



Institut de Santé au Travail
Centre-Val de Loire

Webinaire ISCTVL : « Expositions professionnelles à la silice »
Vendredi 26 septembre 2025

Silice cristalline et amorphe : que faut-il savoir ?

Jessie Aldana – Toxicologue

jessiealdana@expertise-toxicologie.com

06.50.29.49.59

Déclaration de liens d'intérêts



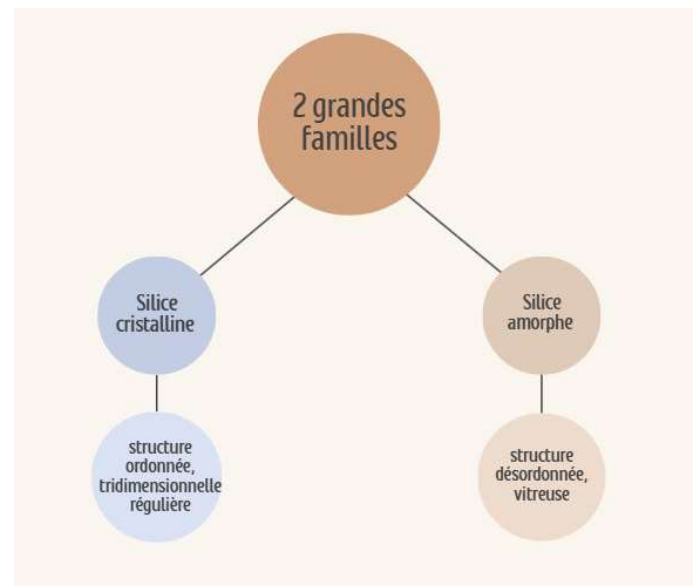
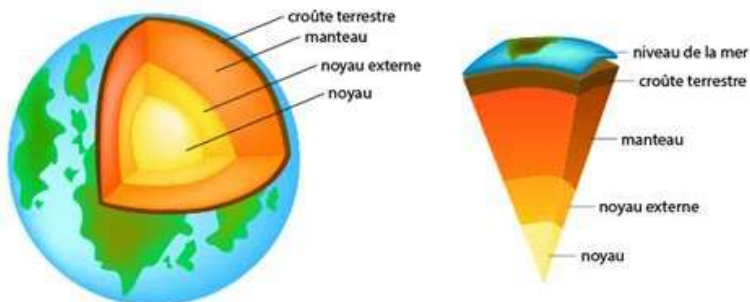
L'auteur déclare n'avoir aucun lien d'intérêt en rapport avec le contenu de cette présentation.

Introduction

- La silice : un des minéraux les plus abondants de la croûte terrestre.
- Omniprésente dans l'environnement professionnel : sols, roches, bétons, matériaux de construction, produits industriels.
- Caractère ubiquitaire → diversité des secteurs concernés : BTP, carrières, métallurgie, verrerie, céramique, agriculture, fonction publique...
- Le risque lié à la silice cristalline est aujourd'hui bien documenté :
 - silicose et cancer pulmonaire (effets majeurs) (ANSES, 2019 ; IARC, 2012)
 - Autres pathologies rapportées (Atteintes cardiovasculaires, maladies auto-immunes, maladies rénales) (ANSES, 2019 ; INRS (2022) ; IARC, 2012)
- **Enjeu : Comprendre les formes de silice, leurs caractéristiques physico-chimiques et les situations de travail pour caractériser les expositions réelles**

Formes de silice et caractéristiques

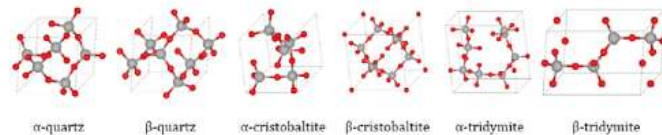
- La **silice (SiO_2)** est omniprésente dans la croûte terrestre.



Silice cristalline

- **Polymorphes cristallins principaux :**

- **Quartz** : le plus courant ($\approx 12\%$ de la croûte terrestre). Présent dans granites, quartzites, sables. C'est la forme la plus préoccupante en santé au travail.
- **Cristobalite** : se forme naturellement dans certaines roches volcaniques, mais aussi par chauffage du quartz (industrie céramique, réfractaires, calcination de diatomites).
- **Tridymite** : rare, trouvée dans des roches volcaniques ou certaines météorites. Transformation possible à haute température ($> 870\text{ °C}$).



