

**Évaluation préalable pour le Défi concernant
la bis(triméthylsilyl)amine, produits de réaction avec
l'ammoniac, l'octaméthylcyclotétrasiloxane et la silice**

**Numéro de registre du Chemical Abstracts Service
68937-51-9**

**Environnement Canada
Santé Canada**

Juin 2013

Sommaire

Conformément à l'article 74 de la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)* [LCPE (1999)], les ministres de l'Environnement et de la Santé ont procédé à une évaluation préalable de la bis(triméthylsilyl)amine, produits de réaction avec l'ammoniac, l'octaméthylcyclotétrasiloxane et la silice, dont le numéro de registre du Chemical Abstracts Service (n° CAS)* est 68937-51-9, substance qui sera appelée par son acronyme commun, OMSSA, dans la présente évaluation. Une priorité élevée a été accordée à l'évaluation préalable de cette substance inscrite au Défi, dans le cadre du Plan de gestion des produits chimiques, car elle répond aux critères environnementaux de catégorisation relatifs à la persistance, au potentiel de bioaccumulation et à la toxicité intrinsèque pour les organismes non humains et elle semble être commercialisée au Canada.

L'évaluation des risques que présentent les OMSSA pour la santé humaine n'a pas été jugée hautement prioritaire à la lumière des résultats fournis par les outils simples de détermination du risque d'exposition et du risque pour la santé élaborés par Santé Canada aux fins de la catégorisation des substances figurant sur la Liste intérieure des substances.

Les OMSSA appartiennent à la classe des substances de composition inconnue ou variable, des produits de réaction complexes ou des matières biologiques. Cette substance est composée des produits de réaction de la 1,1,1,1,3,3,3-hexaméthylidisilazane (HMDS; n° CAS 999-97-3), de l'octaméthylcyclotétrasiloxane (D4; n° CAS 556-67-2) et de la silice amorphe synthétique (SAS; n° CAS 7631-86-9). Dans la présente évaluation, cette substance est représentée par son composant principal (plus de 90 %), une SAS à surface traitée. Il est à noter que le D4 est un composant résiduel de réaction, représentant jusqu'à 5 % de la composition finale des OMSSA. Le D4, une substance distincte, a fait l'objet d'une évaluation en 2008 dans le cadre du Défi et il a été conclu que cette substance présente des risques écologiques.

Les OMSSA sont utilisées au Canada et ailleurs dans les milieux industriels comme un composant dans la production de produits d'étanchéité à base de silicone et de caoutchouc de silicone. Aucune activité de fabrication des OMSSA n'a été déclarée dans le cadre de l'enquête menée en réponse à l'avis émis au titre de l'article 71 pour les années civiles 2005 et 2006. Cependant, les quantités d'OMSSA importées au Canada dépassaient 100 000 kg en 2005, et elles atteignaient presque 100 000 kg en 2006.

D'après les propriétés physiques et chimiques et l'absence prévue de biodégradation du composant SAS des OMSSA, on prévoit que cette substance sera persistante dans l'air, l'eau, le sol et les sédiments. Selon les renseignements disponibles concernant l'absorption de la SAS traitée, le composant représentatif des OMSSA, par différentes voies d'exposition, les OMSSA ne semblent pas être bioaccumulables dans les

* Numéro de registre du Chemical Abstracts Service : Le numéro de registre du Chemical Abstracts Service (n° CAS) est la propriété de l'American Chemical Society. Toute utilisation ou redistribution, sauf si elle sert à répondre aux exigences législatives ou si elle est nécessaire pour les rapports au gouvernement lorsque des renseignements ou des rapports exigés par la loi ou une politique administrative, est interdite sans l'autorisation écrite préalable de l'American Chemical Society.

organismes. La substance répond donc aux critères de persistance, mais non à ceux de bioaccumulation énoncés dans le *Règlement sur la persistance et la bioaccumulation*.

