [249]

L'obligation de déclaration se rattache au diagnostic. Selon la Regulation 9 des Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations 2013, l'employeur doit déclarer à l'autorité lorsqu'il dispose d'un diagnostic écrit portant sur une des maladies nommées au Schedule 1 et que la personne concernée exerce l'activité correspondante. Le Schedule 1 partie 1 numéro 3 nomme le cancer d'origine professionnelle. Regulation 8 couvre la dermatite professionnelle et l'asthme professionnel. Une déclaration de l'exposition en tant que telle, sans diagnostic, n'est pas prévue. [245]

Déchets

La classification passe par une chaîne de renvois. La Regulation 4(1) des Hazardous Waste (England and Wales) Regulations 2005 détermine la notion de déchet dangereux par la liste de la décision 2000/532/CE dans sa version en vigueur. Les List of Wastes (England) Regulations 2005, qui figuraient auparavant à côté, sont abrogées depuis le 1er juillet 2015. Pour le pays de Galles s'applique un règlement propre de l'année 2005, pour l'Écosse les Special Waste Regulations 1996 dans leur version de 2004, pour l'Irlande du Nord les Hazardous Waste Regulations (Northern Ireland) 2005. [246, 257]

Les codes déchets sont les mêmes que sur le continent. Pour l'isolation démontée s'applique l'entrée miroir 17 06 03*, « other insulation materials consisting of or containing hazardous substances ». Pour les revêtements et les matériaux réfractaires entrent en considération 16 11 03* et 16 11 05*, pour les chromates l'entrée 16 09 02*. Une entrée miroir exige un examen des propriétés de danger ; sans examen, le déchet n'est pas classé comme non dangereux. [246]

Le seuil d'appréciation figure dans le guide technique WM3. Le guide commun des autorités environnementales d'Angleterre, du pays de Galles, d'Écosse et d'Irlande du Nord, première édition dans la version v1.2.GB d'octobre 2021, fixe pour la propriété de danger HP 7, cancérogène, une limite de concentration de 0,1 pour cent en masse pour les substances de catégorie 1A ou 1B avec H350. Le guide ne connaît pour cette propriété aucun seuil de prise en compte en dessous duquel une teneur resterait hors de compte. [247]

Pour la manipulation s'applique une interdiction de mélange. La Regulation 19 des Hazardous Waste Regulations interdit le mélange de différentes catégories de déchets dangereux ainsi que le mélange de déchets dangereux avec des déchets non dangereux, et la Regulation 20 détermine les exceptions et l'obligation de séparation, dans la mesure où cela est techniquement et économiquement réalisable. Le règlement ne comporte pas d'interdiction expresse de dilution sur le modèle du paragraphe 9a de la loi allemande sur l'économie circulaire. Les Regulations 35 et 36 exigent pour chaque transport un consignment note avec des indications sur le producteur, le code déchet et le lieu de destination. [246, 209]

Au-dessus se situe l'obligation générale de diligence. La Section 34 de l'Environmental Protection Act 1990 oblige quiconque produit, transporte, traite ou élimine des déchets à des mesures raisonnables afin que le déchet ne soit pas traité de manière illicite, ne s'échappe pas et ne soit remis qu'à des personnes habilitées, avec une description écrite exacte. La description exacte suppose la classification exacte. [248]

Droit des substances : GB CLP et UK REACH

Depuis le 1er janvier 2021, l'autorité HSE tient, en tant que GB CLP Agency, une liste de classification contraignante propre. La GB mandatory classification and labelling list, publiée le 17 février 2025 et dernièrement mise à jour le 22 septembre 2025, comporte le chromate de calcium sous le numéro index 024-008-00-9 comme Carc. 1B avec H350, le chromate de sodium sous 024-018-00-3 et l'entrée collective pour les composés du chrome(VI) sous 024-017-00-8 avec H350i. Les classifications correspondent ainsi à celles du droit de l'Union. [242]

Le droit de l'autorisation diverge. Dans UK REACH, l'annexe XIV mentionne le chromate de sodium à l'entrée 22. Le chromate de calcium ne figure ni à l'annexe XIV ni sur la liste des substances candidates. Aucune des restrictions ne couvre la formation in situ sur un composant. L'obligation d'autorisation se rattache de toute manière à l'utilisation d'une substance mise sur le marché et non à ce qui se forme à l'interface ; la section 25 traite ce point. Les autorisations délivrées au titre d'EU REACH pour les substances du chrome(VI) ont, selon l'indication de l'autorité, expiré le 21 septembre 2024. [244]

Une procédure britannique correspondant à l'interdiction d'utilisation à l'échelle de l'Union proposée par l'ECHA en avril 2025 ne m'est pas connue. L'état britannique est donc le suivant : classification comme dans l'Union, autorisation et restriction plus étroites. [244, 215]

L'écart avec le régime de l'amiante

Les Control of Asbestos Regulations 2012 montrent ce qu'un ordre juridique prescrit pour un risque de procédé reconnu. Regulation 5 exige, avant des travaux de démolition, de maintenance et des travaux similaires, la détermination de la présence, de la nature et de l'état de l'amiante et dispose, pour le cas de doute, que sa présence est à supposer. Regulation 6 exige la consignation des résultats essentiels indépendamment de la taille de l'entreprise. Regulation 7 exige un plan de travail écrit avec un contenu minimal prescrit. [123, 251]

Cela continue avec la licence et la déclaration. Regulation 8 subordonne les travaux soumis à licence à une autorisation de l'autorité, avec un délai de dépôt de la demande de 28 jours et une durée de validité de trois ans au maximum. Regulation 9 exige la déclaration des travaux soumis à licence quatorze jours avant le début. Regulation 10 prescrit les contenus de l'instruction en onze points nommés individuellement, des propriétés de la substance aux procédures d'urgence en passant par la décontamination et la manipulation des déchets. [251]

La mesure et la libération sont formalisées. Regulation 19 exige la mesure de la concentration en fibres d'amiante à intervalles réguliers et lors de toute modification susceptible d'influencer l'exposition. Regulation 20 et Regulation 21 exigent, pour la mesure, le certificat de libération et l'analyse des prélèvements, l'accréditation selon ISO 17025 et, pour la libération, en outre selon ISO 17020. Le guide HSG248, dans sa deuxième édition de mai 2021, décrit la procédure de libération en quatre étapes et fixe pour le prélèvement d'air dans le confinement un critère numérique : tous les résultats doivent être inférieurs à 0,010 fibre par millilitre. [251, 252]

Pour le chrome(VI), rien de tout cela n'existe. Il n'y a pas d'obligation d'investigation avant la maintenance ni de règle de présomption, pas de plan de travail prescrit, pas de licence, pas de déclaration, pas de catalogue de contenus d'instruction, pas d'obligation de mesure dans son principe, pas de laboratoires accrédités, pas de procédure de libération et pas de critère de propreté pour la libération d'une surface ou d'un composant. Les deux substances sont, selon la même prescription, des cancérogènes de catégorie 1A ou 1B. La profondeur procédurale diffère complètement. [239, 251]

Ce que le corpus réglementaire britannique nomme

Aucun acte juridique britannique ne nomme la formation de chromates sur des pièces chaudes isolées alliées au chrome. La seule entrée relative au chrome dans les intervalles de mesure des COSHH Regulations concerne le chromage électrolytique, la seule entrée relative au chrome dans la surveillance de la santé la fabrication de chromate de potassium et de sodium. L'isolation, la haute température et les pièces chaudes n'apparaissent pas dans le règlement. La liste des déchets ne couvre le cas que par l'entrée miroir relative au matériau isolant, sans nommer le chrome. [239, 246]

Les publications de l'autorité restent en retrait. L'Approved Code of Practice L5 correspondant, dans sa sixième édition 2013, couvre expressément aux paragraphes 57, 69 et 87 les substances qui se forment comme déchet ou comme sous-produit ou qui sont libérées par des procédés ; une recherche en texte intégral portant sur « insulat » ne donne aucun résultat dans ce document. Le chrome y apparaît pour le chromage et la fabrication de chromates. La fiche d'information INDG346 énumère, sous la question de savoir où le chrome(VI) est présent, la fabrication et l'utilisation de l'acier inoxydable et d'autres alliages de chrome y compris le soudage et le coupage, les pigments pour peintures et céramiques, les catalyseurs, la fabrication de colorants, le tannage du cuir et le chromage. L'isolation manque dans cette énumération. Je n'ai pas trouvé de publication de l'autorité qui nomme la voie de formation. [240, 88]

Le cas est nommé d'un autre côté. Le Safety Bulletin Summary de la fédération professionnelle britannique Energy UK, de septembre 2019, le décrit complètement. Il nomme comme lieux les conduites de vapeur haute pression, les composants de chambre de combustion et les voies de gaz d'échappement de turbines à gaz, lorsque de l'isolation contenant du calcium ou des agents de séparation contenant du calcium sont utilisés, et retient comme conditions de formation : « 1. Calcium based product is present 2. Temperatures greater than 300°C 3. Chromium Steel is present. » Il signale la coloration jaune, semblable au soufre, difficile à reconnaître sous une lumière à vapeur de sodium, et recommande de partir, dans toutes les centrales, de la présence de chrome(VI). La section 26 traite la pratique de l'huile dégrippante qui y est nommée. [92]

S'y ajoutent deux organismes spécialisés. L'institut de recherche en médecine du travail IOM nomme, dans une fiche d'information non datée, « calcium containing insulation systems » parmi les occurrences et retient : « Cr VI dust can be commonly found on high-temperature insulated parts such as large engines. » L'Energy Institute tient dans sa Toolbox une page qui décrit la formation sur l'acier inoxydable en contact avec des matériaux contenant de l'oxyde de calcium, tels que des produits d'étanchéité pour filetages ou de l'isolation, et signale l'augmentation à des températures élevées ; le matériel est, selon l'indication de la page, repris d'Energy Safety Canada. [253, 254]

La fédération professionnelle compétente garde le silence. La Thermal Insulation Contractors Association publie, parmi ses documents techniques, du matériel sur les cloisonnements coupe-feu, les traversées de tuyauteries, les pompes à chaleur et les gaines d'air extérieur. Sur le chrome(VI) ou les chromates, on n'y trouve rien. L'association de prestataires de formation UKATA tient un programme de formation sur la sensibilisation au chrome(VI), qui nomme le soudage, le chromage, la fabrication de pigments, la fonderie et l'enlèvement de revêtements et laisse de côté l'isolation. Les entreprises qui exécutent ces travaux reçoivent ainsi leurs documents sectoriels sans la voie de formation traitée ici. [255, 256]

La situation est donc la suivante. Le mécanisme est nommé au Royaume-Uni depuis septembre 2019, avec température de seuil et partenaire de réaction, dans un document destiné aux membres d'une fédération professionnelle de la production d'électricité, qui n'est pas trouvable sur le site internet de cette fédération. L'autorité ne l'a repris dans aucune de ses publications. L'absence d'une indication de l'autorité ne change rien aux obligations, parce que celles-ci dépendent de la notion de substance et non d'une liste. [92, 239]

Ce qui en découle pour une entreprise au Royaume-Uni

Les obligations commencent avant le travail. Regulation 6(1) interdit le début sans évaluation appropriée et suffisante, et Regulation 6(2) lettre e nomme la maintenance avec un potentiel d'exposition élevée comme objet d'évaluation propre. Une évaluation qui ne considère pas la voie de formation sur des pièces chaudes isolées alliées au chrome, bien que les matériaux des composants et les températures de service soient connus, ne satisfait pas à cette exigence. [122]

Les mesures suivent un ordre de priorité fixe. Est d'abord à examiner la substitution selon Regulation 7(2), ensuite la conception des procédés et la maîtrise à la source selon Regulation 7(3), et seulement ensuite l'équipement de protection individuelle. Pour les cancérogènes s'ajoutent les mesures de Regulation 7(5), du confinement au nettoyage des surfaces. En fait partie, pour une substance portant H350 ou H350i, la minimisation au niveau le plus bas raisonnablement praticable selon Regulation 7(7) lettre c, qui s'applique en sus de la valeur limite. Qui tient la substitution pour non praticable en porte, selon la Section 40 de la loi, la charge de la preuve dans la procédure. [113, 239, 238]

Pour la valeur limite, l'état en vigueur est à observer. Déterminant est EH40 dans sa quatrième édition 2020 avec 0,01 mg/m³ comme moyenne sur huit heures, et non la valeur de 0,05 mg/m³ issue de la fiche d'information non mise à jour de l'autorité. Le respect de la valeur limite ne met pas fin aux obligations, parce que Regulation 7(7) place la minimisation à côté et que le Schedule 2A exige la prise en compte de la peau et de l'ingestion. [241, 239]

La documentation dépend de la taille de l'entreprise. À partir de cinq salariés, les résultats essentiels de l'évaluation et les étapes prises sont à consigner selon Regulation 6(4). Si la mesure est rapportée aux personnes, les enregistrements sont à tenir disponibles quarante ans. En fait partie l'examen de la question de savoir si la surveillance de la santé est déclenchée selon Regulation 11(1) lettre b, parce que la voie passant par le Schedule 6 n'est pas ouverte pour ce cas. [239]

L'instruction va au-delà du personnel propre. Selon Regulation 12(4), toute personne qui exécute des travaux en lien avec les obligations de l'employeur est à inclure, qu'elle soit salariée ou non. En font partie les entreprises d'isolation, les entreprises de maintenance et les entrepreneurs individuels qui travaillent sur la même installation. La Section 3(1) de la loi oblige en outre l'exploitant à l'égard de quiconque peut être concerné par son activité. [239, 238]

Le déchet est à classer avant l'élimination. L'isolation démontée relève d'une entrée miroir dont la classification exige un examen ; le seuil pour la propriété cancérogène est, selon WM3, de 0,1 pour cent en masse. En font partie la séparation prévue aux Regulations 19 et 20 et le consignment note prévu aux Regulations 35 et 36. La description écrite prévue à la Section 34 de l'Environmental Protection Act 1990 doit être exacte. [246, 247, 248]

Une désignation par l'autorité n'est pas à attendre. Les obligations issues des Regulations 2(1), 6 et 7 dépendent de la propriété de la substance et s'appliquent indépendamment du fait que l'autorité mentionne la voie de formation dans une publication. La règle de charge de la preuve de la Section 40 agit dans le même sens, parce qu'elle impose à l'employeur la preuve de la limite du praticable. Pour la production d'électricité, l'information est disponible depuis septembre 2019 au sein de la fédération professionnelle propre. [239, 238, 92]

39. Annexe : les matériaux isolants contenant des oxydes basiques et leurs lieux de mise en œuvre

Les isolants courants du commerce qui suivent contiennent les oxydes basiques décrits, lesquels peuvent déclencher une formation thermochimique in situ des composés du chrome(VI) décrits. Il ne s'agit pas de suppositions, mais de déductions tirées des indications des fabricants, d'avertissements d'utilisateurs et de mes propres observations de terrain.

La colonne Justificatif indique l'origine de l'information. H désigne une indication de fabricant ou de norme, W un avertissement ou une indication d'utilisateur, F une observation de terrain personnelle. Lorsqu'un fabricant ne publie pas de chiffres, le tableau le mentionne expressément.