Source : Lansade, David. (2020). Stabilisation de résines poly(diméthylsiloxane) en environnement spatial radiatif.

- **Transformations :**

- Transitions thermiques : quartz $\rightarrow$ tridymite ($\sim 870\text{ °C}$) $\rightarrow$ cristobalite ($\sim 1470\text{ °C}$).
- Certaines diatomites calcinées du commerce contiennent de la cristobalite.



Formes de silice et caractéristiques

- **Réactivité de surface :**

- Très peu réactive chimiquement, sauf lorsqu'elle est fraîchement fracturée : la cassure libère des groupes silanols et des radicaux de surface → forte réactivité biologique (inflammation, stress oxydatif).
- Vieillessement = diminution relative de l'activité.

- **Granulométrie :**

- La toxicité dépend fortement de la taille des particules : seule la fraction alvéolaire ($< 4 \mu\text{m}$ de diamètre aérodynamique) pénètre profondément dans le poumon (bronchioles, alvéoles).
- La **biopersistance** (faible solubilité, clairance lente) explique la progression des lésions même après arrêt de l'exposition

Silices amorphes naturelles

- **Les silices amorphes naturelles : terre de diatomée**

- Exploitées en carrière → poussières mises en suspension.
- Utilisées dans les procédés de filtration (bières, vins, jus, eau, piscines).
- Utilisées comme absorbant dans les litières ou produits industriels, abrasif doux (certains dentifrices, polissoirs), isolant thermique (plâtre, briques).
- Sous forme calcinée, elles contiennent de la cristobalite



Silices amorphes synthétiques (SAS)

Procédé de fabrication	Famille de silice	Taille primaire typique	Particularités
Voie humide	Silices précipitées	5 – 100 nm	Additifs alimentaires (E551), caoutchoucs/pneus, peintures, dentifrices.
	Gels de silice	3 – 20 nm	Très poreux, utilisés comme déshydratants (sachets), supports en catalyse et chromatographie.
	Sols / colloïdes de silice	7 – 50 nm	Dispersion stable dans l’eau, utilisés comme liants, dans papiers spéciaux et catalyse.
Voie thermique	Silices pyrogénées (fumed silica)	5 – 100 nm	Issues de la combustion du SiCl ₄ , particules sphériques, utilisées dans cosmétiques, peintures, plastiques, pharmaceutique.
	Silices à l’arc	20 – 300 nm	Plus grosses, issues d’un plasma électrique, applications plus limitées.
Sous-produit	Fumées de silice (microsilice)	10 – 1000 nm (souvent agglomérées)	Sphères vitreuses amorphes issues de la métallurgie du silicium/ferrosilicium, utilisées dans bétons haute performance.

Silices amorphes synthétiques (SAS)

Famille	Taille primaire	Biopersistance	Effets/mécanismes toxicologiques dominants
Silices précipitées	5 – 100 nm	Dissolution partielle → faible persistance	Stress oxydant, inflammation pulmonaire dose-dépendante, signaux de génotoxicité in vitro.
Gels de silice	3 – 20 nm	Peu persistants (solubles)	Irritations locales, effets liés à la porosité élevée ; potentiels effets génotoxiques non confirmés.
Sols/colloïdes	7 – 50 nm	Peu persistants	Risque limité en inhalation (dispersions aqueuses), mais attention en aérosols secs → inflammation, stress oxydant.
Silices pyrogénées (fumed silica)	5 – 100 nm	Faible persistance, mais surface très réactive	Cytotoxicité marquée, stress oxydant, inflammation pulmonaire aiguë, signaux génotoxiques/épigénétiques.
Silices à l'arc	20 – 300 nm	Plus grosses, agrégées, moins étudiées	Données limitées ; effets proches des pyrogénées si inhalées à forte dose (inflammation, ROS).
Fumées de silice (microsilice)	10 – 1000 nm (agglomérées)	Amorphes, solubilité variable	Inflammation et stress oxydant ; études animales : lésions pulmonaires à doses élevées ; vigilance car exposition massive possible en BTP (bétons haute perf.).