Aucune donnée écotoxicologique n'a été répertoriée pour les OMSSA. D'après les données expérimentales, les SAS à surface traitée et non traitée présentent une faible toxicité pour les organismes aquatiques.

L'information disponible sur les risques écologiques associés aux concentrations actuelles estimées pour l'exposition aux OMSSA dans l'eau révèle que cette substance n'est pas susceptible de causer des effets nocifs sur l'environnement au Canada. À la lumière des renseignements disponibles, on conclut donc que les OMSSA ne satisfont pas aux critères énoncés aux alinéas 64(a) et (b) de la LCPE (1999) car elles ne pénètrent pas dans l'environnement en une quantité, à une concentration ou dans des conditions de nature à avoir, immédiatement ou à long terme, un effet nocif sur l'environnement ou sur la diversité biologique, ou à mettre en danger l'environnement essentiel pour la vie.

D'après les renseignements concernant les effets sur la santé d'un analogue des OMSSA, le dichlorodiméthylsilane, produits de réaction avec la silice (n° CAS 68611-44-9), les éventuels effets sur la santé liés à l'exposition aux OMSSA concernent principalement le système respiratoire. Toutefois, le risque d'exposition de la population générale aux OMSSA à partir des milieux naturels devrait être négligeable. De plus, il n'est pas prévu qu'on observera une exposition aux OMSSA présents dans les produits de consommation, car leur utilisation est limitée au milieu industriel. Puisque l'exposition de la population générale serait faible, les risques pour la santé humaine sont considérés comme faibles. Il est par conséquent conclu que les OMSSA ne satisfont pas au critère énoncé à l'alinéa 64(c) de la LCPE (1999) car elles ne pénètrent pas dans l'environnement en une quantité, à une concentration ou dans des conditions de nature à constituer un danger au Canada pour la vie ou la santé humaines.

Compte tenu des renseignements disponibles, il est conclu que les OMSSA ne répondent à aucun des critères énoncés à l'article 64 de la LCPE (1999).

La possibilité d'inclure cette substance dans la mise à jour de l'inventaire de la Liste intérieure des substances sera envisagée. De plus, des activités de recherche et de surveillance viendront, le cas échéant, appuyer la vérification des hypothèses formulées au cours de l'évaluation préalable.

Introduction

La *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)* [LCPE (1999)] (Canada, 1999) exige que les ministres de l'Environnement et de la Santé procèdent à une évaluation préalable des substances qui répondent aux critères de catégorisation énoncés dans la *Loi* afin de déterminer si elles présentent ou sont susceptibles de présenter un risque pour l'environnement ou la santé humaine.

En se fondant sur l'information obtenue dans le cadre de la catégorisation, les ministres ont jugé qu'une attention hautement prioritaire devait être accordée à un certain nombre de substances, à savoir :

- celles qui répondent à tous les critères environnementaux de catégorisation, notamment la persistance (P), le potentiel de bioaccumulation (B) et la toxicité intrinsèque pour les organismes aquatiques (Ti), et que l'on pense être commercialisées au Canada;
- celles qui répondent aux critères de catégorisation pour le plus fort risque d'exposition (PFRE) ou qui présentent un risque d'exposition intermédiaire (REI) et qui ont été jugées particulièrement dangereuses pour la santé humaine, compte tenu des classifications établies par d'autres organismes nationaux ou internationaux concernant leur cancérogénicité, leur génotoxicité ou leur toxicité pour le développement ou la reproduction.

Le 9 décembre 2006, les ministres ont donc publié un avis d'intention dans la Partie I de la *Gazette du Canada* (Canada, 2006a), dans lequel ils priaient l'industrie et les autres parties intéressées de fournir, selon un calendrier déterminé, des renseignements spécifiques qui pourraient servir à étayer l'évaluation des risques, ainsi qu'à développer de meilleures pratiques de gestion des risques et de bonne gestion des produits pour ces substances jugées hautement prioritaires et à élaborer des références.