Les teneurs indiquées se rapportent à l'analyse des oxydes de l'isolant à l'état de livraison. La question de savoir si les oxydes deviennent disponibles à l'interface, et dans quelle mesure, fait l'objet des sections 9 à 12 de la présente analyse.

Isolants contenant des oxydes de calcium, de sodium et d'autres oxydes basiques

Matériau et forme commerciale	Teneur documentée en oxydes basiques	Justificatif
Verre E, fil et tissu pour circuits imprimés et aéronautique	CaO 16 à 25 %, MgO 0 à 5 %, Na_2O et K_2O 0 à 2 %	H [167]
Verre E, applications générales : tissu, ruban, mat aiguilleté, roving	CaO et MgO ensemble 16 à 30 %, oxydes de métaux alcalins 0 à 2 %	H [167]
Verre E, indication du fabricant pour les fibres textiles et les tissus	CaO 16 à 25 %, Na_2O et K_2O 0 à 1 %, MgO 0 à 5 %	H [168]
Verre ECR, modification sans bore du verre E	aucun tableau d'oxydes propre dans la norme ; elle définit l'ECR uniquement comme une modification sans bore du verre E. Une comparaison des deux verres donne CaO 16 à 25 % pour le verre E au bore et 17 à 25 % pour le verre sans bore ; dans la comparaison directe du même travail, le verre sans bore atteignait CaO 22,3 à 22,9 % contre 19,55 à 22,35 % pour le verre borosilicate	H [167, 169]
Laine minérale, laine de roche et laine de verre : matelas, matelas grillagé, panneau, coquille	Na_2O, K_2O, CaO, MgO et BaO ensemble plus de 18 pour cent en masse ; cette valeur fait partie de l'identité de la substance selon l'annexe VI, index 650-016-00-2, et n'est pas une propriété de lot	H [170]
Laine AES, définition de la substance par les fabricants	oxyde de calcium et oxyde de magnésium ensemble 18 à 43 %, dioxyde de silicium 50 à 82 %	H [171]
Laine AES, matelas (Superwool Plus Blanket)	CaO 26 à 32 %, MgO 3 à 7 %	H [171]
Laine AES, panneau (Superwool Plus Board)	CaO et MgO ensemble 31 %	H [171]
Laine AES, matelas (Insulfrax LT)	CaO 27 à 33 %, MgO 2,5 à 6,5 %	H [172]
Laine AES, matelas (Insulfrax 1300 HT)	CaO et MgO ensemble 21 à 27 %	H [172]
Laine AES, variante au silicate de magnésium (Isofrax)	MgO 18 à 27 %, aucune teneur en CaO déclarée	H [172]
Laine de silicate d'aluminium et fibre céramique (ASW, RCF) : matelas, panneau, papier, module	Na_2O, K_2O, CaO, MgO et BaO ensemble inférieurs ou égaux à 18 pour cent en masse ; valeur de séparation par rapport à l'index 650-016-00-2. Les fiches techniques des fabricants ne chiffrent pas les oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux	H [174, 78, 173]

Matériau et forme commerciale	Teneur documentée en oxydes basiques	Justificatif
Silicate de calcium, panneau et pièce moulée	CaO 38 à 43 %	H [175]
Silicate de calcium, coquille et bloc	silicate de calcium synthétique au moins 90 % ; aucune répartition entre CaO et SiO_2 n'est publiée	H [176]
Perlite expansée : vrac et pièce moulée	Na_2O 3,7 %, K_2O 5,3 %, CaO 0,5 %, MgO 0,1 %. L'analyse provient d'une perlite de filtration ; pour les isolants de tuyauteries et de réservoirs, les fabricants ne publient pas d'analyse des oxydes	H [177]
Vermiculite expansée : vrac et panneau	MgO 21,5 à 25,5 %, K_2O 3 à 6 %, CaO 2,0 à 6,0 % ; la fiche technique mentionne en outre Cr_2O_3 à 0,01 à 0,15 %	H [178]
Matelas d'aérogel	aucun composé du calcium ni du sodium déclaré ; plus de 50 % de verre textile sans spécification chimique. La fiche du matelas classé jusqu'à 650 °C mentionne un voile de fibres, l'ancienne version un voile de fibres de verre ; aucune analyse des oxydes de ce verre ne figure sur les fiches. Les matelas classés jusqu'à environ 650 °C portent, selon des observations propres, un composant en verre E, pour lequel la norme indique CaO 16 à 25 %	H [179, 180, 167], F
Fibre de basalte, tissu et mat aiguilleté	le fabricant ne publie aucune ventilation des oxydes. Des indications accessibles au public pour la fibre de basalte donnent SiO_2 53 %, Al_2O_3 18 %, Fe_2O_3 10 %, CaO 9 %, MgO 5 %, Na_2O 3 %, K_2O 1 % et TiO_2 1 % ; une synthèse donne pour la roche basaltique CaO 8,59 %, MgO 4,63 %, Na_2O 3,34 %, K_2O 1,46 % et Cr_2O_3 0,06 %	H [181, 182, 183]
Papier et feutre en fibre céramique	liant 2 à 15 % organique ou 50 à 70 % inorganique ; l'identité de la substance du liant inorganique n'est pas indiquée	H [173]
Pâte de montage pour pièces chaudes, contenant du calcium	hydroxyde de calcium 10 à moins de 20 pour cent en masse	H [184]

Deux lignes méritent une remarque. La définition de la substance de la laine minérale et celle de la fibre céramique sont délimitées l'une par rapport à l'autre par la même teneur en oxydes : au-delà de 18 pour cent en masse, on aboutit à la laine minérale, jusqu'à 18 pour cent en masse inclus à la fibre céramique. La teneur en oxydes basiques n'est donc pas une caractéristique accessoire, mais le critère de distinction des deux groupes de substances. Et la formule brute de l'annexe VI nomme expressément les oxydes de sodium, de potassium, de calcium, de magnésium et de baryum. [170, 174]

Applications avec ces isolants

Domaine d'application	Composants isolés, isolant et forme commerciale	Température	Justificatif
Yachts et superyachts	Conduite d'échappement, collecteur d'échappement, turbocompresseur à sec et soupapes indicatrices ; matelas isolant avec habillage en tôle riveté, habillage isolant métallique en construction à cassettes, coques isolantes textiles amovibles. Des sections amovibles sont expressément prévues pour la maintenance	surface exigée en dessous de 220 °C ; composants du compartiment moteur jusqu'à 750 °C	H [185, 186]
Porte-conteneurs et navires de commerce, moteur deux temps	Collecteur d'échappement et conduites d'échappement ; isolation avec recouvrement en tôle galvanisée	non indiquée dans le document	H [187]
Porte-conteneurs et navires de commerce, moteur quatre temps	Conduite d'échappement depuis la sortie du turbocompresseur jusqu'à la cheminée en passant par la chaudière de récupération et le silencieux, ainsi que l'installation SCR ; coussins isolants au turbocompresseur, isolation continue à partir de 30 mm d'épaisseur avec tôle de recouvrement, isolation SCR réalisée de façon démontable	sortie de turbine 390 °C en fonctionnement normal, 450 °C au dimensionnement, 554 °C en fonctionnement de secours	H [187, 188], W [137]
Navires de croisière	Diesels auxiliaires, conduites d'échappement et épuration des gaz d'échappement ; mêmes séries de moteurs et même exécution de l'isolation que dans le fonctionnement quatre temps de la marine marchande, matelas amovibles sur la robinetterie	comme pour le moteur quatre temps	F
Locomotives et véhicules ferroviaires	Turbocompresseur d'échappement, collecteur d'échappement, lignes d'échappement complètes et post-traitement des gaz d'échappement ; pièce isolante textile moulée selon la norme de protection contre l'incendie EN 45545, isolation intégrale avec coque extérieure en feuille d'acier inoxydable ou en tôle fine, matelas isolants cousus avec du silicate alcalino-terreux, du verre E ou de la silice comme isolant et feuille d'acier inoxydable ou feuille à base de nickel sur la face chaude, expressément amovibles et réutilisables	pièce moulée jusqu'à 650 °C ; types de matelas jusqu'à 816 °C et jusqu'à 1 149 °C	H [186, 189]
Engins de chantier et machines de travail mobiles	Turbocompresseur, collecteur, ligne d'échappement, modules de filtre à particules et de SCR, isolation de soubassement et protection thermique du compartiment moteur ; pièces moulées fibreuses tridimensionnelles avec coques extérieures en feuille d'acier inoxydable ou en tôle fine	composants jusqu'à 750 °C, réduction de la surface en dessous de 220 °C	H [186]
Unités de cogénération et production combinée de chaleur et d'électricité	Ligne d'échappement et turbocompresseur d'échappement du moteur à gaz ; habillage isolant métallique sous forme de modules entièrement amovibles	gaz d'échappement 421 °C à pleine charge, 476 °C à mi-charge	H [190, 186]

Domaine d'application	Composants isolés, isolant et forme commerciale	Température	Justificatif
Installations de remplacement du réseau et d'alimentation électrique de secours, y compris dans les centres de données	Conduite d'échappement du groupe diesel ; coquilles en silicate de calcium ou en laine minérale, posées en deux couches, avec enveloppe, frettes et fil de ligature en acier inoxydable 304. Le fabricant recommande expressément le silicate de calcium dans ce cas, parce que le liant organique de la laine minérale brûle à partir d'environ 177 °C	371 °C jusqu'à près de 538 °C	H [191]
Turbines à gaz et à vapeur	Conduit de gaz d'échappement, pièce de transition, carter de turbine, chaudière de récupération, silencieux et cheminée ; isolation intérieure derrière des tôles de liner en acier 304 ou 409, coussins isolants flexibles, matelas isolants fibreux et modules fibreux dans la chaudière de récupération, matelas isolants sur le carter, amovibles et réutilisables	carter au-dessus de 500 °C, conduit de gaz d'échappement au-dessus de 480 °C, chaudière de récupération jusqu'à 1 093 °C	H [192], W [193]
Véhicules routiers, poids lourds et voitures de tourisme	Écrans thermiques, collecteur en fonte, ligne d'échappement, filtre à particules, SCR et tapis de support dans le catalyseur ; écran thermique en construction à cassettes avec tôle de recouvrement ou feuille en acier inoxydable ou en aluminium et garniture isolante intérieure, mat aiguilleté comme tapis de support	écran thermique jusqu'à 1 100 °C selon le matériau ; température de pointe au collecteur 1 000 °C	H [194, 195, 196, 48]
Fours industriels, chaudières, incinération des ordures ménagères et installations de biomasse	Parois de chaudière, conduits de fumées et tuyauteries ; matelas grillagés en laine de roche avec treillis métallique galvanisé ou en acier inoxydable	jusqu'à 640 °C, exécution lourde jusqu'à 649 °C	H [197]
Installations chimiques et raffineries	Tuyauteries en aciers austénitiques, robinetterie et brides ; matelas grillagés, coquilles et capots amovibles	jusqu'à 640 °C, coquilles jusqu'à 650 °C	H [197]

Le côté matériau est chiffré dans les mêmes documents. Selon la norme européenne des matériaux, l'acier inoxydable commence à 10,5 pour cent de chrome. Pour le collecteur, le tube, le catalyseur et le corps de silencieux, un fabricant cite le matériau ferritique 1.4509 à 17,80 pour cent de chrome, avec une résistance à l'oxydation jusqu'à 950 °C, ainsi que le 1.4521 à 19 pour cent de chrome jusqu'à 1 025 °C ; le même fabricant indique la température de pointe au collecteur à 1 000 °C. Dans le conduit de gaz d'échappement de la turbine à gaz, les tôles de liner sont en acier 304 ou 409, la fixation en 304. Sur la conduite d'échappement du groupe électrogène de secours, l'enveloppe, les frettes et le fil de ligature sont en 304. [196, 193, 191]

Les deux côtés de la réaction décrite à la section 9 se trouvent ainsi côte à côte dans les mêmes composants : l'acier allié au chrome comme source de chrome et l'isolant comme support des oxydes basiques. Les tableaux ne disent rien de l'ampleur avec laquelle la réaction se déroule dans le cas particulier. Ils disent où les conditions en sont réunies.

Pour les systèmes d'échappement des moteurs quatre temps, un avertissement du fabricant existe. Dans l'Instruction WS00Q563, Wärtsilä nomme des résidus de Cr(VI) sur des composants du système d'échappement, sur les tôles des caissons d'isolation de l'échappement et sur des pièces de turbocompresseur, et nomme l'isolant à base de calcium et la pâte de montage calcique comme source de calcium à partir de 400 °C. [137]

40. Conclusion

Principes de base et technique d'isolation

Le chromate de calcium et le chromate de sodium sont des composés du chrome(VI) formables de manière ciblée dans des conditions thermiques basiques et oxydantes. Le brevet historique et les constats expérimentaux à l'interface établissent un processus de transformation de matière prévisible, à prendre en compte lors du choix des matériaux et de l'évaluation des risques.

L'erreur systémique se situe là où la performance d'isolation thermique, le comportement des fibres et l'état de livraison sont traités comme une évaluation de sécurité suffisante, tandis que la formation in situ de substances dangereuses pendant l'exploitation est insuffisamment prise en compte. Des proportions d'oxydes basiques justifient une indication de danger ; la protection et la prévention ne doivent être orientées ni uniquement sur des valeurs atmosphériques, ni sur des dépôts visibles ou des tests rapides positifs.

Le transport en phase gazeuse et la formation de chromates dépendante du calcium et du sodium se complètent. Toshiba étudie la prévention ; le mandat ECFIA montre que la question était connue au sein de l'association européenne des fabricants. [11, 26, 35-38]

Véhicules

La contamination des véhicules concerne en outre la manipulation, la maintenance, la remédiation durable et les coûts pour le propriétaire. Les droits à la garantie des défauts en droit de la vente et les mesures des fabricants relevant du droit de la sécurité offrent dans l'UE des voies d'examen propres. [22, 23, 46, 47]

Résidus d'incinération

Les résidus d'incinération, y compris les cendres de grille, la phase d'arrêt et les cendres de crémation, étendent l'appréciation à l'exploitation, à la révision et aux voies environnementales. La mise en œuvre du savoir documenté dans l'analytique, la protection et l'information est à examiner. [30-34, 43-45]

Postface de l'auteur

L'affirmation selon laquelle l'oxyde de calcium participe à la formation de chromates cancérogènes paraît d'abord disproportionnée. Une substance qui passe dans la technique d'isolation pour un constituant évident et qui n'apparaît dans aucune considération sur le cancer serait la cause d'un constat qui concerne des parcs d'installations entiers. Celui qui l'entend pour la première fois a le droit d'être sceptique. Le processus est cependant décrit thermodynamiquement et confirmé expérimentalement depuis des décennies, et les preuves en figurent dans cette expertise.

Il ne m'en a pas été autrement en 2019. J'avais documenté pendant des décennies les compositions de tissus de verre, de laines minérales et de laines de basalte et je n'avais pourtant jamais posé la question du calcium comme partenaire de réaction. Aucun de mes fournisseurs n'a pu y répondre à l'époque. C'est seulement à partir de la littérature des brevets, des études d'interface, des documents de fabricants et de mes propres constats de terrain qu'il est apparu de quoi il s'agit et quelle est l'ampleur de la chose.