Chiffres clés en France

- SUMER 2017 :
 - 358 000 salariés exposés (1,7 % de l'ensemble des salariés)
 - Réduction depuis 1982 (6,2%) mais persistance de nombreux pics d'exposition.
- Les populations potentiellement concernées par la silice sont (Santé publique France, 2022) :
 - Agriculture : 656 785 salariés
 - Construction ≈ 1,62 million
 - Industrie ≈ 3,68 millions
 - Tertiaire ≈ 18 millions

Libellés des secteurs d'activité	Nombre total	Nombre d'exposés	Proportion d'exposés (%)	Répartition des exposés (%)
Agriculture¹				
Production animale (NAF=01.4)	217 366	747	0,3	25
Cultures permanentes (NAF=01.2)	134 017	558	0,4	18
Cultures non permanentes (NAF=01.1)	147 746	480	0,3	16
Culture et élevage associés (NAF=01.5)	65 508	438	0,7	14
Activités de soutien à l'agriculture et traitement primaire des récoltes (NAF=01.6)	32 976	385	1,2	13
Autres secteurs d'activités ²	59 173	416	0,7	14
Total	656 785	3 024	0,5	100
Construction³				
Autres travaux de construction spécialisés (NAF=43.9)	384 304	213 426	55,5	34
Travaux d'installation électrique, plomberie et autres travaux d'installation (NAF=43.2)	437 616	157 792	36,1	25
Travaux de finition (NAF=43.3)	418 882	100 480	24,0	16
Construction de bâtiments résidentiels et non résidentiels (NAF=41.2)	122 084	54 152	44,4	9
Démolition et préparation des sites (NAF=43.1)	86 118	49 486	57,5	8
Autres secteurs d'activités	175 770	53 075	30,2	8
Total	1 624 774	628 411	38,7	100
Industrie⁴				
Fabrication d'ouvrages en béton, en ciment ou en plâtre (NAF=23.6)	31 075	11 649	37,5	12
Fabrication de verre et d'articles en verre (NAF=23.1)	34 549	10 217	29,6	11
Extraction de pierres, de sables et d'argiles (NAF=06.1)	17 743	9 755	55,0	10
Sidérurgie (NAF=24.1)	32 514	5 556	17,1	6
Fabrication d'instruments et de fournitures à usage médical et dentaire (NAF=32.5)	50 295	5 533	11,0	6
Autres secteurs d'activités	3 022 718	50 757	1,7	54
Total	3 188 890	93 467	2,9	100
Tertiaire⁴				
Administration générale, économique et sociale (NAF=84.1)	1 760 113	75 593	4,29	30
Activités des agences de travail temporaire (NAF=76.2)	508 723	40 857	8,03	16
Activités hospitalières (NAF=86.1)	1 199 442	10 272	0,86	4
Enseignement secondaire (NAF=85.3)	819 447	7 248	0,88	3
Activités d'architecture et d'ingénierie (NAF=71.1)	348 317	6 040	1,73	2
Autres secteurs d'activités	15 638 860	110 083	0,7	44
Total	20 274 899	250 093	1,2	100

Tableau extrait de l'article Delabre et al.,2022

Expositions typiques par secteurs d'activités

BTP / Construction

- **Finisseur en génie civil** : sciage et rabotage de bétons/enrobés
- **Maçon-monteur** : découpe blocs, ponçage de mortiers
- **Tailleur de pierre** : taille/façonnage (grès, quartzite)
- **Carreleur** : découpe de carrelage, ragréage
- **Opérateur de démolition** : burinage, brise-béton, poussières diffuses
- **Sableur / décapeur** : sablage de façades ou surfaces métalliques
- **Construction de piscine** : Creusement / terrassement, découpe de dalles et margelles.

Note : Secteurs "construction de bâtiments / travaux spécialisés" ressortent en tête en parts d'exposés dans SUMER 2017 et en proportions de mesures au-delà des seuils COLCHIC/SCOLA.