On avait décidé d'accorder une attention hautement prioritaire à l'évaluation des risques pour l'environnement de la bis(triméthylsilyl)amine, produits de réaction avec l'ammoniac, de l'octaméthylcyclotérasiloxane et de la silice, car ces substances avaient été jugées persistantes, bioaccumulables et intrinsèquement toxiques pour les organismes aquatiques, et il semble qu'elles soient commercialisées au Canada. Le volet du Défi portant sur cette substance a été publié dans la *Gazette du Canada* le 26 décembre 2009 (Canada, 2009a). En même temps a été publié le profil de cette substance qui présentait l'information technique (obtenue avant décembre 2005) sur laquelle a reposé sa catégorisation. Des renseignements sur les propriétés et les utilisations de ces substances ont été reçus en réponse au Défi.

Même si l'évaluation des risques que présentent la bis(triméthylsilyl)amine, produits de réaction avec l'ammoniac, l'octaméthylcyclotérasiloxane et la silice pour l'environnement est jugée hautement prioritaire, ces substances ne répondent pas aux

critères de catégorisation pour le PFRE ou le REI, ni aux critères définissant un grave risque pour la santé humaine, compte tenu du classement attribué par d'autres organismes nationaux ou internationaux quant à leur cancérogénicité, à leur génotoxicité ou à leur toxicité sur le plan du développement ou de la reproduction.

Les évaluations préalables mettent l'accent sur les renseignements jugés essentiels pour déterminer si une substance répond aux critères au sens de l'article 64 de la LCPE (1999). Ces évaluations visent également à examiner les renseignements scientifiques et à tirer des conclusions fondées sur la méthode du poids de la preuve et le principe de prudence.[†]

La présente évaluation préalable finale prend en considération les renseignements sur les propriétés chimiques, les dangers, les utilisations et l'exposition, y compris ceux fournis dans le cadre du Défi. Les données pertinentes pour l'évaluation préalable de cette substance sont tirées de publications originales, de rapports de synthèse et d'évaluation, de rapports de recherche de parties intéressées et d'autres documents consultés au cours de recherches documentaires menées récemment, soit jusqu'en août 2010 (sections du document concernant la santé humaine et les aspects écologiques). Les études les plus importantes ont fait l'objet d'une évaluation critique. Par ailleurs, il est possible que les résultats de modélisation aient servi à formuler des conclusions.

Lorsqu'ils étaient disponibles et pertinents, les renseignements contenus dans les évaluations des dangers effectués par d'autres instances ont été utilisés. L'évaluation préalable finale ne constitue pas un examen exhaustif ou critique de toutes les données disponibles. Il présente plutôt les études et les sources de données essentielles à l'appui de la conclusion proposée.

La présente évaluation préalable finale a été préparée par le personnel du Programme des substances existantes de Santé Canada et d'Environnement Canada et elle intègre les résultats d'autres programmes exécutés par ces ministères. Les parties de cette évaluation portant sur l'écologie ont fait l'objet d'une étude consignée par des pairs ou d'une consultation de ces derniers. De plus, l'ébauche de la présente évaluation préalable a fait l'objet d'une période de commentaires de 60 jours par le public. Bien que les commentaires de l'extérieur aient été pris en considération, Santé Canada et Environnement Canada sont seuls responsables du contenu final et des résultats de la présente évaluation préalable. Les approches suivies lors des évaluations préalables réalisées dans le cadre du Défi ont été examinées par un groupe indépendant, soit le Groupe consultatif du Défi.

Les principales données et considérations sur lesquelles repose la présente évaluation finale sont résumées ci-après.