La conséquence pratique de cet exposé est considérable. Les isolants contenant de l'oxyde de calcium sont la norme dans la technique haute température et se trouvent sur des chaudières, des turbines, des moteurs, des systèmes d'échappement, des propulsions de navires et des engins de chantier. Il n'existe pas d'indication fiable des quantités, parce que ce parc n'a jamais été recensé sous l'angle de la formation de chromates. Tant que la part concernée n'est pas délimitée, il n'est pas non plus possible de définir des priorités.

Je comprends aussi la réserve que je perçois chez les fabricants d'isolants actuels à aborder et à communiquer cette problématique. Et, en tant que fournisseur de longue date, je peux imaginer le dilemme des fabricants de moteurs et de turbines ainsi que des entreprises d'isolation qui travaillent avec eux.

Je sais également comment des tensions naissent dans une usine d'incinération des déchets, sur une unité de cogénération, dans l'exploitation d'une centrale ou dans une salle des machines lorsque des mesures de protection sont introduites qui modifient le déroulement du travail établi. Elles touchent des personnes qui ont exécuté leur travail pendant des années sans réclamation, et elles soulèvent en même temps la question de l'exposition passée.

Aucun de ces points ne change quoi que ce soit à la chose elle-même. Ils ne devraient pas nous empêcher de poursuivre la sécurité de l'homme et de l'environnement et d'engager les mesures nécessaires. Nous avons déjà une fois, y compris dans les domaines traités ici, détourné le regard beaucoup trop longtemps. Comme indiqué au début : que l'histoire ne se répète pas.

Markus Sommer

41. Déclaration d'intérêts

Je travaille dans l'isolation haute température depuis 1988 et sur la formation de composés du chrome(VI) sur les pièces chaudes isolées en acier chromé depuis 2019. La devise des Experts du chromate est détecter, maîtriser, prévenir, et elle décrit aussi ce à quoi je participe. De ce travail sont issus des développements auxquels j'ai contribué, tant pour des isolants sans oxydes alcalins et alcalino-terreux que pour des produits de décontamination pendant les travaux d'assainissement et de maintenance.

Je suis associé gérant de Kavarmat® Sp. z o.o. Sp.k. à Długołęka et associé de Cleansulation® Technology B.V. à Almere. Les marques Kavarmat®, Cleansulation® et VitroSilk® m'appartiennent personnellement. Cela comprend les offres sur kavarmat.com, cleansulation.tech et kavar.shop, dont le KavarClean®Redox Powder cité à la section 26. Les sociétés dans lesquelles je détiens une participation exécutent des travaux d'isolation et d'assainissement sur des installations contaminées par des chromates et sont soumises aux mêmes obligations que celles exposées dans cette analyse.

Cette analyse n'est pas une recommandation d'achat et n'aurait aucune valeur en tant que telle. Elle nomme des fabricants et des produits là où leurs propres documents font l'objet de l'exposé, et elle mesure chaque indication à ce que le document correspondant établit. Le même critère vaut pour les produits propres. Là où aucune preuve d'efficacité n'existe, cela y est écrit.

Sources

1. Udy, Marvin J.: Chrome Alloy Making, brevet US 2,176,687 ; dépôt 22 janvier 1938, délivrance 17 octobre 1939. Passages pertinents : description, pages imprimées 2-3 ; revendications 22-26, page imprimée 7. Copie du brevet Source

2. BG ETEM: Mögliche Chrom(VI)-Exposition, dernière modification le 3 août 2026. Source

3. Agence européenne des produits chimiques (ECHA) : Calcium chromate: ECHA CHEM et Sodium chromate: ECHA CHEM ; la classification et l'étiquetage doivent être vérifiés de manière contraignante au regard du tableau 3 de l'annexe VI du règlement CLP dans sa version en vigueur. Source

4. Walter, M.; Schenkeveld, W. D. C.; Tomatis, M. et al.: The Potential Contribution of Hexavalent Chromium to the Carcinogenicity of Chrysotile Asbestos. Chemical Research in Toxicology 2022, 35, 2335-2347. DOI: 10.1021/acs.chemrestox.2c00314. Étude présentée Source

5. Passeron, J.; Maisant, S.; Patrascu, C. et al.: Évaluation par mesures atmosphériques, surfaciques et biologiques de l'exposition professionnelle au chrome VI via une équipe référente en toxicologie en SPST. Références en Santé au Travail, TF 329, septembre 2025. Étude présentée Source

6. Johns-Manville: fiche produit historique « Johns-Manville Insulations for Heating and Plumbing Service », avec « J-M Thermobestos » comme « calcium silicate insulation » jusqu'à 1 200 °F ; illustration présentée. En complément, sur la classe de produits actuelle : Johns Manville Thermo-1200: Calcium Silicate Insulation. Source

7. Kelly, George: Insulating and Fireproof Sheeting, brevet US 668,684, dépôt 4 août 1900, délivrance 26 février 1901. Texte du brevet. Source

8. Virta, R. L.: Asbestos: Geology, Mineralogy, Mining, and Uses. U.S. Geological Survey, Open-File Report 02-149, 2002, tableau sur les mélanges de fibres d'amiante avec des matériaux inorganiques, y compris le silicate de calcium hydraté. Rapport USGS. Source

9. Verbinnen, B.; Billen, P.; Van Coninckxloo, M.; Vandecasteele, C.: Heating Temperature Dependence of Cr(III) Oxidation in the Presence of Alkali and Alkaline Earth Salts and Subsequent Cr(VI) Leaching Behavior. Environmental Science & Technology 2013, 47, 5858-5863. DOI: 10.1021/es4001455. Étude présentée Source

10. Mao, L.; Gao, B.; Deng, N. et al.: The role of temperature on Cr(VI) formation and reduction during heating of chromium-containing sludge in the presence of CaO. Chemosphere 2015, 138, 197-204. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.05.097. Étude présentée Source

11. Sayano, A.; Kanno, H.; Inagaki, S.; Takahashi, M.; Yoshida, M.: The formation of Cr(VI) compound at the interface between metal and heat-insulating material and the approach to prevent the formation by sol-gel process. Journal of the Ceramic Society of Japan 2015, 123, 677-684. DOI: 10.2109/jcersj2.123.677. Étude présentée Source

12. Caterpillar: Hexavalent Chromium has been detected in certain Caterpillar Engines, Technical Information Bulletin M0116139-01, 1 juin 2020 ; traduction française présentée. Bulletin présenté

13. Caterpillar Energy Solutions GmbH / Zeppelin: Technisches Rundschreiben 2175/00 DE: Sechswertiges Chrom (Cr6, CrVI), 23 août 2021. Circulaire présentée

14. MAN Truck & Bus SE: Service-Mitteilung 8339SM: Auftreten von hexavalenten Chrom-Cr(VI)-Verbindungen im Betrieb, 13 décembre 2023. Note de service présentée

15. Frenzelit GmbH: TechInfo 28: Chromium(VI)-Formation at High Temperature, Status August 2025, V2-ABE-MSK/08.25/de. Version anglaise présentée.

16. Rockwool Technical Insulation: Hinweise zur sicheren Verwendung: ProRox WM Drahtnetzmatten mit Edelstahl-Drahtgeflecht (SW) und/oder Edelstahl-Steppfaden (S), Version 1, 1 mai 2023. Information produit présentée

17. Sullivan, Ralph J.: Air Pollution Aspects of Chromium and its Compounds. Litton Systems pour la National Air Pollution Control Administration, US Department of Health, Education, and Welfare, septembre 1969 ; pages imprimées 24-25, sections 3.4.1 et 3.4.3. Aujourd'hui dans les archives de l'EPA. Source

18. Directive 2004/37/CE du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004, dans sa version modifiée ; article 3 paragraphes 2 et 3 (évaluation des risques et voies d'exposition). Source

19. TRGS 561: Tätigkeiten mit krebserzeugenden Metallen und ihren Verbindungen, version du 4 mai 2026 ; sections 3.3.4 et 5.9.3 ainsi que 4.1/4.2. Publication officielle ou copie de l'autorité. Source

20. Rinehart, Harry H. / Johns-Manville: Thermal insulation and method of manufacture. US2389460A ; dépôt 5 mars 1943, délivrance 20 novembre 1945 ; en particulier la revendication 5 (laine de roche et amiante dans un rapport d'environ 2:1). Source

21. Radabaugh, Noah B.: Plastic compound. US2162387A ; dépôt 18 février 1937, délivrance 13 juin 1939 ; formulation et revendication 1 (ciment haute température avec amiante, laine minérale et silicate de sodium). Source

22. [redacted]: Service Information: Work on component parts conducting exhaust gas with chrome(VI). [redacted], 7 août 2025. Information de service présentée, une page.

23. [redacted]: Chromium VI Safety Information. Aftersales Bulletin [redacted], 27 août 2025, trois pages. Version présentée ; marquage interne SECRET.

24. Rockwool B.V. / Technical Insulation: Safe Use Instruction Sheet: ProRox WM versions with stainless steel mesh and/or stitching wire. Édition 1 janvier 2025, version 1.1 ; sections 2.3 et 8 ; comparaison avec la version 2023 présentée. Consulté le 7 octobre 2026. Source

25. [redacted]: Technical Instruction: Cr6-Reduction, [redacted], Index 1, validation 31 mai 2023 ; en particulier le chapitre 2 et la liste des destinataires. Document présenté, sept pages.

26. Toshiba Corp.: Thermal apparatus structural member, and method of manufacturing the same. JP2011232021A, priorité 8 avril 2010, publication 17 novembre 2011 ; description, état de la technique et approche de prévention. Famille de brevets japonaise ; traduction automatique anglaise sur Google Patents. Traduction présentée en outre comparée avec l'original japonais, en particulier l'exemple 1 et les exemples comparatifs. Source

27. Morgan Thermal Ceramics: Superwool Technical Manual, Contamination / Pollution Study, pages imprimées 65-68. Extrait officiel de quatre pages ; nom de fichier 13_contamination_pollution_study_sept_14.pdf. Aucune publication clairement datée dans l'extrait. Consulté le 7 octobre 2026. Source

28. Morgan / U.K. Thermal Ceramics Ltd.: SDS 418, Superwool HT C.T. / HTG VF, dernière révision 1 juin 2025 ; en particulier les sections 1, 3, 10 et 16. Réglementation UE ; sept pages. Consulté le 7 octobre 2026. Source

29. Aspen Aerogels: Pyrogel XTE, information article allemande (AIS), date d'édition 2 janvier 2024 ; en particulier la section 10. Sept pages. Consulté le 7 octobre 2026. Source

30. Euro Environmental Ltd.: Managing Chromium VI Exposure in Waste Recycling Incinerators. Rapport de cas pratique britannique non daté ; consulté le 7 octobre 2026. Source

31. Hu, H. et al.: Mechanism of chromium oxidation by alkali and alkaline earth metals during municipal solid waste incineration. Proceedings of the Combustion Institute 35 (2015), 2397-2403. DOI: 10.1016/j.proci.2014.08.029. Exploité : résumé de l'éditeur. Source

32. Hu, H. et al.: Fate of chromium during thermal treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash. Proceedings of the Combustion Institute 34 (2013). DOI: 10.1016/j.proci.2012.06.181. Exploité : résumé de l'éditeur. Source

33. Gong et al.: Solidification and Biotoxicity Assessment of Thermally Treated Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Fly Ash. International Journal of Environmental Research and Public Health 14 (2017), 626. DOI: 10.3390/ijerph14060626. Texte intégral. Source

34. Commission européenne / JRC: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, 2019, JRC118637. Passage officiellement indexé exploité : lixiviation des cendres de fond, mention expresse de hexavalent chromium. Pas de comparaison complète du document. Source

35. Tatar, G. et al. / Gannon, P.: XPS Characterization of Aluminosilicate Fibers Post Interaction with Chromium Oxyhydroxide at 100-230 °C. Journal of The Electrochemical Society 165 (2018), C624-C632. DOI: 10.1149/2.0801810jes. Texte intégral présenté. Source

36. van Leeuwen, T. K. et al.: Reactive Condensation of Cr Vapor on Aluminosilicates Containing Alkaline Oxides. Journal of The Electrochemical Society 171 (2024), 091501, publié le 2 septembre 2024. DOI: 10.1149/1945-7111/ad7061. Texte intégral présenté ; méthodes, tableaux I/II et modélisation exploités séparément. Source

37. van Leeuwen, T. K.: Condensation of Chromium Vapor, Generated in High-Temperature (>800 °C) Environments, and Interactions with Aluminosilicate Surfaces. Thèse, Montana State University, mai 2024. Texte intégral présenté ; en particulier les pages imprimées iii et 2 (ECFIA, financement et origine de la recherche).

38. Toshiba Corp.: Thermal equipment structure, JP2012220174A ; priorité 14 avril 2011, publication 12 novembre 2012. Traduction automatique anglaise présentée. Comparaison des passages expérimentaux avec la version japonaise délivrée JP5774355B2, 9 septembre 2015. En particulier l'exemple 1 et l'exemple comparatif 1. Source

39. Speer, R. M. et al.: Particulate hexavalent chromium alters microRNAs in human lung cells that target key carcinogenic pathways. Toxicology and Applied Pharmacology 438 (2022), 115890. DOI: 10.1016/j.taap.2022.115890. Manuscrit d'auteur présenté ; essais avec du chromate de zinc. Source

40. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne): Waste management: Disposal and energy recovery. Indications officielles sur les cendres volantes et l'exposition aux poussières ; consulté le 7 octobre 2026. Source

41. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne): COSHH: Workplace exposure limits. Toutes les voies d'absorption et la minimisation pour les substances cancérogènes ; version officielle en ligne, consulté le 7 octobre 2026. Source

42. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne): EH40/2005 Workplace exposure limits, quatrième édition 2020 ; tableau 1 avec l'entrée « Chromium (VI) compounds (as Cr) », 0,01 mg/m³ en moyenne sur huit heures et 0,025 mg/m³ pour l'exposition générée par le procédé, ainsi que le tableau 2, Biological monitoring guidance values, avec Chromium dans l'urine. Source

43. Leaching behavior of heat-treated waste ash. Fuel 85(3) (2006), 401-409. DOI: 10.1016/j.fuel.2005.07.016. Exploité : résumé de l'éditeur et sections accessibles Samples, Leaching behavior et Conclusion ; cendres de fond de deux installations communales à grille au Japon. Pas de comparaison complète du texte intégral. Source

44. Haas, J. / Schack-Kirchner, H. / Lang, F.: Evaluierung von Ausmaß und Ursachen einer Schadstofffreisetzung aus Urnen in Bestattungswäldern. Umweltbundesamt TEXTE 142/2019. En particulier cendres modèles/extraction ainsi que la page 72 : contact avec l'oxygène, post-traitement inerte et renvoi à Brill (2002). Source

45. Ferreira, M. J. / Almeida, M. F. / Pinto, T.: Influence of temperature and holding time on hexavalent chromium formation during leather combustion. Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists 83 (1999), 135-138. Référence Porto : 10216/21130. Exploité : résumé de l'éditeur ; combustion de déchets de cuir. Source

46. Directive (UE) 2019/771 relative à certains aspects concernant les contrats de vente de biens ; version consolidée du 31 juillet 2026. Art. 7, 10, 13 et 14 : sécurité, responsabilité et remèdes dans la vente aux consommateurs. Exploité : passages EUR-Lex officiellement indexés ; transposition nationale et conditions concrètes des prétentions à rattacher séparément. Source

47. Règlement (UE) 2018/858 relatif à la réception et à la surveillance du marché des véhicules à moteur ; version consolidée du 2 août 2026. En particulier art. 13/14 : obligations des fabricants, non-conformité et risque grave. Exploité : passages EUR-Lex officiellement indexés ; aucune décision de cas spécifique au Cr(VI). Source

48. Morgan Advanced Materials / Thermal Ceramics: Superwool Plus Heat Shield, Product Data Sheet, 09/2019, trois pages. En particulier les pages 1-2 : application automobile, composition en oxydes, températures de surface chaudes et présentation de la sécurité des fibres ; page 3 : tableau de disponibilité européen. Source

49. Morgan Thermal Ceramics : Heat Shields: Transportation & Industrial Heat Shield, page système officielle, consulté le 7 octobre 2026. Shell Technology et Integrated Technology : Superwool Plus, encapsulation en acier inoxydable et applications automobiles sur pièces chaudes expressément nommées. Source

50. Paoletti, Francesca : Behavior of oxyanions forming heavy metals in municipal solid waste incineration. Thèse, Universität Stuttgart ; Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6755, 2002. Notamment le résumé p. II et V, p. 39-41, tableau 6.3 (p. 78). Source

51. Vehlow, J. ; Paoletti, F. ; Seifert, H. ; Sirini, P. : Behaviour of oxyanions forming heavy metals in waste combustion. WTERT Fall Meeting, Columbia University, New York, 7/8 octobre 2004. Source

52. [redacted] : correspondance du fabricant adressée à l'auteur au sujet de dépôts de chrome(VI) sur des isolations de gaz d'échappement, août 2019. En possession de l'auteur.