Expositions typiques par secteurs d'activités

Industrie

- **Mouleur main (fonderie)** : préparation de moules avec sable siliceux
- **Grenailleur** : sablage/décapage de pièces métalliques
- **Céramiste / opérateur réfractaires** : préparation d'argiles, cuisson (cristobalite)
- **Opérateur verrerie** : manutention sable siliceux, mélange batch
- **Opérateur abrasifs / composites** : manipulation charges siliceuses



Expositions typiques par secteurs d'activités

Agriculture

- **Céréaliier / polyculteur** : labour, hersage
- **Manutention céréales** : ensilage, transfert, nettoyage silos (poussières mixtes)
- **Éleveur (travaux bâtiments)** : sciage/meulage de dalles béton, réparation ouvrages
- **Espaces verts agricoles** : terrassement, stabilisation chemins sableux
- **Filtration vinicole/œnologique** : usage de terres de diatomées
- **Espaces verts / création de jardins** :
 - Manipulation de terre, coupe de roche, taille de pierre.
 - Terrassements pour aménagements paysagers.
 - Construction de piscine : Creusement / terrassement, découpe de dalles et margelles.



Expositions typiques par secteurs d'activités

Fonction publique territoriale (FPT)

- **Agents voirie** : sciage enrobés, découpe bordures, pose pavés
- **Patrimoine/monuments** : sablage, hydrogommage, taille pierre
- **Espaces verts municipaux** : terrassements, entretien d'espaces verts sur sols secs, soufflage/ramassage sols secs
- **Ateliers techniques** : meulage, petits travaux béton, carrelage
- **Entretien voirie** : Balayage de voiries poussiéreuses (Risques souvent sous-évalués car peu mesurés)



Expositions typiques par secteurs d'activités

Fonction publique d'État (FPE)

- **Maintenance infrastructures Défense** : sciage/découpe pistes, ouvrages béton
- **Laboratoires (universités, recherche)** : manipulation poudres siliceuses, sablage labo
- **Patrimoine national (Culture)** : restauration monuments, sablage, taille pierre
- **Éducation/ateliers techniques** : formation BTP, manipulation bétons/céramiques



Classification réglementaire

- La silice cristalline n'est pas inscrite à l'annexe VI du règlement CLP et ne possède pas d'étiquetages officiels harmonisés au niveau de l'Union européenne (CLP - règlement (CE) n° 1272/2008) : pas de mention H ni de pictogrammes
- Les travaux exposant à la poussière de silice cristalline alvéolaire issue de procédés de travail sont classés comme des procédés cancérogènes (Arrêté du 26 octobre 2020 modifié)
- Cancérogène pour l'homme (groupe 1) par le CIRC (IARC, 2012)

VLEP

- VLEP France (8h) réglementaire contraignante (article R.4412-149 du Code du travail) :
 - Quartz = 0,1 mg/m³
 - Cristobalite / Tridymite = 0,05 mg/m³
- VLEP pour les mélanges de poussières de silice et d'autres natures (articles R. 4412-154 et R. 4412-155).
$$\frac{C \text{ poussières alvéolaires (non silicogène)}}{VLEP \text{ poussières alvéolaires (non silicogène)}} + \frac{C \text{ quartz}}{VLEP \text{ quartz}} + \frac{C \text{ tridymite}}{VLEP \text{ tridymite}} + \frac{C \text{ Cristobalite}}{VLEP \text{ Cristobalite}} < 1$$
- VLEP poussières alvéolaires non silicogène : 5 mg/m³.
- Du point de vue réglementaire, l'INRS rappelle que la France ne dispose pas de VLEP spécifique pour les SAS. L'usage de la VLEP poussières alvéolaires n'est pas adapté. L'Allemagne a fixé une valeur MAK à 0,5 mg/m³, qui sert de repère mais sans valeur contraignante en France. L'INRS insiste sur la nécessité de développer des approches métrologiques intégrant non seulement la masse, mais aussi la surface spécifique et le nombre de particules.