[†] La détermination de la conformité à l'un ou plusieurs des critères énoncés à l'article 64 repose sur une évaluation des risques pour l'environnement ou la santé humaine associés aux expositions dans l'environnement en général. Pour les humains, ceci inclut, sans toutefois s'y limiter, les expositions par l'air ambiant et intérieur, l'eau potable, les produits alimentaires et l'utilisation de produits de consommation. Une conclusion établie en vertu de la LCPE (1999) sur les substances des lots 1 à 12 du Défi, énumérées dans le Plan de gestion des produits chimiques, n'est pas pertinente, ni n'empêche une évaluation en fonction des critères de danger définis dans le *Règlement sur les produits contrôlés*, qui fait partie d'un cadre réglementaire applicable au Système d'information sur les matières dangereuses au travail pour les produits destinés à être utilisés au travail. De même, une conclusion basée sur les critères énoncés à l'article 64 de la LCPE (1999) n'empêche pas que des mesures soient prises en vertu d'autres articles de cette loi ou d'autres lois.

Identité de la substance

Nom de la substance

Aux fins du présent document, la substance est appelée « OMSSA », d'après le nom inscrit sur la Liste intérieure des substances (LIS), soit bis(triméthylsilyl)amine, produits de réaction avec l'ammoniac, l'octaméthylcyclotétrasiloxane et la silice. Se trouvent sous évaluation les produits de réaction à des températures élevées (soit environ 250 °C) de la 1,1,1,1,3,3,3-hexaméthylidisilazane (HMDS), numéro de registre du Chemical Abstracts Service (n° CAS) 999-97-3; de l'octaméthylcyclotétrasiloxane (D4), n° CAS 556-67-2, et de la silice amorphe synthétique (SAS), n° CAS 7631-86-9, dont le diamètre moyen des particules primaires est de 10 nm (fourchette de 4 à 12 nm) [Environnement Canada, 2010a].

Le réactant HMDS (n° CAS 999-97-3) pourrait se trouver comme composant résiduel dans les OMSSA. La HMDS est présente à des concentrations avoisinant les 15 % pendant le processus de fabrication des OMSSA, avant l'activation par la chaleur qui résulte en une concentration supérieure à 90 % de silice à surface traitée dans la forme finale des OMSSA (Environnement Canada, 2010a). On sait toutefois que la HMDS s'hydrolyse rapidement et qu'elle devrait produire de l'ammoniac (n° CAS 7664-41-7) et du triméthylsilanol (n° CAS 1066-40-6). La silice traitée finale présente dans les OMSSA subit généralement un nettoyage par solvant pour la débarrasser de toute trace d'ammoniac résiduel; on suppose qu'il en reste des traces infimes (moins de 1 %) dans la forme finale des OMSSA. Le réactant D4 réagira avec les silanols de surface pour former des groupes linéaires de polydiméthylsiloxylane à la surface des particules de SAS dans les OMSSA. Toutefois, le D4 étant plus résistant à l'hydrolyse, on en trouve des concentrations résiduelles de 1 à 5 % dans les OMSSA. Il convient de rappeler que, au terme de l'évaluation du D4 dans le cadre du Défi, il a été conclu que cette substance présente un risque pour l'environnement (Environnement Canada et Santé Canada, 2008).

Comme le montre le tableau 1, la SAS à surface traitée a été choisie comme composant représentatif des OMSSA aux fins de l'évaluation préalable.