53. International Agency for Research on Cancer (IARC) : Chromium (VI) Compounds. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 100C: Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts, Lyon 2012 ; notamment les sections 4 et 6. Source

54. US OSHA : Occupational Exposure to Hexavalent Chromium; Final Rule. Federal Register Vol. 71, No. 39, 28 février 2006 ; évaluation du risque sur la base des cohortes Gibb et al. (2000, Baltimore) et Luippold et al. (2003, Painesville). Source

55. Levy, L. S. ; Martin, P. A. ; Bidstrup, P. L. : Investigation of the potential carcinogenicity of a range of chromium containing materials on rat lung. British Journal of Industrial Medicine 43(4) (1986), 243 et suivantes. Source

56. US OSHA : Hexavalent Chromium, Health Effects. Version officielle en ligne, consulté le 7 octobre 2026. Source

57. California Regional Water Quality Control Board, Lahontan Region : PG&E Hinkley Chromium Cleanup, Frequently Asked Questions, février 2008. Source

58. Safe Work Australia : Workplace exposure limits for airborne contaminants, Changes between WES and WEL ; entrée en vigueur le 1er décembre 2026, suppression des valeurs limites pour les cancérogènes génotoxiques sans seuil. Consulté le 7 octobre 2026. Source

59. European Chemicals Agency (ECHA) : proposition de restriction au titre de l'annexe XV de REACH pour les substances du chrome(VI), avril 2025 ; ici d'après le résumé du CIRS Group. Source

60. Règlement (CE) n° 1907/2006 (REACH), article 3 point 24, définition de la notion d'« utilisation ». Source

61. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) : Scientific Opinion on Dietary Reference Values for chromium. EFSA Journal 2014;12(10):3845. Source

62. Directive 2009/148/CE du Parlement européen et du Conseil du 30 novembre 2009 concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à une exposition à l'amiante pendant le travail ; article 2 (actinolite, amosite, anthophyllite, chrysotile, crocidolite, trémolite). Source

63. Règlement (CE) n° 1272/2008 (CLP), annexe VI partie 3 : index 024-017-00-8 (composés du chrome(VI), à l'exception du chromate de baryum et des composés énumérés séparément), 024-008-00-9 (chromate de calcium), 024-018-00-3 (chromate de sodium). Source

64. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST, Espagne) : Infocarquim, Cromato de calcio ; classification harmonisée Carc. 1B, H350, H302, H400, H410 ; index 024-008-00-9 ; non soumis à autorisation. Consulté le 8 octobre 2026. Source

65. INSST : Infocarquim, Cromato de sodio ; classification harmonisée Carc. 1B, Muta. 1B, Repr. 1B, H330, H301, H312, H372, H314, H334, H317, H400, H410 ; index 024-018-00-3 ; soumis à autorisation. Consulté le 8 octobre 2026. Source

66. Règlement (CE) n° 1907/2006 (REACH) : article 2 alinéa 2, article 3 point 3, article 57 lettre a, annexe XIV entrée 22 (chromate de sodium), annexe XVII entrée 6 (fibres d'amiante). Source

67. Liste des substances candidates extrêmement préoccupantes (SVHC), vérifiée au moyen de la compilation « REACH SVHC List – 253 Substances » ; chromate de sodium présent, chromate de calcium non présent. Consulté le 8 octobre 2026. Source

68. Risk & Policy Analysts (RPA) : EU REACH Chromates Restriction Factsheet, Version 4, avril 2025 ; mandat et exception des entrées relatives au chromate de plomb. Source

69. Directive 2008/98/CE relative aux déchets, annexe III (propriétés dangereuses HP 7, HP 10, HP 11) dans la version du règlement (UE) n° 1357/2014. Source

70. Décision 2014/955/UE modifiant la décision 2000/532/CE établissant une liste de déchets ; codes déchets 19 01 11* et 19 01 12. Source

71. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) : Chrom(VI)-Verbindungen ; voies d'absorption, critères d'appréciation selon la TRGS 910 allemande rapportés à la teneur en chrome élémentaire. Consulté le 8 octobre 2026. Source

72. IFA : Krebserzeugende Gefahrstoffe: Regelungen zum Mutterschutz. Consulté le 8 octobre 2026. Source

73. Gesetz zum Schutz von Müttern bei der Arbeit, in der Ausbildung und im Studium (Mutterschutzgesetz, MuSchG), paragraphes 10 et 11. Source

74. Latitude Media : Wärtsilä to supply 282 MW onsite power solution for a U.S. data center as AI growth intensifies demand for reliable power, 5 octobre 2026 ; 15 moteurs à gaz Wärtsilä 50SG, motivation par la capacité limitée du réseau. Consulté le 8 octobre 2026. Source

75. Babcock & Wilcox Power Generation Group : Plant Service Bulletin PSB-43A, Refractories, Plastics, Insulation or Textiles Containing Chromium Compounds, mention en pied de page « PSB-43A 3M H 3/94 », © The Babcock & Wilcox Company, 1994 ; première version PSB-43, avril 1990, où elle est nommée dans la section Purpose. Toujours publié par le fabricant, consulté le 12 octobre 2026. Source

76. European Food Safety Authority, EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies : Scientific Opinion on Dietary Reference Values for chromium. EFSA Journal 2014;12(10):3845. Source

77. Morgan Advanced Materials : Safety Data Sheet SDS 257, Ceraform 130, première édition 1er septembre 1990, version du 23 décembre 2020.

78. Agence européenne des produits chimiques ECHA : dossier d'enregistrement Refractories, fibers, aluminosilicate, numéro CAS 142844-00-6.

79. Classification harmonisée de l'oxyde de calcium (CAS 1305-78-8) selon le règlement (CE) n° 1272/2008 : Skin Irrit. 2 (H315), Eye Dam. 1 (H318), STOT SE 3 (H335) ; valeur limite indicative selon la directive (UE) 2017/164 : 1 mg/m³ (fraction alvéolaire), valeur à court terme 4 mg/m³.

80. I. C. Freestone : Glass production in Late Antiquity and the Early Islamic period: a geochemical perspective. University College London, UCL Discovery. Source

81. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 43: Man-Made Mineral Fibres, section 2 (Production, Use, Occurrence and Analysis). Source

82. Owens Corning : People & Products Making History, Owens Corning Milestones. Source

83. US Environmental Protection Agency : Method 3060A, Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium, SW-846, Revision 1, décembre 1996. Source

84. NEN 5617:2022, Bepaling van het gehalte aan chroom(VI)-verbindingen in verf en coatings (semikwantitatief).

85. SEEF B.V., Ulvenhout (NL) : Kennisbank, contributions sur l'analyse du Cr(VI) dans l'isolation thermique et dans la peinture sèche, consulté en octobre 2026. Source

86. Directive (UE) 2017/2398 modifiant la directive 2004/37/CE concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérigènes ou mutagènes au travail ; valeur limite contraignante pour les composés du chrome(VI). Source

87. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) : Chrom(VI)-Verbindungen, critères d'appréciation selon les TRGS 910 et TRGS 561 allemandes. Source

88. Health and Safety Executive (UK) : Chromium and you, INDG346 ; Workplace Exposure Limit selon EH40 et les COSHH Regulations 2002. Source

89. DFARS 252.223-7008, Prohibition of Hexavalent Chromium ; prescrit par DFARS 223.7306, version issue de la modification du DFARS du 25 avril 2024. Source

90. Defense Federal Acquisition Regulation Supplement: Minimizing the Use of Hexavalent Chromium (DFARS Case 2009-D004, RIN 0750-AG35), règle finale du 5 mai 2011, Federal Register volume 76 n° 87 ; renvoie au mémorandum de l'Under Secretary of Defense (Acquisition, Technology and Logistics) du 8 avril 2009. Source

91. De Laet, R. ; van de Grift, F. (SEEF B.V., Ulvenhout, Pays-Bas) : WD-40 as a purported Cr(VI) neutralizer: experimental refutation and mechanistic explanation. Publication technique, septembre 2026 ; protocoles d'essai en documentation interne.

92. Energy UK, Londres : Hexavalent Chromium Safety Bulletin Summary, septembre 2019 ; résumé des communications de sécurité adressées au secteur britannique de la production d'électricité pour le Generation Health and Safety Forum.

93. HarbisonWalker International, Moon Township, Pennsylvanie : fiches de données de sécurité PLASTECH RUBY (version 02, révision 1er avril 2021), AUREX 30 SR (version 02, révision 29 juin 2018), SFG et dix autres noms commerciaux (version 02, révision 22 mars 2021), RUBY (version 03, révision 17 avril 2020) ainsi que THERMOLITH (version 01, 18 mai 2021) ; sections 3 et 13. Consulté le 11 octobre 2026. Source

94. US Occupational Safety and Health Administration : annexe D de 29 CFR 1910.1200, Safety Data Sheets ; contenus minimaux des sections 2, 7, 10 et 13 ainsi que tableau D.1. Consulté le 11 octobre 2026. Source

95. Morgan Advanced Materials : Safety Data Sheet SDS 252, Cerachrome Blanket, Cerachrome Bulk, Z-Blok Modules (CR Grade) et autres, révision 1er juin 2015 ; sections 3 et 10. Consulté le 11 octobre 2026. Source

96. European Industrial Gases Association : Doc 207, Safe operation and maintenance of furnaces insulated with refractory ceramic fibre ; définition de la classe de substances par une teneur en oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux d'au maximum 18 pour cent en masse. Source

97. Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 519, Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten ; version du 28 février 2025 (GMBl 2025 p. 144-145), numéros 2.7, 3.2, 5.1 à 5.3 et 14.1 à 14.3. Consulté le 13 octobre 2026. Source

98. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) : Stoffinformation Asbest, classification harmonisée Carc. 1A (H350) et STOT RE 1 (H372) ; sans classification cutanée et sans classification environnementale. Consulté le 13 octobre 2026. Source

99. Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 401, Gefährdung durch Hautkontakt: Ermittlung, Beurteilung, Maßnahmen ; édition octobre 2022, modifiée en dernier lieu GMBl 2024 p. 769 du 19 septembre 2024 ; section 3.2.3 alinéa 2 et section 4.2 avec le tableau 2. Consulté le 13 octobre 2026. Source

100. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) : Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen, Chrom(VI) ; voies d'absorption par inhalation et par voie cutanée, classification Skin Sens. 1 (H317), Carc. 1B (H350i), H400 et H410. Consulté le 13 octobre 2026. Source

101. Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 910, annexe 1 : Chrom(VI)-Verbindungen, 1 µg/m³ fraction inhalable, facteur de dépassement 8, mention « voir TRGS 561 ». Consulté le 13 octobre 2026. Source

102. Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft : liste des valeurs MAK et BAT 2026, communication 62 ; entrée « Chrom(VI)-Verbindungen (einatembare Fraktion) » avec mention d'absorption cutanée H, mention de sensibilisation Sh, catégorie de cancérogénicité 1, catégorie de mutagénicité germinale 2 ainsi que les exceptions qui y sont nommées.

103. Règlement allemand sur les substances dangereuses (GefStoffV) du 26 novembre 2010, paragraphe 22, contraventions administratives ; version modifiée en dernier lieu le 17 décembre 2025. Consulté le 12 octobre 2026. Source

104. Chemikaliengesetz (ChemG), paragraphe 26, dispositions relatives aux amendes, notamment l'alinéa 1 numéro 8 lettre b et l'alinéa 3 ; nouvelle version du 28 août 2013, modifiée en dernier lieu le 29 mars 2026. Consulté le 12 octobre 2026. Source

105. Chemikaliengesetz (ChemG), paragraphe 27, dispositions pénales, alinéas 1 à 4 ; nouvelle version du 28 août 2013, modifiée en dernier lieu le 29 mars 2026. Consulté le 12 octobre 2026. Source

106. Siebtes Buch Sozialgesetzbuch (SGB VII), paragraphe 110, responsabilité envers les organismes d'assurance sociale. Consulté le 12 octobre 2026. Source

107. Strafgesetzbuch (StGB), paragraphe 326, maniement illicite de déchets, alinéas 1 et 5. Consulté le 12 octobre 2026. Source

108. Arbeidsomstandighedenwet (Pays-Bas), Hoofdstuk 7 Sancties : Artikel 32 Strafbepaling, Artikel 33 Overtredingen, Artikel 34 Hoogte bestuurlijke boete en recidive ; version en vigueur à partir du 1er juillet 2026. Consulté le 12 octobre 2026. Source

109. Arbeidsomstandighedenbesluit (Pays-Bas), Artikel 4.17 Voorkomen van blootstelling ; vervangen ; version en vigueur à partir du 1er août 2026. Consulté le 12 octobre 2026. Source

110. Wet op de economische delicten (Pays-Bas), article 1 numéro 1, article 2 alinéa 1 et article 6 alinéa 1 ; version en vigueur à partir du 1er juillet 2026. Consulté le 12 octobre 2026. Source

111. Wetboek van Strafrecht (Pays-Bas), article 23 alinéa 4, catégories d'amendes ; montants en vigueur depuis le 1er janvier 2026. Consulté le 12 octobre 2026. Source

112. Health and Safety at Work etc. Act 1974 (Royaume-Uni), Section 33 Offences et Schedule 3A, Mode of trial and maximum penalty. Consulté le 12 octobre 2026. Source

113. The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (SI 2002/2677, Royaume-Uni), Regulation 7, Prevention or control of exposure to substances hazardous to health. Consulté le 12 octobre 2026. Source

114. Occupational Safety and Health Act (États-Unis), Section 17 Penalties ; montants maximaux des amendes civiles pour les sanctions fixées après le 15 janvier 2026 selon l'indication de l'US Occupational Safety and Health Administration. Consulté le 12 octobre 2026. Source

115. Vattenfall Generation NL : Instructie voorkomen blootstelling aan Chroom(VI) ; première version 18 février 2019, mise à jour complète 29 avril 2024 ; sections 1, 5.1 et 5.4 ainsi que l'historique des versions.