Références
réglementaires
relatives aux VLEP
et aux conditions
de contrôle de
l'exposition

TABEAU 2.4 : Références réglementaires relatives aux VLEP et aux conditions de contrôle de l'exposition

Type de VLEP	Agents chimiques concernés	Référence réglementaire	Conditions du contrôle de l'exposition	Personne chargée du contrôle
Réglementaires contraignantes <i>Dispositions applicables depuis le 1^{er} janvier 2010</i>	CMR 1A et 1B (selon CLP)	Article R. 4412-149	Contrôle technique réalisé au moins une fois par an	Organisme accrédité par le COFRAC
	Autres agents chimiques dangereux (ACD)		Contrôle technique réalisé au moins une fois par an si l'évaluation des risques conclut à un risque non faible	
	Gaz destinés aux opérations de fumigation >> Bromométhane >> Cyanure d'hydrogène		>> Décret n° 88-448 du 26 avril 1988	
	Cas particulier de l'amiante	Article R. 4412-100	>> Décret n°2012-630 du 4 mai 2012 >> Arrêté 14 août 2012 >> Art. R. 4412-103 à R. 4412-106 >> Art. R. 4412-126 à R. 4412-128	Organisme accrédité par le COFRAC
	Poussières réputées sans effet spécifique	Article R. 4222-10	Effectué par des organismes agréés dans le cadre des vérifications de la conformité de l'aération et de l'assainissement des lieux de travail (R. 4722-1, R. 4722-2)	
Réglementaires indicatives <i>Dispositions applicables à partir du 1^{er} janvier 2014</i>	CMR 1A et 1B (selon CLP)	Article R. 4412-150	Contrôle technique réalisé au moins une fois par an	Organisme accrédité par le COFRAC
	Autres ACD		Contrôle technique réalisé au moins une fois par an si l'évaluation des risques conclut à un risque non faible	
Valeurs Admises à caractère indicatif	CMR 1A et 1B (selon CLP)	(pas de référence réglementaire)	Mesurages réguliers de l'exposition des travailleurs (article R. 4412-76)	Personne compétente désignée par le chef d'établissement
	Autres ACD	Circulaires du Ministère du Travail	Mesurages réguliers de l'exposition des travailleurs (article R. 4412-27) si l'évaluation des risques conclut à un risque non faible	

Source : Santé Travail Pays de la Loire

Prélèvements d'atmosphère réglementaire Par organisme accrédité

- Deux références en France :
 - CIP 10-R (historique, bases SCOLA/COLCHIC).
 - Pompe + cyclone + cassette filtre (méthode internationale, plus universelle).