Tableau 1. Identité de la substance – OMSSA

Numéro de registre du Chemical Abstracts Service (n° CAS)	68937-51-9
Nom dans la LIS	Bis(triméthylsilyl)amine, produits de réaction avec l'ammoniac, l'octaméthylcyclotétrasiloxane et la silice
Noms relevés dans les NCI¹	<i>Silanamine, 1,1,1-trimethyl-N-(trimethylsilyl)-, reaction products with ammonia, octamethylcyclotetrasiloxane and silica (TSCA, AICS, PICCS, ASIA-PAC, NZIoC)</i> <i>Silanamine, triméthyl-1,1,1-N-(triméthylsilyl)-, produits de réaction avec l'ammoniac, l'octaméthylcyclotétrasiloxane et la silice (EINECS)</i>
Autres noms	<i>Octaméthylcyclotétrasiloxane, silice, ammoniac, produits de réaction avec le hexaméthylidisilazane; dioxyde de silicium; silice traitée</i>
Groupe chimique (groupe de la LIS)	UVCB organiques ²
Principale classe chimique ou utilisation	Silicones
Principale sous-classe chimique	Silice amorphe synthétique à surface traitée
Formule chimique	O ₂ Si ⁴
Structure chimique représentative utilisée dans le modèle d'estimation³	Aucune structure définie pour la particule
SMILES représentatif utilisé dans le modèle d'estimation³	Aucun code SMILES défini pour la particule
Masse moléculaire	210 ⁸ – 10 ⁹ g/mol (particule) ⁴

¹ National Chemical Inventories (NCI), 2009 : AICS (inventaire des substances chimiques de l'Australie); ASIA-PAC (listes des substances de l'Asie-Pacifique); ECL (liste des substances chimiques existantes de la Corée); EINECS (Inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes); NZIoC (inventaire des substances chimiques de la Nouvelle-Zélande); PICCS (inventaire des produits et substances chimiques des Philippines); TSCA (inventaire des substances chimiques visées par la *Toxic Substances Control Act*).

² Comme elle fait partie de la catégorie des UVCB (substance de composition inconnue ou variable, produits de réaction complexes ou matières biologiques), cette substance n'est pas un produit chimique défini et elle peut donc être représentée par différentes structures. Aux fins de la modélisation, la structure et le SMILES correspondant présentés ici ont été choisis pour la représenter.

³ Simplified Molecular Input Line Entry System.

⁴ Composition élémentaire du dioxyde de silicium amorphe, qui se présente sous forme de particule et qui peut avoir diverses structures de surface non représentées par la composition élémentaire et la masse moléculaire indiquées (y compris les groupes silanol libre, silanol avec liaisons hydrogène, triméthylsilyle, siloxane et organosiloxane).

La silice est un composé oxygéné de silicium, de forme tétraèdre, dans lequel l'atome de silicium se trouve au centre de quatre atomes d'oxygène partagés avec les atomes de silicium adjacents. La silice peut prendre des formes diverses en raison des variations dans les relations spatiales du tétraèdre, déterminantes des caractéristiques physiques. Ainsi, la silice amorphe présente une forme tétraèdre irrégulière, tandis que la silice cristalline est polymorphe, chacune ayant une forme tridimensionnelle régulière typiquement tétraèdre (Heppleston, 1969).

Il existe deux principaux procédés de fabrication de la SAS, soit la méthode humide (gel de silice ou silice colloïdale; silice précipitée) et la méthode thermique (silice pyrogène ou sublimée). Le procédé de fabrication de la SAS pyrogène repose sur l'hydrolyse des silanes volatiles, et plus particulièrement du tétrachlorure de silicium (SiCl_4), sous l'effet de la flamme d'un brûleur oxyhydrique (Auner et Weis, 1996). Le tétrachlorure de silicium est volatilisé d'une façon continue; il se mélange à l'air sec puis à l'hydrogène, après quoi il est induit dans le réacteur pour être hydrolysé. L'hydrolyse est suivie de la croissance (nucléation, condensation, coagulation) et de l'agglomération des particules de SAS pyrogène. Les propriétés physiques et chimiques de la silice pyrogène peuvent changer en fonction des variations dans les paramètres de fabrication (charge d'alimentation, composition ou température de la flamme, etc.). La SAS est fabriquée par diverses méthodes, au nombre desquelles se trouvent la précipitation, la gélification ou la colloïdation. La précipitation et la gélification font intervenir un processus de neutralisation d'une solution aqueuse de silicate de métal alcalin (p. ex. silicate de sodium) avec de l'acide sulfurique. Seule la colloïdation produit des particules distinctes de silice stabilisée, mais ce procédé de fabrication de la SAS est peu courant à l'échelle mondiale (ECETOC, 2006).