116. iTanks Live, accueillant le Chroom 6 Informatie Kennis Centrum (CIKC) : manifestation « Chroom-6 verbindingen onder thermische isolatie », 6 novembre 2025 ; pitches d'Ecopoint (Chrome-6 Neutralizer PR269 avec certificat SEEF B.V., août 2025), d'Econtras (Isolatiebedrijf C.J. van Waas BV) et de Sherwin Williams.

117. Caisse professionnelle allemande du bâtiment (BG BAU, Allemagne) : Chrom(VI)-Verbindungen an Edelstahl ; consulté le 13 octobre 2026. Source

118. Règlement (CE) n° 1907/2006 (REACH), annexe XVII entrée 47 : composés du chrome(VI) ; valeur limite de 0,0002 pour cent de chrome(VI) soluble de la masse sèche du ciment. Source

119. Kronos Ecochem : Technische Information 6, Chromatreduktion im Zement mit Eisen-II-sulfaten ; dosage, durée de conservation et contrôle selon EN 196-10. Consulté le 13 octobre 2026. Source

120. Règlement allemand sur les substances dangereuses (GefStoffV) du 26 novembre 2010, paragraphe 5a, obligations particulières de concours et d'information pour les donneurs d'ordre d'activités sur des installations de construction ou techniques, paragraphe 6 alinéas 2a à 2c et alinéa 8 ainsi que paragraphe 7 alinéa 1 ; paragraphe 5a inséré par le règlement du 2 décembre 2024 (BGBl. 2024 I n° 384), version modifiée en dernier lieu le 17 décembre 2025. Consulté le 14 octobre 2026. Source

121. Arbeidsomstandighedenbesluit (Pays-Bas), article 4.1b alinéa 2, article 4.2 alinéas 1, 3, 7 et 8 ainsi que article 4.54a alinéa 1 (Asbestinventarisatie). Consulté le 14 octobre 2026. Source

122. The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (SI 2002/2677, Royaume-Uni), Regulation 6, Assessment of the risk to health created by work involving substances hazardous to health. Consulté le 14 octobre 2026. Source

123. The Control of Asbestos Regulations 2012 (SI 2012/632, Royaume-Uni), Regulation 5, Identification of the presence of asbestos. Consulté le 14 octobre 2026. Source

124. 29 CFR 1926.1126 (États-Unis), Chromium (VI), alinéa (d) Exposure determination, sous-alinéas (d)(1), (d)(2), (d)(2)(vi) et (d)(3). Consulté le 14 octobre 2026. Source

125. 29 CFR 1926.1101 (États-Unis), Asbestos ; définition de « presumed asbestos containing material » à l'alinéa (b), initial exposure assessment selon (f)(2)(i) ainsi que les obligations des propriétaires de bâtiments et d'installations selon (k)(2)(i) et la réfutation selon (k)(5).

126. Caisse professionnelle allemande du bâtiment (BG BAU, Allemagne) : consigne d'exploitation selon le paragraphe 14 du règlement allemand sur les substances dangereuses, « Ausbau chromatbelasteter Dämmstoffe », système d'information sur les substances dangereuses WINGIS ; version imprimée allemande du 14 octobre 2026 et version imprimée néerlandaise du 20 septembre 2026.

127. Eco-Point International BV, Roosendaal (Pays-Bas) : page produit Chrome-6 Neutralizer, version en langue allemande ; consulté le 14 octobre 2026. Source

128. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe : exposé des motifs « Chrom(VI)-Verbindungen (einatembare Fraktion) », MAK-Begründungen, 53e livraison 2012 ; sections 1, 2, 4.4.1 ainsi que la section relative aux possibilités de contact professionnelles et extraprofessionnelles.

129. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses, France) : avis relatif à l'évaluation de substance de l'oxyde de chrome(III) (n° CE 215-160-9, n° CAS 1308-38-9) dans le cadre du règlement REACH, saisine 2019-SA-0070, 28 juillet 2021. Source

130. Caisse professionnelle allemande des matières premières et de l'industrie chimique, GisChem : fiche de données oxyde de chrome(III), numéro CAS 1308-38-9 ; valeur limite d'exposition professionnelle, facteur de dépassement et indication relative à la classification CLP. Consulté le 14 octobre 2026. Source

131. MATinspired B.V. (Pays-Bas) : page produit TK20 Chromium-6 Neutralizer. Consulté le 14 octobre 2026. Source

132. MATinspired B.V. (Pays-Bas) : FAQ TK20 Chromium-6 Neutralizer, questions 4.1 à 4.13. Consulté le 14 octobre 2026. Source

133. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung : DGUV Regel 112-189, Benutzung von Schutzkleidung (anciennement BGR 189) ; section 6.1 et annexe 2. Source

134. Caterpillar Inc. : 35th Anniversary of the Cat 3500 Series Large Engine ; parc en service de 190 000 moteurs et 3 milliards d'heures de fonctionnement, 5 septembre 2016. Source

135. Rolls-Royce Power Systems : Rolls-Royce celebrates 25 years of excellence with its mtu Series 2000 and Series 4000 ; plus de 100 000 moteurs vendus, 2021. Source

136. [redacted] Group Holding : document d'enregistrement Form S-1/A auprès de l'autorité américaine des marchés financiers SEC, mai 2026 ; base installée active d'environ 44 GW au 31 décembre 2025. Source

137. Wärtsilä Finland Oy, 4-Stroke Engines, Technical Services : Instructions WS00Q563, Exhaust gas system - Risk of hexavalent chromium residue, édition 4 du 20 juin 2024, remplaçant l'édition 3 du 21 avril 2022, première édition du 9 novembre 2020. En particulier les sections 1 à 6. Instruction présentée

138. GE Vernova : Aeroderivative and Heavy-Duty Gas Turbines, page produit ; plus de 7 000 turbines à gaz, plus de 800 GW dans plus de 120 pays. Consulté le 14 octobre 2026. Source

139. Global Energy Monitor : Global Coal Plant Tracker, version juillet 2026 ; plus de 2 200 GW en exploitation, seuil de recensement 30 MW. Source

140. Global Energy Monitor : Global Oil and Gas Plant Tracker, version août 2026 ; 16 559 unités recensées. Source

141. Conférence des Nations unies sur le commerce et le développement (UNCTAD) : Review of Maritime Transport ; environ 109 000 navires à partir de 100 tonneaux de jauge brute. Source

142. Association des constructeurs européens d'automobiles (ACEA) : Vehicles on European roads, janvier 2026 ; chiffres du parc pour l'Union européenne et l'Europe, état 2024. Source

143. Deutsche Automobil Treuhand (DAT) : DAT-Report 2026 ; 0,35 réparation par voiture particulière et par an pour l'année 2025. Source

144. Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP) : Waste-to-Energy in Europe in 2022, carte des installations ; 498 installations en exploitation. Source

145. Waste Management World : Energy from Waste, The State of Waste-to-Energy in the US, 10 mai 2023 ; 75 installations. Source

146. Nature Communications : Efficiency hierarchy and optimization of waste incineration in China to balance disposal and energy supply ; 975 installations avec 2 151 lignes d'incinération à la fin de l'année 2023. Source

147. Ministère japonais de l'environnement : Municipal solid waste generation and disposal in FY2024, état au 31 mars 2025 ; 991 usines d'incinération, dont 415 avec production d'électricité. Source

148. RS Motor : [redacted] gas engines, typical intervals for preventive maintenance ; maintenances intermédiaires toutes les 10 000 heures de fonctionnement, révisions à 30 000 et 60 000 heures de fonctionnement. Consulté le 14 octobre 2026. Source

149. Description du procédé de sorption sèche dans l'épuration des fumées des usines d'incinération de déchets ; sorbants, points d'injection, températures de fumées de 130 à 200 °C et excès stœchiométriques. Consulté le 15 octobre 2026. Source

150. Warnecke, R. ; Müller, V. ; Langer, S. ; Wiedl, A. : Direktentschwefelung am Kohlekessel 1 des Gemeinschaftskraftwerks Schweinfurt ; 7. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresde, octobre 2015 ; injection de sorbants calciques dans le foyer à environ 900 °C ou dans les carneaux de la chaudière à environ 350 °C, taux de dosage de 140 à 375 kg/h. Source

151. Code du travail (France) : articles R. 4412-61 à R. 4412-65 (évaluation), R. 4412-66 à R. 4412-68 (prévention, substitution, système clos), R. 4412-70 à R. 4412-75 (minimisation, zones, hygiène), R. 4412-76 à R. 4412-80 (mesures), R. 4412-86 à R. 4412-93 (information et formation) ainsi que R. 4624-22 à R. 4624-28 (suivi individuel renforcé). Source

152. Code du travail (France) : article R. 4412-149, valeurs limites d'exposition professionnelle contraignantes ; pour les composés du chrome(VI) 0,001 mg/m³ en moyenne sur huit heures et 0,005 mg/m³ comme valeur à court terme, introduites par le Décret n° 2012-746 du 9 mai 2012. Source

153. Institut national de recherche et de sécurité (INRS, France) : Chrome hexavalent et ses composés, Valeurs limites d'exposition professionnelle ; VLEP 8 h 0,001 mg/m³, VLEP court terme 0,005 mg/m³, mention « risque de pénétration percutanée », classification CMR. Source

154. Institut national de recherche et de sécurité (INRS, France) : Agents chimiques CMR, Réglementation ; évaluation incluant l'absorption cutanée, documentation du contrôle de substitution dans le document unique, contrôle annuel des VLEP contraignantes par un organisme accrédité, arrêt du travail en cas de dépassement, conservation du dossier médical pendant au moins cinquante ans. Source

155. Code du travail (France) : articles L. 4412-2 et R. 4412-97, repérage de l'amiante avant travaux ; obligation du donneur d'ordre, adaptation à sa nature, à son périmètre et au niveau de risque de l'opération, six domaines selon R. 4412-97 II. Source

156. Arrêtés relatifs au repérage de l'amiante avant certaines opérations : 19 juin 2019 (navires, bateaux et engins flottants), 16 juillet 2019 (immeubles bâtis), 13 novembre 2019 (matériels roulants ferroviaires et autres matériels roulants de transport), 24 décembre 2020 (aéronefs), 22 juillet 2021 (installations, structures ou équipements), 4 juin 2024 (immeubles autres que bâtis). Source

157. Code du travail (France) : article L. 4741-1 ; amende de 10 000 euros, « appliquée autant de fois qu'il y a de travailleurs de l'entreprise concernés », en cas de récidive un an d'emprisonnement et 30 000 euros. Source

158. Code de la sécurité sociale (France) : articles L. 452-1 à L. 452-3 ainsi que la jurisprudence de la Cour de cassation sur la faute inexcusable de l'employeur (« a eu ou aurait dû avoir conscience du danger », « n'a pas pris les mesures nécessaires pour l'en préserver ») ; majoration de la rente et indemnisation complémentaire. Source

159. Direction régionale de l'économie, de l'emploi, du travail et des solidarités Nouvelle-Aquitaine (France) : Le repérage amiante avant travaux, fiche d'information pour les donneurs d'ordre ; obligations, rapport préalable, sanctions de 3 750 euros et 9 000 euros. Source

160. Confédération suisse : loi fédérale sur l'assurance-accidents (LAA, RS 832.20), article 82 alinéas 1 à 3. Source

161. Confédération suisse : ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles (OPA, RS 832.30), articles 3, 6, 8, 11a, 44 et 50 alinéa 3. Source

162. Suva : Valeurs limites d'exposition aux postes de travail, explications relatives aux valeurs MAK et BAT ; section 1.3.3.6 sur les composés du chrome(VI), obligation de minimisation, principe STOP et risque cible. Source

163. Confédération suisse : ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques, ORRChim, RS 814.81), annexe 1.17 (substances selon l'annexe XIV du règlement (CE) n° 1907/2006), chiffres 1 à 3 ; reproduction de l'exception et de la valeur de 0,001 mg/m³ d'après les explications de la Suva. Source

164. Organe de réception des notifications des produits chimiques, Confédération suisse : obligation de notification selon l'annexe 1.17 chiffre 3 ORRChim ; notification annuelle jusqu'au 31 mars pour le trioxyde de chrome, les acides qui en résultent et leurs oligomères ainsi que le dichromate de sodium. Source

165. Confédération suisse : ordonnance sur la sécurité et la protection de la santé des travailleurs dans les travaux de construction (ordonnance sur les travaux de construction, OTConst, RS 832.311.141), article 3 et article 86. Source

166. Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail : directive n° 6503, Amiante ; sections 5.1, 6.1.1, 6.1.1.1, 6.1.3.1, 6.1.3.2, 7.3.1, 7.4.1 à 7.4.5. Source

167. ASTM International : ASTM D578/D578M-18, Standard Specification for Glass Fiber Strands ; version approuvée du 1er juillet 2018, publiée en août 2018, DOI 10.1520/D0578-18. Sections 4.1 à 4.4 avec les tableaux de composition 4.2.1 et 4.2.2 ainsi que la définition du verre E-CR en 4.2.4 ; exploité d'après l'extrait de lecture de quatre pages accessible au public. Consulté le 17 octobre 2026. Source

168. Insulcon B.V., Insulcon GmbH et Keramab N.V. : Material Safety Datasheet, E-Glass Fibre Textiles, formulaire MSDS, valable à partir du 3 avril 2014, remplace la version du 27 avril 2011 ; section 3. Consulté le 17 octobre 2026. Source

169. Yu. G. Pauliukevich, L. F. Papko, E. E. Trusova et I. Yu. Kozlovskaya, Université technologique d'État de Biélorussie, Minsk : Comprehensive comparative assessment of technological, physical, chemical and environmental properties of glass for the production of E-glass fiber with boron and without boron, International Symposium on Boron, Nevşehir, du 17 au 19 avril 2019, actes pages 503 à 508, tableaux de la composition des verres. Consulté le 18 octobre 2026. Source

170. Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG, Gladbeck : Produkt- und Verwendungsinformation Steinwolle mit hohem Aluminiumoxid- und niedrigem Silikatanteil, 30 mai 2017, remarques I et II et section 3 ; ainsi que Knauf Insulation : Safety Data Sheet Rock Mineral Wool with ECOSE Technology, KI_DP_201, révision 6.0 du 1er septembre 2023, sections 3 et 16. Les deux reprennent la définition de la substance de l'annexe VI, index 650-016-00-2. Consulté le 17 octobre 2026. Source

171. Morgan Advanced Materials, U.K. Thermal Ceramics Limited : Safety Data Sheet 448, Superwool HT NexGen Castingtip, révision du 1er juin 2025, et Safety Data Sheet 204, Aluboard 607 et autres, révision du 30 avril 2024, chaque fois la section 3 avec la définition de la substance de la laine de silicate alcalino-terreux ; Product Data Sheet BL.01, Superwool Plus Blanket, 18 avril 2025, et Product Data Sheet SH.30, Superwool Plus Board, 1er janvier 2025, chaque fois la section Chemical Analysis. Consulté le 17 octobre 2026. Source