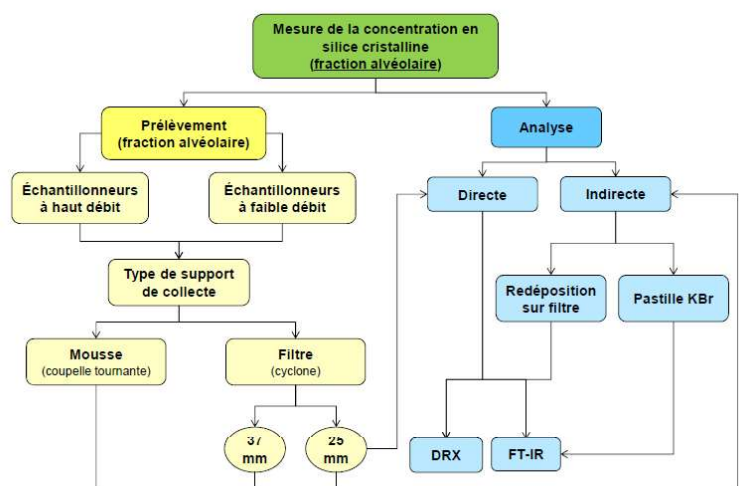


Figure 2 : Méthodes de mesure de la silice cristalline dans l'air

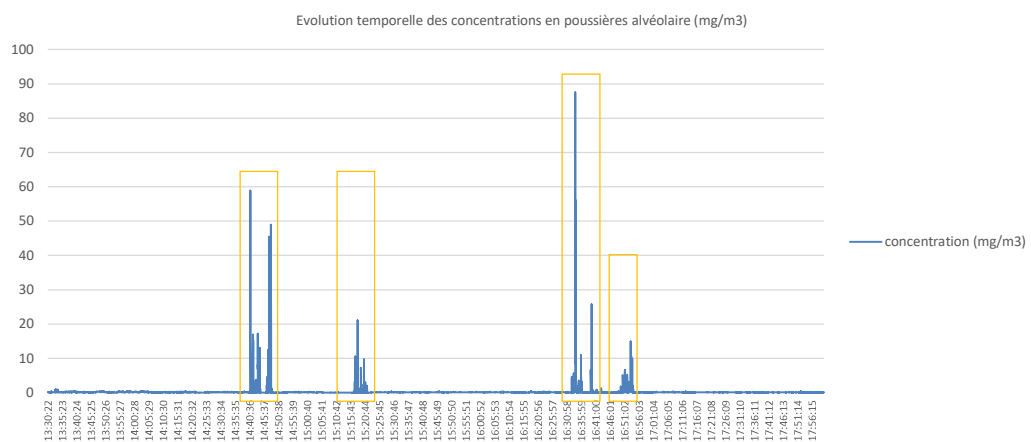
Extrait ANSES - Dangers, expositions et risques relatifs à la silice cristalline (2019) – p.10

Pics d'exposition : un enjeu souvent sous-estimé

- VLEP 8 h → elles lissent les expositions :
 - masque la **variabilité temporelle** des expositions.
 - ne reflète pas les **émissions ponctuelles**.
- Les pics courts mais intenses ne sont pas pris en compte (**ANSES, 2019**)
- Pourtant, ces émissions ponctuelles :
 - déposent une charge alvéolaire élevée en quelques minutes,
 - peuvent saturer les macrophages,
 - déclenchent inflammation aiguë, stress oxydatif, fibrose.
- Rôle possible de ces pics dans la **silicose** et les **cancers pulmonaires** (**ANSES, 2019 ; INRS, 2022**)

Pics d'exposition : un enjeu souvent sous-estimé

- Mesure de 4h30 de poussières alvéolaires sur un poste carrossier. Exemple sur un poste avec des poussières alvéolaires NON SILICOGENES (sans silices)
- La concentration moyenne est de **0,23 mg/m³**, donc en-dessous de la VLEP des poussières alvéolaires (0,9 mg/m³).



La silice et la santé au travail

- Plus de 350 000 salariés exposés en France (SUMER 2017).
- Effets sanitaires graves
- Les formes cristallines sont les plus préoccupantes, mais certaines amorphes ou nano posent aussi question.
- Dans de nombreux **métiers du quotidien**, se poser la question : *“Y a-t-il de la silice ? Sous quelle forme ?”*
- VLEP-8h = mesure à compléter → ne reflète pas les pics d'exposition.
- L'évaluation doit combiner mesures réglementaires, mesures en temps réel et analyse des situations concrètes de travail.
- Pour caractériser les expositions et intégrer la prévention dans toutes les pratiques.

Bibliographie

- ANSES. (2019). *Évaluation des risques sanitaires liés à l'inhalation de poussières de silice cristalline*. Rapport d'expertise collective. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
- Delabre L, Houot M, Burtin A, Pilorget C. L'exposition professionnelle à la silice cristalline en France en 2017 : une question toujours d'actualité. *Bull Épidémiol Hebd*. 2023;(1):16-24. http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2023/1/2023_1_2.html
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (1997). *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 86: Silica*. <https://publications.iarc.who.int/86>
- IARC (2012). International Agency for Research on Cancer. Silica dust, crystalline, in the form of quartz or cristobalite. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*. 2012 ; 100C.
- INRS. (2019). Fiche toxicologique n°232 : Silice cristalline. Institut national de recherche et de sécurité.
- INRS. (2016). TP36 : Silices amorphes de synthèse (état des connaissances). Institut national de recherche et de sécurité.
- INRS. (2018). ED153 : Silices amorphes synthétiques. Institut national de recherche et de sécurité.
- INRS. (2021). TF295 : Silices amorphes de synthèse : données toxicologiques et évaluation du risque. Institut national de recherche et de sécurité.
- Mathiennet, M., et al. (2023). *Matrice emplois-expositions silice cristalline : description et estimations d'exposition*. Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire (BEH), 1, 17-28. Santé publique France.
- Liu JY, Sayes CM. A toxicological profile of silica nanoparticles. *Toxicol Res (Camb)*. 2022 Jul 16;11(4):565-582. doi: 10.1093/toxres/tfac038. PMID: 36051665; PMCID: PMC9424711.