Comme l'a décrit le Centre d'écologie et de toxicologie de l'industrie chimique européenne (ECETOC) en 2006, une part importante de la production mondiale de SAS est rendue hydrophobe afin de rehausser leur propension à se lier aux matériaux non polaires (polymères, résines, etc.) et à s'y disperser. La propriété hydrophobe est usuellement obtenue par modification de la surface au moyen de composés d'organosilicium. La SAS à surface modifiée (après traitement) s'obtient par réaction physique ou chimique. Les composés d'organosilicium les plus couramment utilisés pour ce traitement sont l'hexaméthylidisilazane (HMDS, n° CAS 999-97-3), le diméthylchlorosilane (n° CAS 75-78-5) et les polydiméthylsiloxanes (p. ex. n° CAS 9016-00-6). Le premier composé forme des parties monofonctionnelles après l'hydrolyse, alors que les deux autres forment des unités bifonctionnelles, comme il est illustré ci-après.

- Hexaméthylidisilazane $\rightarrow \equiv \text{Si}-\text{O}-\text{Si}(\text{CH}_3)_3$
- Dichlorodiméthylsilane $\rightarrow \equiv \text{Si}-\text{O}-[\text{Si}(\text{CH}_3)_2-\text{O}-]_{x=1-3}$
- Polydiméthylsiloxane $\rightarrow \equiv \text{Si}-\text{O}-[\text{Si}(\text{CH}_3)_2-\text{O}-]_{x=3-6(10)}$

Le traitement de surface n'altère pas les propriétés solides telles que le diamètre des particules. Cependant, le traitement de surface influe sur les propriétés physiques et

chimiques (p. ex. l'hydrophobie, c'est-à-dire l'absorption réduite de l'humidité suivant le type et l'ampleur du traitement de surface [ECETOC, 2006; Langer *et al.*, 1958]).

Plus particulièrement, le remplacement des groupes silanols structuraux par des groupes méthylsilyles par la voie de réactions avec des composés d'organosilicium propices réduit considérablement l'énergie d'adsorption des composants polaires (on observe une réduction des valeurs et des chaleurs d'adsorption), et la surface de la silice acquiert des propriétés hydrophobes stables. Parallèlement, la modification chimique en surface empêche l'agglomération des particules de silice dispersées et favorise une distribution plus uniforme dans les hydrocarbures et les milieux polymères (Schwarz *et al.*, 2004).

Dans le cas de la SAS traitée, choisie comme composé représentatif des OMSSA aux fins de la présente évaluation préalable, le diamètre moyen de la particule primaire est 10 nm (fourchette de 4 à 12 nm; Environnement Canada, 2010a). Lors du procédé de fabrication de la SAS pyrogène, des sphères de particules primaires en fusion peuvent entrer en collision et se fondre d'une façon irréversible pour former des agrégats ramifiés tridimensionnels, beaucoup plus gros que les particules primaires (Villota et Hawkes, 1986). De même, les particules primaires de la SAS précipitée forment des agrégats de plus grande taille après dissolution. Ces agrégats peuvent par la suite s'agglomérer par interaction chimique avec les groupes de silanols de surface, et former de plus grosses grappes[‡] (ECETOC, 2006). Enfin, le procédé de traitement de surface peut favoriser l'agglomération des agrégats, de sorte que le diamètre des particules peut atteindre jusqu'à 1 000 fois celui des particules primaires (soit 10 µm) dans le cas des particules traitées des OMSSA (Environnement Canada, 2010a). Par conséquent, la silice traitée présente dans les OMSSA est définie par des particules dont le diamètre va de 10 nm à 10 µm, avec une surface hydrophobe due au procédé de silylation, ce qui fait en sorte que les groupes d'organosilanes non polaires et les températures élevées atteintes lors du traitement font augmenter le nombre de groupes siloxanes en surface (si on compare avec les silices dont la surface est entièrement hydroxylée).