172. Alkegen, anciennement Unifrax : fiches techniques de produit Insulfrax 1300 HT Blanket, Form A-5276, état 02/2024 ; Insulfrax LT Blanket, Form A-5182 Revision 2, état 07/2024 ; Isofrax 1260C Fiber, Form A-5296, état 07/2024 ; chaque fois la section Typical Chemical Analysis. Consulté le 17 octobre 2026. Source

173. Morgan Advanced Materials, U.K. Thermal Ceramics Limited : Safety Data Sheets 203 (Cerafiber, Ceraform, Kaowool et autres), 401 (Cerapaper, papiers et feutres Kaowool) et 111 (1260 SD Felt, Cera-Pack, Kaoclad, Moist Felt), chaque fois révision du 1er juin 2025, section 3 avec la composition de la laine de silicate d'aluminium et les teneurs en liant. Consulté le 17 octobre 2026. Source

174. Agence européenne des produits chimiques, comité des États membres : Support Document for Identification of Zirconia Aluminosilicate Refractory Ceramic Fibres as a Substance of Very High Concern, adopté le 9 décembre 2011 ; condition de composition relative à l'entrée portant le numéro index 650-017-00-8 à l'annexe VI du règlement (CE) n° 1272/2008. Consulté le 17 octobre 2026. Source

175. Promat : Technical Data Sheet PROMINA, état 2017-09, section Chemical analysis. Consulté le 17 octobre 2026. Source

176. Johns Manville : Safety Data Sheet Calcium Silicate Pipe, Block and Board Insulation, noms commerciaux HP Block Insulation, Thermo-12 Gold et Thermo-1200, version 2.2, révision du 17 juin 2019, section 3. Consulté le 17 octobre 2026. Source

177. Imerys : fiche technique Harborlite AquaPerl, juillet 2019, section Chemical Analysis. Vérifié aux fins de délimitation : Johns Manville, Industrial Insulation Data Sheet IND-200, Sproule WR-1200 Perlite Pipe and Block Insulation, état du 10 avril 2025, sans analyse des oxydes. Consulté le 17 octobre 2026. Source

178. Palabora Copper (Pty) Limited : Vermiculite specifications, Typical Ranges for Major Components et Typical Ranges for Minor Components. Consulté le 17 octobre 2026. Source

179. Aspen Aerogels, Inc., Northborough, Massachusetts : Safety Data Sheet Pyrogel XTE, état du 21 décembre 2023, section 3. Consulté le 17 octobre 2026. Source

180. Aspen Aerogels, Inc., Northborough, Massachusetts : fiche produit Pyrogel XTE, révision 4.2, 2023, avec la température maximale d'emploi de 1200 °F, soit 650 °C, et la mention d'un voile de fibres ; avec la fiche produit Pyrogel XT, révision 4.0, qui mentionne un voile de fibres de verre. Consulté le 18 octobre 2026. Source

181. Kamenny Vek LLC, Dubna : Safety Data Sheet Continuous basalt fiber products, marque Basfiber, révision 2 du 25 octobre 2017, section 3. Consulté le 17 octobre 2026. Source

182. Basalt Fibertec GmbH, Langenthal : Technical Info, composition chimique des fibres de basalte, mai 2021. Consulté le 18 octobre 2026. Source

183. Kunal Singha : A Short Review on Basalt Fiber, International Journal of Textile Science, volume 1, numéro 4, 2012, pages 19 à 28, tableau Chemical Composition of Basalt rocks. Consulté le 18 octobre 2026. Source

184. WEICON GmbH & Co. KG, Münster : Safety Data Sheet Anti-Seize High-Tech Assembly Paste, numéro de produit 261000, version 1.03 du 16 décembre 2022, section 3 ; ainsi que Univar Solutions UK Ltd. : Safety Data Sheet Molykote P 37 Antiseize Paste, numéro de produit 60535, version 1.000 du 14 août 2022, sections 2.2 et 3. Consulté le 17 octobre 2026. Source

185. Organisation maritime internationale : MSC.1/Circ.1321, Guidelines for measures to prevent fires in engine-rooms and cargo pump-rooms, publié le 18 novembre 2009 ; sections 3.3, 3.4, 5.1.1, 5.1.3, 5.2 et 5.3 ainsi que partie 2, chapitre 2, sections 1.1.2 à 1.1.5. Réimpression officielle du même libellé : Maritime and Coastguard Agency, Royaume-Uni, Marine Information Note 579 (M). Consulté le 17 octobre 2026. Source

186. tmax Group, anciennement Thermamax : pages d'application Marine, Schienenfahrzeuge, Isolierungen für Baumaschinen, Power Generation et Automotive ainsi que les descriptions Metallische Isolierverkleidung, Textile Isolierungen et Abgasnachbehandlung ; à cela s'ajoute le catalogue de produits Tmax-DryTec relatif à l'isolation de soubassement autour des modules de filtre à particules et de SCR. Sans date de publication sur les pages. Consulté le 17 octobre 2026. Source

187. MAN Energy Solutions : MAN L32/44 GenSet IMO Tier III, Project Guide Marine, version 2.1 du 21 octobre 2021, sections 2.17, 5.9.2 et 5.10 ; ainsi que Everllence, anciennement MAN Energy Solutions : ME Engine description, document 199 05 61-7.4, état du 23 juin 2025. Consulté le 17 octobre 2026. Source

188. Wärtsilä Finland Oy : Wärtsilä 46F Product Guide, document DAAB605814, édition 1/2020 du 12 février 2020, sections 5.5, 11.3.1 et 11.3.2. Consulté le 17 octobre 2026. Source

189. InsulTech, LLC : Locomotive Insulation Solutions, page à l'état du 11 juillet 2024, avec les indications relatives aux types d'isolants, aux matériaux de face chaude et aux températures d'emploi ; ainsi que la page de produit T1000, 2000, Custom Removable Insulation Blankets, page à l'état du 3 juin 2024. Consulté le 17 octobre 2026. Source

190. Reference Datasheet TCG 2020 V16 relative au moteur à gaz MWM TCG 2020 V16, établie le 9 juillet 2024 par un constructeur d'installations ; températures des gaz d'échappement à 100, 75 et 50 pour cent de charge. Une version originale du constructeur du moteur n'était pas accessible. Consulté le 17 octobre 2026. Source

191. Johns Manville : Industrial Insulation Technical Bulletin IND-TB014, Diesel Generator Exhaust Insulation Selection, établi le 23 octobre 2020 ; indications relatives à la température des gaz d'échappement, à la pose en deux couches, à l'enveloppe en tôle et à la fixation en acier inoxydable 304 ainsi qu'à la combustion du liant organique de la laine minérale à partir d'environ 177 °C selon l'ASTM C447 section 5.7.2. Consulté le 17 octobre 2026. Source

192. Morgan Advanced Materials, Thermal Ceramics : HRSG Industry Brochure, identifiant de fichier du 11 novembre 2016 ; affectation des produits par composant pour la cheminée, le silencieux, le conduit de fumées, le brûleur additionnel, le fond et le carter ainsi que les indications de température et de vitesse des gaz de la chaudière de récupération. Consulté le 17 octobre 2026. Source

193. Olson, Scott ; Morales, Kevin : Combustion Turbine Exhaust Ducts, Turbomachinery Magazine, 8 juin 2017 ; indications relatives aux tôles de liner en acier 304 et 409, aux boulons en 304, à l'épaisseur d'isolation et aux variations de température au démarrage. Consulté le 17 octobre 2026. Source

194. ElringKlinger AG : Fact Sheet ElroShield M, Thermal and acoustic management for the entire vehicle, Shielding systems by ElringKlinger ; indications relatives au matériau des couches support, à la garniture isolante et à la température de service. Sans date dans le document. Consulté le 17 octobre 2026. Source

195. 3M : Technical Data Sheets 3M Interam Mat Mount 1600HTE, février 2022, et 3M Interam Mat Mount 1650HTG, juillet 2025 ; tapis de support pour catalyseur, filtre à particules diesel et isolation de cône de sortie, avec des températures d'emploi jusqu'à 1 100 °C. Consulté le 17 octobre 2026. Source

196. Aperam : Stainless Steel, The Material of Choice for Manifolds and Catalytic Converters, état 2020 ; ainsi que la fiche technique de produit KARA Ferritic Stainless Steel K41X, FT_K41X_en_web, avec 17,80 pour cent de chrome et une résistance à l'oxydation jusqu'à 950 °C. Sur la limite inférieure des aciers inoxydables : British Stainless Steel Association selon l'EN 10088-1, au moins 10,5 pour cent de chrome. Consulté le 17 octobre 2026. Source

197. Rockwool Technical Insulation : Product Data Sheet ProRox WM 950ES, édition du 17 juillet 2026, et ProRox WM 970 ainsi que la brochure How to prevent corrosion, Industrial Insulation, section 4 avec la description d'application pour les parois de chaudière, les fours, les conduits de fumées et les tuyauteries et les indications relatives aux coquilles jusqu'à 650 °C. Consulté le 17 octobre 2026. Source

198. Règlement allemand sur les substances dangereuses (GefStoffV, Allemagne) du 26 novembre 2010 (BGBl. I p. 1643, 1644), modifié en dernier lieu par l'article 1 du règlement du 17 décembre 2025 (BGBl. 2025 I n° 337) ; paragraphe 2 alinéa 1 numéros 3 et 4, paragraphe 2 alinéa 5, paragraphe 6 alinéas 1, 3, 5, 8, 11 et 12, paragraphe 7 alinéas 3, 4 et 5 ainsi que paragraphes 10 et 14. Consulté le 17 octobre 2026. Source

199. Règlement allemand sur les substances dangereuses (GefStoffV, Allemagne), paragraphe 5a Obligations particulières de concours et d'information pour les donneurs d'ordre d'activités sur des installations de construction ou techniques et paragraphe 6 alinéas 2a à 2c ; paragraphe 5a et paragraphe 6 alinéas 2a à 2c insérés par l'article 1 numéros 6 et 7 du règlement du 2 décembre 2024 (BGBl. 2024 I n° 384), en vigueur depuis le 5 décembre 2024. Consulté le 17 octobre 2026. Source

200. Règlement allemand sur les substances dangereuses (GefStoffV, Allemagne), paragraphe 10a Registre des expositions, paragraphe 11a alinéas 3, 4 et 4a (amiante) ainsi que paragraphe 19 alinéas 3 à 6 ; paragraphe 10a inséré par l'article 1 numéro 11 du règlement du 2 décembre 2024 (BGBl. 2024 I n° 384), avec abrogation simultanée de l'ancien paragraphe 14 alinéas 3 et 4 ; paragraphe 11a alinéa 4a inséré par le règlement du 17 décembre 2025 (BGBl. 2025 I n° 337), en vigueur depuis le 20 décembre 2025. Consulté le 17 octobre 2026. Source

201. Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 410, Expositionsverzeichnis bei Gefährdung gegenüber krebserzeugenden, keimzellmutagenen oder reproduktionstoxischen Gefahrstoffen der Kategorien 1A oder 1B (Allemagne) ; édition septembre 2026, GMBl 2026 p. 528-532 du 25 septembre 2026 [n° 23], version du 25 septembre 2026 ; section 3 alinéas 2, 5, 7 et 8, section 4 alinéa 1 numéros 3, 5, 7 et 10, alinéas 3, 4 et 7 ainsi que section 5 alinéa 1. Consulté le 17 octobre 2026. Source

202. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung : banque centrale de données d'exposition ZED, page du portail ; indications sur le transfert de l'obligation de remise et d'archivage et sur la conservation pendant au moins 40 ans après la fin de l'exposition. Aucune date de mise à jour n'est indiquée sur la page. Consulté le 17 octobre 2026. Source

203. Règlement allemand sur le suivi de médecine du travail (ArbMedVV, Allemagne) du 18 décembre 2008 (BGBl. I p. 2768), modifié en dernier lieu par l'article 1 du règlement du 11 mai 2026 (BGBl. 2026 I n° 136) ; paragraphe 4 alinéas 1 et 2, paragraphe 5 alinéa 1 ainsi que annexe partie 1 alinéa 1 numéro 1 (composés du chrome VI) et numéro 2 lettre i (laines haute température) et alinéa 2 numéro 1. Consulté le 17 octobre 2026. Source

204. Règlement allemand sur les maladies professionnelles (BKV, Allemagne) du 31 octobre 1997 (BGBl. I p. 2623), modifié en dernier lieu par l'article 1 du règlement du 16 juillet 2026 (BGBl. 2026 I n° 210) ; annexe 1 numéro 1103 « Erkrankungen durch Chrom oder seine Verbindungen ». Consulté le 17 octobre 2026. Source

205. Loi allemande sur la protection au travail (ArbSchG, Allemagne) du 7 août 1996 (BGBl. I p. 1246), modifiée en dernier lieu par l'article 7 de la loi du 22 décembre 2025 (BGBl. 2025 I n° 369) ; paragraphe 21 alinéas 1, 1a et 2, paragraphe 22 alinéas 2 et 3, paragraphe 25 alinéas 1 et 2 ainsi que paragraphe 26. Consulté le 17 octobre 2026. Source

206. Siebtes Buch Sozialgesetzbuch (SGB VII, Allemagne), paragraphe 17 alinéa 1 Surveillance et conseil ainsi que paragraphe 19 alinéa 1 et alinéa 2 numéros 5 et 6 Pouvoirs des agents de contrôle. Consulté le 17 octobre 2026. Source

207. Loi allemande sur les produits chimiques (ChemG, Allemagne) dans la version publiée le 28 août 2013 (BGBl. I p. 3498, 3991), modifiée en dernier lieu par l'article 1 de la loi du 29 mars 2026 (BGBl. 2026 I n° 86) ; paragraphe 26 alinéa 1 numéro 8 lettre b et alinéa 3 ainsi que paragraphe 27 alinéas 2 à 4. Consulté le 17 octobre 2026. Source

208. Règlement allemand sur la liste des déchets (AVV, Allemagne) du 10 décembre 2001 (BGBl. I p. 3379), modifié en dernier lieu par l'article 1 du règlement du 30 juin 2020 (BGBl. I p. 1533) ; paragraphe 2 alinéa 2, paragraphe 3 alinéas 1 et 2, annexe introduction numéro 2.2.1 ainsi que les codes déchets 16 09 02*, 16 11 03*, 16 11 04, 16 11 05*, 16 11 06, 17 06 03* et 17 06 04. Consulté le 17 octobre 2026. Source

209. Loi allemande sur l'économie circulaire (KrWG, Allemagne) du 24 février 2012 (BGBl. I p. 212), modifiée en dernier lieu par l'article 17 de la loi du 22 juillet 2026 (BGBl. 2026 I n° 224) ; paragraphe 9a alinéas 1 à 3 Interdiction de mélange et traitement des déchets dangereux. Le paragraphe 9a n'est pas affecté par les modifications de l'année 2026. Consulté le 17 octobre 2026. Source

210. Berufsgenossenschaft Verkehrswirtschaft Post-Logistik Telekommunikation (BG Verkehr, Allemagne) : Mögliche Chrom(VI)-Exposition ; conditions de la formation, activités concernées ainsi qu'indication d'études propres sur les salles des machines de navires et les moteurs d'automobiles. Dernière mise à jour 08/2026. Consulté le 17 octobre 2026. Source

211. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU, Allemagne) : Chrom(VI)-Verbindungen an Edelstahl ; distinction selon la présence d'isolants thermiques contenant des métaux alcalins et alcalino-terreux ainsi qu'indication de la coordination par la BG ETEM. Aucune date de mise à jour n'est indiquée sur la page. Consulté le 17 octobre 2026. Source

212. Directive 2004/37/CE concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction au travail, version consolidée 02004L0037 — DE — 08.04.2024 — 007.003 ; article 1 paragraphes 3 et 4, article 2 points a) et c), article 3 paragraphe 1, article 4 paragraphe 1, article 5 paragraphes 1 à 5, article 6, article 10, article 11, article 12 point c), article 14 paragraphes 1, 4 et 8, article 15 paragraphes 1 et 2 ainsi que annexe I et annexe III partie A. Consulté le 17 octobre 2026. Source

213. Directive 89/391/CEE concernant la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail, version consolidée 1989L0391 — DE — 11.12.2008 — 003.001 ; article 6 paragraphes 1 à 3 et 5 ainsi que article 9 paragraphes 1 et 2. Consulté le 17 octobre 2026. Source

214. Règlement (CE) n° 1907/2006 (REACH), version consolidée 02006R1907 — DE — 22.06.2026 — 069.001 ; articles 55 et 56 paragraphe 1 ainsi que annexe XIV entrées 10 à 12, 16 à 22 et 28 à 31 (substances du chrome(VI)) avec les colonnes date limite d'introduction des demandes et date d'expiration. Le chromate de calcium ne figure pas à l'annexe XIV. Consulté le 17 octobre 2026. Source

215. Agence européenne des produits chimiques (ECHA) : communiqué de presse ECHA/NR/25/11 du 29 avril 2025, ECHA proposes restrictions on chromium(VI) substances to protect health ; portée de la proposition, les six catégories d'utilisation exemptées, inclusion du chromate de baryum et début de la consultation de six mois le 18 juin 2025. L'état de la procédure en octobre 2026 n'est pas établi. Consulté le 17 octobre 2026. Source

216. Directive 2008/98/CE relative aux déchets, version consolidée 02008L0098 — DE — 16.10.2025 — 005.001 ; article 7 paragraphes 1, 2 et 4 ainsi que article 18 paragraphes 1 et 2. Consulté le 17 octobre 2026. Source

217. Décision 2000/532/CE établissant une liste de déchets, version consolidée 02000D0532 — DE — 06.12.2023 — 003.001, dans la version de la décision 2014/955/UE et de la décision déléguée (UE) 2023/2581 ; annexe numéros 1 et 2 ainsi que les codes déchets 16 09 02*, 16 11 01* à 16 11 06, 17 06 01*, 17 06 03*, 17 06 04 et 17 06 05*. Consulté le 17 octobre 2026. Source

218. Communication de la Commission, Guide technique relatif au classement des déchets, 2018/C 124/01, JO C 124 du 9 avril 2018, p. 1 ; notion d'entrées miroir ainsi que annexe 4 avec la norme EN 15192 relative à la détermination du chrome hexavalent dans les matières solides. Consulté le 17 octobre 2026. Source

219. Directive 2009/148/CE concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à une exposition à l'amiante pendant le travail, version consolidée 02009L0148 — DE — 20.12.2023 — 002.002 dans la version de la directive (UE) 2023/2668 ; article 3 paragraphes 1 et 2, article 4 paragraphes 2, 3 et 5, article 5 paragraphe 1, article 11, article 13, article 14 avec l'annexe I bis, article 15 paragraphe 1 ainsi que article 19 paragraphes 2 et 3. Consulté le 17 octobre 2026. Source

220. Commission européenne : Third study on collecting most recent information for a certain number of substances with the view to analyse the health, socio-economic and environmental impacts in connection with possible amendments of Directive 2004/37/EC, Final Report du 8 février 2018, référence VC/2017/0011, ISBN 978-92-76-07993-4, doi:10.2767/042168 ; rapport partiel Chromium(VI) in fumes from welding, plasma cutting and similar processes. Consulté le 17 octobre 2026. Source

221. Arbeidsomstandighedenwet (Pays-Bas), BWBR0010346, version en vigueur à partir du 1er juillet 2026 ; article 3 alinéas 1 et 4, article 5 alinéas 1, 3 et 4, article 8 alinéas 1 et 4, article 24 alinéa 1, article 27, article 28 et article 28a. Consulté le 17 octobre 2026. Source

222. Arbeidsomstandighedenbesluit (Pays-Bas), BWBR0008498, version en vigueur à partir du 1er août 2026 ; article 1.1 alinéa 5 lettre b, article 4.1c, article 4.2 alinéas 7, 8 et 9, article 4.10c alinéas 4 et 5, articles 4.11 à 4.13, article 4.15, article 4.16, articles 4.18 à 4.21, article 9.9b alinéa 1 lettre d, article 9.10a alinéas 1 à 3 et article 9.22. Consulté le 17 octobre 2026. Source

223. Arbeidsomstandighedenregeling (Pays-Bas), BWBR0008587, version en vigueur à partir du 27 août 2026 ; articles 4.19 et 4.20 ainsi que Bijlage XIII Onderdeel A et B2 avec l'entrée « Chroom (VI)-verbindingen (als Cr) » et l'explication correspondante, en outre l'article 4.20c (procédés cancérogènes déterminés au niveau national). Consulté le 17 octobre 2026. Source

224. Regeling van de Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid du 18 octobre 2016, 2016-0000222216, tot wijziging van de Arbeidsomstandighedenregeling in verband de wijziging van twee wettelijke grenswaarden in Bijlage XIII (Bisfenol A en Chroom (VI)-verbindingen), Staatscourant 2016, 57792, publiée le 2 novembre 2016, en vigueur depuis le 1er mars 2017 ; article I lettre B et article II ainsi que la Toelichting relative à l'article I lettre B. Consulté le 17 octobre 2026. Source

225. Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (Pays-Bas) : HERDRUK SZW-lijst met kankerverwekkende stoffen en processen, mutagene of voor de voortplanting giftige stoffen, Staatscourant 2026, 23121, Heruitgave du 9 juillet 2026 ; partie 1 A liste des procédés cancérogènes avec dix positions, partie 1 B avec les entrées relatives aux composés du chrome(VI) y compris le chromate de calcium et le chromate de sodium ainsi que partie 2 et partie 3. Consulté le 17 octobre 2026. Source

226. Beleidsregel boeteoplegging arbeidsomstandighedenwetgeving (Pays-Bas), BWBR0032326, version en vigueur à partir du 11 février 2025 ; article 1 alinéas 1, 3, 8, 10, 11 et 12 ainsi que la Tarieflijst, Onderdeel Arbobesluit, avec les lignes relatives aux articles 4.1b, 4.1c, 4.2, 4.13, 4.15 à 4.20 et les notes de bas de page 60, 61 et 77. Consulté le 17 octobre 2026. Source

227. Arbeidsomstandighedenbesluit (Pays-Bas), BWBR0008498, version en vigueur à partir du 1er août 2026, Hoofdstuk 4 Afdeling 5 Asbest ; article 4.46, article 4.47 alinéas 7 et 8, article 4.47c alinéas 1 et 2, article 4.51a alinéas 1 à 3, article 4.54a alinéas 3 à 7 et article 4.54d, en outre Arbeidsomstandighedenregeling articles 4.26 et 4.27 relatifs aux schémas de certification. Consulté le 17 octobre 2026. Source

228. Regeling Europese afvalstoffenlijst (Eural, Pays-Bas), BWBR0013546, version en vigueur à partir du 1er janvier 2024 ; articles 1, 2 et 4 alinéas 1 à 3. Désignations néerlandaises des codes déchets d'après la Handreiking EURAL, Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, version du 31 août 2019. La charge de la preuve inversée d'après l'explication officielle de l'Informatiepunt Leefomgeving. Consulté le 17 octobre 2026. Source

229. Wet milieubeheer (Pays-Bas), BWBR0003245, version en vigueur à partir du 1er août 2026 ; article 10.38 alinéas 1 et 2, article 10.39 alinéa 1, article 10.40 alinéa 2 et article 10.54 alinéa 1. L'article 10.54a est supprimé depuis le 1er janvier 2024 ; le mélange de déchets dangereux dans l'établissement est depuis lors soumis à autorisation selon l'article 3.196 du Besluit activiteiten leefomgeving. Consulté le 17 octobre 2026. Source

230. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, Pays-Bas) : Chroom-6 op de POMS-locaties van Defensie: gezondheidseffecten en verantwoordelijkheden, rapport RIVM 2018-0061, 2018, ainsi que Onderzoek naar blootstelling aan chroom-6 en arbeidsomstandigheden op Defensielocaties, periode 1970-2015, rapport RIVM 2021-0066, 2021 ; commanditaire Paritaire Commissie Chroom-6, question posée relative à chroom-6-houdende verf of verfstof. Consulté le 17 octobre 2026. Source

231. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, Pays-Bas) : Onderzoek naar chroom-6 bij NS/NedTrain in de periode 1970 t/m 2020, rapport RIVM 2022-0152, 2022 ; Publiekssamenvatting relatif aux anciennes couches de peinture et aux travaux de meulage et de soudage. Consulté le 17 octobre 2026. Source

232. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, Pays-Bas) : Chroom-6 bij het re-integratieproject tROM, rapport RIVM 2018-0164, publié en janvier 2019 ; travaux de restauration sur des trains de musée à Tilburg et le constat relatif à la Risico-Inventarisatie en -Evaluatie de 2005. Consulté le 17 octobre 2026. Source

233. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, Pays-Bas) : Inventarisatie van toepassingen van chroom-6 op de werkplek, briefrapport RIVM 2020-0080, 2020 ; section 4.2.1 relative aux revêtements réfractaires, tableau de synthèse à la section 5.2 et résumé avec l'indication « hier is echter geen informatie over verkregen ». Consulté le 17 octobre 2026. Source

234. Regeling uitkering chroom-6 Defensie (Pays-Bas), BWBR0040982, version en vigueur à partir du 8 juin 2021 ; Bijlage 2 lettre b avec l'énumération exhaustive des activités pertinentes pour l'appréciation. Consulté le 17 octobre 2026. Source

235. Arboportaal du Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (Pays-Bas) : Wat is chroom-6? ainsi que Factsheet chroom-6, version du 9 juin 2020, publiée le 14 juillet 2020, et Beheersregime chroom-6 en andere gevaarlijke stoffen, Versie 2.0 du 11 avril 2022 avec la limitation du champ d'application figurant à la note de bas de page 1. Consulté le 17 octobre 2026. Source

236. Nederlandse Arbeidsinspectie (Pays-Bas) : page thématique Chroom-6 ; sources d'exposition mentionnées, indication sur la portée du Beheersregime et la phrase « Een negatieve uitslag is echter niet genoeg om te besluiten om géén maatregelen te nemen. » Consulté le 17 octobre 2026. Source

237. Beleidsregel arbocatalogi 2019 (Pays-Bas), BWBR0042288, version en vigueur à partir du 21 juin 2023 ; Bijlage, ligne « Installatie- en isolatie » avec les prescriptions revendiquées et les substances dangereuses mentionnées, amiante et poussière de quartz. Consulté le 17 octobre 2026. Source

238. Health and Safety at Work etc. Act 1974 (c. 37, Royaume-Uni), version « Latest available (revised) » ; Section 2 alinéas 1 et 2, Section 3 alinéas 1 et 2, Section 7, Section 21 Improvement notices, Section 22 Prohibition notices, Section 40 Onus of proving limits of what is practicable ainsi que Section 84 Extent. Consulté le 17 octobre 2026. Source

239. The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (SI 2002/2677, Royaume-Uni), version « Latest available (revised) », mention de champ d'application E+W+S ; Regulation 2 alinéa 1 (notions « substance hazardous to health » et « carcinogen »), Regulation 6 alinéas 2 et 4, Regulation 7 alinéas 4, 5, 7 et 9, Regulation 9 alinéas 1 à 5, Regulation 10 alinéas 1 à 5, Regulation 11 alinéas 1, 3 et 5, Regulation 12 alinéas 1, 2 et 4 ainsi que Schedule 1, Schedule 2A, Schedule 4, Schedule 5 et Schedule 6. Consulté le 17 octobre 2026. Source

240. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne) : L5, Control of substances hazardous to health, The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (as amended), Approved Code of Practice and guidance, sixième édition 2013, ISBN 978 0 7176 6582 2 ; paragraphes 57, 69 et 87 ainsi que les explications relatives au Schedule 5 et au Schedule 6. Une recherche en texte intégral portant sur « insulat » ne donne aucun résultat dans ce document. Consulté le 17 octobre 2026. Source

241. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne) : EH40/2005 Workplace exposure limits, quatrième édition 2020, ISBN 9780717667031 ; remarque préliminaire relative aux modifications entrées en vigueur le 17 janvier 2020, tableau 1 avec l'entrée « Chromium (VI) compounds (as Cr) », 0,01 mg/m³ comme moyenne sur huit heures et 0,025 mg/m³ pour l'exposition générée par un procédé avec la note de bas de page 1, mentions Carc, sen et BMGV. Consulté le 17 octobre 2026. Source

242. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne) en tant que GB CLP Agency : The GB mandatory classification and labelling list, publiée le 17 février 2025, dernièrement mise à jour le 22 septembre 2025, fichier mcl-list.xlsx ; entrées 024-008-00-9 chromate de calcium (Carc. 1B, H350), 024-017-00-8 Chromium (VI) compounds (entrée collective, H350i) et 024-018-00-3 chromate de sodium. Consulté le 17 octobre 2026. Source

243. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne) : The GB CLP Regulation ; reprise des classifications harmonisées du droit de l'Union avec le libellé « all existing EU harmonised classification and labelling in force on 31 December 2020, are assimilated into Great Britain as GB mandatory classification and labelling (GB MCL) » ainsi que, pour la délimitation par rapport à l'Irlande du Nord, avec le libellé « substances and mixtures placed on the market in Northern Ireland are subject to the EU CLP Regulation ». Consulté le 17 octobre 2026. Source

244. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne) : UK REACH Authorisation List (Annex XIV), fichier authorisation-list-annex-xiv.xlsx, avec le chromate de sodium à l'entrée 22 ; UK REACH Candidate List, fichier candidate-list.xlsx ; Restrictions under REACH, fichier list-of-restrictions.xlsx, version 1 du 31 mars 2021 ; ainsi que la communication Authorisations of hexavalent chromium compounds (CrVI) relative à l'expiration, le 21 septembre 2024, des autorisations délivrées au titre d'EU REACH. Le chromate de calcium n'est contenu ni dans l'Annex XIV ni sur la liste des substances candidates. Consulté le 17 octobre 2026. Source

245. The Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations 2013 (SI 2013/1471, Royaume-Uni), version « Latest available (revised) » ; Regulation 8 Occupational diseases, Regulation 9 Reportable occupational diseases ainsi que Schedule 1 partie 1 numéros 2 et 3. Consulté le 17 octobre 2026. Source

246. The Hazardous Waste (England and Wales) Regulations 2005 (SI 2005/894), version « Latest available (revised) » ; Regulation 4 alinéa 1, Regulation 6, Regulation 19, Regulation 20 alinéa 2 ainsi que Regulations 35 et 36. Les List of Wastes (England) Regulations 2005 (SI 2005/895) sont abrogées depuis le 1er juillet 2015 par SI 2015/1360 Regulation 10 lettre a ; le renvoi en vigueur à la décision 2000/532/CE « as amended from time to time » figure depuis lors à la Regulation 4 alinéa 1. En outre : The Hazardous Waste (Wales) Regulations 2005 (SI 2005/1806) et les Special Waste Regulations 1996 (SI 1996/972) dans la version des Special Waste Amendment (Scotland) Regulations 2004 (SSI 2004/112). Consulté le 17 octobre 2026. Source

247. Environment Agency, Natural Resources Wales, Scottish Environment Protection Agency et Northern Ireland Environment Agency : Waste Classification, Guidance on the classification and assessment of waste, Technical Guidance WM3, première édition, version v1.2.GB d'octobre 2021, LIT 10121 ; Appendix A avec les codes déchets 16 09 02*, 16 11 et 17 06 ainsi que Appendix C7 tableau C7.1 avec la limite de concentration de 0,1 pour cent en masse pour HP 7 en cas de Carc. 1A et 1B avec H350. Consulté le 17 octobre 2026. Source

248. Environmental Protection Act 1990 (c. 43, Royaume-Uni), Section 34 Duty of care etc. as respects waste, version « Latest available (revised) ». Consulté le 17 octobre 2026. Source

249. The Health and Safety and Nuclear (Fees) Regulations 2022 (SI 2022/1378, Royaume-Uni), Regulation 23 et Regulation 24, y compris la Regulation 24 alinéa 1 relative à la limitation aux frais raisonnables effectivement engagés et la Regulation 24 alinéa 13 relative à l'exemption des travaux exécutés sous une licence amiante ; en outre Health and Safety Executive : HSE fees and charges, current rates, état au 1er avril 2026, avec un taux de 188 livres par heure pour Fee for Intervention. Il n'existe pas de taux horaire fixé par la loi. Consulté le 17 octobre 2026. Source

250. Sentencing Council (Angleterre et pays de Galles) : Health and safety offences, Organisations: Breach of duty of employer towards employees and non-employees, Breach of duty of self-employed to others, Breach of Health and Safety regulations ; en vigueur depuis le 1er février 2016, dernièrement mise à jour le 5 octobre 2026 ; étapes 1 et 2 avec la matrice du degré de culpabilité et de la catégorie de dommage, les catégories de chiffre d'affaires et le cadre global de 50 livres à 10 millions de livres. Consulté le 17 octobre 2026. Source

251. The Control of Asbestos Regulations 2012 (SI 2012/632, Royaume-Uni), version « Latest available (revised) » ; Regulation 6 alinéa 1 lettre b, Regulation 7, Regulation 8 alinéas 1 à 4, Regulation 9 alinéa 1, Regulation 10 alinéa 1 lettre a numéros i à xi, Regulation 19 alinéas 1 et 4, Regulation 20 alinéas 1, 3 et 4 ainsi que Regulation 21 alinéas 1 et 2. Consulté le 17 octobre 2026. Source

252. Health and Safety Executive (Grande-Bretagne) : HSG248, Asbestos, The Analysts' Guide, deuxième édition mai 2021 dans la version modifiée de juillet 2021, ISBN 9780616667079 ; tableau A5.1 avec la procédure de libération en quatre étapes et le critère « All air sample results must be <0.010 f/ml for this stage to pass ». Consulté le 17 octobre 2026. Source

253. Institute of Occupational Medicine (Royaume-Uni) : Protect your workers from the threat of Chromium VI, fiche d'information sans indication de date, de version ni de référence ; mention de « calcium containing insulation systems » ainsi que du constat « Cr VI dust can be commonly found on high-temperature insulated parts such as large engines ». Une date de publication ne peut être déduite du document. Consulté le 17 octobre 2026. Source

254. Energy Institute (Royaume-Uni) : Toolbox, Exposure hazard, hexavalent chromium ; description de la formation sur l'acier inoxydable en contact avec des matériaux contenant de l'oxyde de calcium, tels que des produits d'étanchéité pour filetages ou de l'isolation, et de l'augmentation à des températures élevées. Le matériel est, selon l'indication de la page, repris d'Energy Safety Canada, date indiquée sur la page 3 mai 2023. Consulté le 17 octobre 2026. Source

255. Thermal Insulation Contractors Association (Royaume-Uni) : TICA Technical Resources, vue d'ensemble des documents techniques ; examinée le 17 octobre 2026, sans document relatif au chrome(VI) ou aux chromates. Source

256. UK Asbestos Training Association : OH02 Syllabus, Chromium VI Awareness (Hexavalent Chromium) ; les occurrences mentionnées sont le soudage, le chromage, la fabrication de pigments et de peintures, la fonderie, la construction et la démolition en présence de revêtements contenant du chrome ainsi que l'enlèvement de revêtements. L'isolation, les pièces chaudes et les turbines ne sont pas mentionnées. Consulté le 17 octobre 2026. Source

257. Irlande du Nord et Écosse : The Control of Substances Hazardous to Health Regulations (Northern Ireland) 2003 (SR 2003/34), The Control of Asbestos Regulations (Northern Ireland) 2012 (SR 2012/179), The Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations (Northern Ireland) 1997 (SR 1997/455), The Health and Safety at Work (Northern Ireland) Order 1978 (SI 1978/1039 (NI 9)) et The Hazardous Waste Regulations (Northern Ireland) 2005 (SR 2005/300). Consulté le 17 octobre 2026. Source

258. Li, Y. ; Qin, C. ; Zhang, J. ; Lan, Y. ; Zhou, L. : Cu(II) Catalytic Reduction of Cr(VI) by Tartaric Acid Under the Irradiation of Simulated Solar Light. Environmental Engineering Science 2014, 31, 447-452. DOI : 10.1089/ees.2013.0407. Pour l'acide citrique seul, le travail rapporte, d'après Li, C. ; Lan, Y. ; Deng, B. : Catalysis of manganese(II) on chromium(VI) reduction by citrate, Pedosphere 2007, 17, 318, une conversion de moins de 5 pour cent de 50 µmol/l de Cr(VI) à pH 4,5 en 22 heures ainsi qu'une accélération d'un facteur d'environ 45 par le manganèse(II). Consulté le 18 octobre 2026. Source

259. Yan, B.-Z. ; Chen, Z.-F. : Influence of pH on Cr(VI) reduction by organic reducing substances from sugarcane molasses. Applied Water Science 2019, 9, article 61. DOI : 10.1007/s13201-019-0940-x. En particulier les conversions de 99,6 à 99,9 pour cent à pH 2,0 et 2,5 et de 36,3 à 15,4 pour cent à pH 3,0 à 8,0 dans l'essai stérile. Consulté le 18 octobre 2026. Source

260. VES Systems : Hexavalent Chromium Products, page produit Hex Buster, produit de décontamination de surface du chrome(VI), avec une indication d'efficacité sans laboratoire nommé et sans données publiées. Consulté le 18 octobre 2026. Source

261. Kavarmat® Sp. z o.o. Sp.k. : pages produit KavarClean® Redox Powder & Spray, Kavar.Shop. Consulté le 18 octobre 2026. Source

Historique des versions

Version	Date	Modification
1.0	octobre 2026	Première édition
1.1	octobre 2026	Section 17 étendue aux films d'huile et aux phases apolaires comme deuxième voie de sous-estimation du résultat ; section 26 (WD-40) reformulée avec les valeurs mesurées de SEEF B.V. et l'origine de cette pratique dans le bulletin Energy UK ; chronologie de la section 1 complétée par l'entrée Energy UK, septembre 2019 ; deux nouvelles sources.
1.2	octobre 2026	Section 16 étendue au constat tiré des fiches techniques : l'indication de transformation de HarbisonWalker à la rubrique 13 des fiches de données de sécurité, les compositions des produits réfractaires concernés et l'absence d'une ligne calcium dans les fiches des produits fibreux ; quatre nouvelles sources.
1.3	octobre 2026	Section 26 (neutralisation) approfondie : clarification terminologique, l'instruction de travail de Vattenfall Generation NL, les constats de la conférence du 6 novembre 2025 concernant Ecopoint et Econtras y compris le certificat SEEF, la formulation de la caisse professionnelle allemande du bâtiment et la comparaison avec la réduction des chromates dans le ciment ; section 28 complétée par la réalité d'exploitation et le choix des matériaux ; cinq nouvelles sources.
1.4	octobre 2026	Section 25 étendue par une sous-section sur les obligations avant le début des travaux (investigation, évaluation des risques et interdiction de commencer selon les droits allemand, néerlandais, britannique et américain) ; section 26 complétée par la mise en regard de la consigne d'exploitation de la caisse professionnelle allemande du bâtiment avec sa page d'information publique et par la concordance littérale avec la page produit du fournisseur ; huit nouvelles sources.
1.5	octobre 2026	Nouvelle section 27 « Chrome(III) : l'état final supposé » avec la figure argumentative des documents de fabricants, les étapes de réaction selon la justification MAK, l'absence de détermination des espèces, les classements de la liste des valeurs MAK et BAT 2026 et l'avis de l'Anses de 2021, le précédent du cuir, la conséquence du travail sans écoulement et le retour du chrome(III) libre sur la pièce chaude ; section 26 complétée par le fournisseur MATinspired et le circuit d'essai autour du kit TK11 ; sections suivantes décalées d'un numéro ; cinq nouvelles sources.
1.6	octobre 2026	Nouvelle section 31 « Sur le choix des textes cités » avec le rapport de la TRGS 561 allemande à la directive 2004/37/CE, les quatre niveaux d'appréciation et le constat sur la main de l'étude de terrain française y compris les mesures d'air, d'urine et de fibres ; nouvelle section 32 « Ordre de grandeur : une expérience de pensée » avec des chiffres de parc issus de déclarations publiques de fabricants, de statistiques de flotte et de registres d'installations ainsi qu'une extrapolation des occasions annuelles ; conclusion décalée de deux numéros ; seize nouvelles sources.
1.7	octobre 2026	Nouvelle annexe sur les matériaux isolants contenant des oxydes basiques et leurs lieux de mise en œuvre, placée avant la conclusion, avec deux tableaux : les isolants du commerce et leur teneur documentée en oxydes de calcium, de sodium et autres oxydes basiques, et les domaines d'application dans lesquels ces isolants sont posés sur des pièces chaudes en acier au chrome, des yachts, porte-conteneurs et navires de croisière aux locomotives, engins de chantier et véhicules routiers, jusqu'aux centrales de cogénération, groupes de secours, turbines, fours et installations chimiques ; conclusion décalée d'un numéro ; vingt-huit nouvelles sources.

Version	Date	Modification
1.8	octobre 2026	Trois nouvelles sections avant l'annexe : les obligations en Allemagne (notions de substance dangereuse et d'activité, investigation avant le début des travaux et obligation du donneur d'ordre selon le § 5a, substitution et ordre des mesures, la valeur de 1 µg/m³, le registre des expositions selon le § 10a et la TRGS 410, suivi médical et maladie professionnelle, contrôle et sanctions, droit des déchets et écart au régime de l'amiante), les obligations dans l'Union européenne (directive 2004/37/CE, directive-cadre 89/391/CEE, valeur limite contraignante, registre et quarante ans, classification, autorisation et la proposition de restriction de 2025, droit des déchets de l'Union et écart à la directive amiante) et les obligations aux Pays-Bas (Arbeidsomstandighedenbesluit, valeur limite de 0,001 mg/m³, fixation d'une valeur limite propre selon l'article 4.16 alinéa 2, liste et quarante ans, cadre des amendes et délit économique, Eural et le complexe néerlandais du chrome-6) ; annexe et conclusion décalées de trois numéros ; quarante nouvelles sources.
1.9	octobre 2026	Une nouvelle section avant l'annexe : les obligations au Royaume-Uni (notion de substance dangereuse des COSHH Regulations 2002 indépendante de la classification, évaluation et maintenance avec obligation d'enregistrement seulement à partir de cinq salariés, prévention, remplacement et minimisation selon la Regulation 7 avec la charge de la preuve selon la Section 40, la valeur limite de 0,01 mg/m³ selon EH40 quatrième édition 2020 et la valeur dépassée figurant dans la fiche d'information de l'autorité, mesurage, surveillance de la santé et quarante ans, formation étendue aux salariés d'autres entreprises, contrôle, infraction pénale, recouvrement des coûts et obligation de déclaration, droit des déchets selon les Hazardous Waste Regulations et WM3, GB CLP et UK REACH, écart au régime de l'amiante ainsi que la désignation du sujet par Energy UK en septembre 2019) ; annexe et conclusion décalées d'un numéro supplémentaire ; dix-neuf nouvelles sources.
1.10	octobre 2026	Rectification et approfondissement sur la réglementation britannique. La ligne Royaume-Uni de la section 18 ainsi que la phrase correspondante dans la synthèse et dans l'aperçu portent désormais 0,01 mg/m³ en moyenne sur huit heures et 0,025 mg/m³ pour l'exposition générée par le procédé selon EH40/2005, quatrième édition 2020 ; la valeur de 0,05 mg/m³ indiquée jusqu'ici provient de la fiche d'information INDG346, que l'autorité n'a pas mise à jour après l'abaissement du 17 janvier 2020, et elle est signalée comme telle. Nouveautés dans la section sur le Royaume-Uni : les trois conditions de la Regulation 7(7) reliées par « and », avec la comparaison à l'article 5 paragraphe 3 de la directive 2004/37/CE et au § 10 alinéa 1 de la Gefahrstoffverordnung allemande ; le constat qu'EH40 ne porte aucune mention cutanée pour le chrome(VI) et que la mention « sen » n'y vise que l'asthme professionnel ; et une sous-section sur les mentions de danger avec les trois entrées de la GB mandatory classification and labelling list et le constat que H317 et H314 ne figurent pas à la Regulation 7(7) lettre c. La citation de l'article 5 paragraphe 3 dans la section sur l'Union européenne est limitée au critère de réduction. Une nouvelle source.
1.11	octobre 2026	Section 16 étendue à l'avertissement de Wärtsilä, Instruction WS00Q563 du 9 novembre 2020 dans l'édition 4 du 20 juin 2024 ; section 17 complétée par la sous-section sur le prélèvement selon l'endroit, la surface et la profondeur ; section 26 étendue à la solution d'acide citrique du bulletin, au classement de l'acide citrique parmi les réducteurs et à une indication issue de l'environnement de l'auteur ; tableau des applications complété par l'avertissement du fabricant ; nouvelle section portant la déclaration des intérêts de l'auteur ; la source sur la puissance de centrales livrée remplacée par l'Instruction WS00Q563 ; quatre nouvelles sources.
1.7 FR	octobre 2026	Édition France et Suisse : nouvelle section 33 sur les obligations en France (évaluation, substitution, VLEP de 0,001 mg/m³, repérage avant travaux, sanctions et faute inexcusable) et nouvelle section 34 sur les obligations en Suisse (LAA, OPA, valeurs Suva, ORRChim, OTConst, directive CFST 6503) ; conclusion renumérotée 35 ; seize nouvelles sources.