La présente évaluation préalable porte sur l'ensemble de la formulation, y compris la classe granulométrique, qui peut aller jusqu'au fractionnement à l'échelle nanométrique. L'état actuel des connaissances ne permet pas de faire une distinction entre le devenir, l'exposition et les effets des nanoparticules et ceux de particules ou d'agrégats de plus grande dimension. Le gouvernement canadien examine actuellement les méthodes d'évaluation des risques des nanomatériaux au Canada et il élabore un cadre

[‡] Il semble régner une certaine confusion entre les notions d'agrégation et d'agglomération dans les ouvrages scientifiques consultés. Certaines publications utilisent le terme *agrégat* pour désigner un groupe plus important de particules réunies de façon peu structurée (Walker, 1998). Aux fins de la présente évaluation, cependant, la convention établie par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) s'applique, et ces termes seront utilisés selon l'acception ci-dessous :

Agglomérat : Ensemble composé de particules qui adhèrent les unes aux autres par des forces relativement lâches, y compris les forces de Van der Waals, les forces électrostatiques et les tensions de surface.

Agrégat : Assemblage de particules hétérogènes dont les divers composants sont difficiles à dissocier.

Donc, si un agrégat peut être considéré comme étant immuable, l'agglomérat peut se décomposer dans certaines conditions (Aitken *et al.*, 2004).

réglementaire pour les nanomatériaux. À ce titre, les risques attribuables aux OMSSA à une échelle nanométrique pourraient faire ultérieurement l'objet d'un examen distinct.

Enfin, les niveaux de traitement peuvent varier lors de la production des OMSSA; toutefois, pour ce qui est des niveaux déclarés dans le cadre du Défi (Environnement Canada, 2010a), ils se situent entre 3,5 et 4,5 % en poids, et ils ont vraisemblablement été mesurés à l'aide du test C de Brunauer, Emmett et Taylor (BET) (Brunauer *et al.*, 1938). Des données fournies ultérieurement indiquent des fourchettes de niveaux mesurés allant de 1 à 3 % en poids (Environnement Canada, 2010a), mais les auteurs n'ont pas été en mesure de confirmer formellement leur exactitude. Par conséquent, la fourchette supérieure de 3,5 à 4,5 % en poids a été considérée comme étant la plus exacte pour ce qui est du niveau de traitement des OMSSA aux fins de la présente évaluation. Le traitement de surface produit des groupes triméthylsilyles et diméthylsiloxyles en surface. Ces caractéristiques de la SAS présente dans les OMSSA sont attribuables à la fois aux procédés de fabrication et de traitement de la silice non traitée.

Propriétés physiques et chimiques

Le tableau 2a indique les propriétés physiques et chimiques (valeurs expérimentales) des composants de la SAS traitée présents dans les OMSSA et ayant une incidence sur leur devenir dans l'environnement. Les études clés d'où proviennent des données expérimentales sur certaines de leurs propriétés ont fait l'objet d'un examen critique afin d'en assurer la validité.

Une recension des publications pertinentes pour ce qui concerne la silice à surface traitée révèle l'existence de plusieurs formes de silice traitée, différenciées par la composition chimique de surface et le degré de couverture. Des données mesurées sur les propriétés physiques et chimiques de substances analogues des OMSSA ont été utilisées aux fins de la présente évaluation, soit les substances courantes à base de silice traitée (n^{os} CAS 68611-44-9, 67762-90-7 et 68909-20-6) ainsi que de SAS non traitée (n^o CAS 7631-86-9) (voir le tableau 2b pour la comparaison des substances analogues) en vue de la caractérisation du risque pour l'environnement, tel qu'il est décrit ci-après, et la silice traitée (n^o CAS 68611-44-9) pour la caractérisation du risque pour la santé humaine.

La solubilité d'une substance influence sa mobilité et sa biodisponibilité dans l'environnement. Aussi s'agit-il de l'un des paramètres clés de la caractérisation du devenir d'une substance chimique lorsque cette dernière est rejetée dans l'environnement. L'étude de diverses substances analogues des OMSSA est primordiale pour en caractériser le risque écologique dans un milieu aquatique. Le niveau de traitement des OMSSA n'étant pas certain, les propriétés physiques et chimiques obtenues varient, y compris pour ce qui concerne la propriété hydrophobe de la substance. Cette imprécision se répercute sur la mesure de la biodisponibilité des OMSSA dans les milieux aquatiques. L'utilisation de substances analogues permet d'étoffer la caractérisation des effets dans l'environnement, étant entendu que les propriétés physiques et chimiques des substances

analogues peuvent représenter une gamme plus large de caractéristiques que celles propres aux OMSSA.

Aucune valeur modélisée n'a été recensée qui aurait permis d'estimer les propriétés physiques et chimiques du composant silice traitée des OMSSA (aucun modèle disponible ne permet d'établir la structure chimique du la composant).

Enfin, le composant représentatif des OMSSA, la SAS traitée, se présente sous forme de particules, et de ce fait, bon nombre des paramètres physiques et chimiques utilisés traditionnellement pour prédire le devenir et le comportement dans l'environnement peuvent ne pas être applicables. Au nombre des propriétés qui sont traditionnellement utilisées pour évaluer le risque chimique et qui ne s'appliquent pas de façon générale aux particules, davantage régies par leurs manifestations physiques, se trouvent le point d'ébullition, le $\log K_{oe}$, le $\log K_{co}$, la pression de vapeur et la constante de la loi de Henry. Cependant, étant donné la présence probable de composants d'organosilanes volatils, la pression de vapeur a tout de même été considérée comme une propriété potentiellement importante pour prédire le devenir et le comportement des OMSSA (voir le tableau 2a).

Tableau 2a. Propriétés physiques et chimiques du composant SAS à surface traitée (plus de 90 % des OMSSA)

N° CAS	Type	Valeur	Température (°C)	Référence
Point de fusion (°C)				
7631-86-9	Expérimental	1 700 à 1 710		ESIS, c1995-2009
68611-44-9		1 700		MSDS, 2010
67762-90-7		1 700		MSDS, 2008
68909-20-6		1 700		MSDS, 2007
Point d'ébullition (°C)				
7631-86-9	Expérimental	2 230		ESIS, c1995-2009
67762-90-7		2 230		MSDS, 2008
68909-20-6		2 300		MSDS, 2007
Densité (kg/m³)				
7631-86-9	Expérimental	2 200	20	OCDE, 2004
7631-86-9		50 à 350 ¹		ESIS, c1995-2009
68611-44-9		2 000	20	ESIS, c1995-2009
68611-44-9		30 à 50 ¹		ESIS, c1995-2009
67762-90-7		2 200	20	MSDS, 2008
67762-90-7		30 à 100 ¹		MSDS, 2008
68909-20-6		2 200	20	MSDS, 2007
68909-20-6		100 à 300 ¹		MSDS, 2007
Pression de vapeur (forme neutre) [Pa]				
7631-86-9	Expérimental	0		CDC, 2005
68611-44-9		< 0,001		USEPA, 2009
Solubilité dans l'eau (mg/L)				
7631-86-9	Expérimental	15 à 68 ²		OCDE, 2004
7631-86-9		120		ECETOC, 2006
68611-44-9		< 0,001		IUCLID Data Set, 2002
pK_a de surface (constante de dissociation acide, sans dimension)				
7631-86-9	Expérimental	7,1 ⁷		(Environnement Canada, 2010a)
Diamètre de particule primaire (nm)				
68937-51-9 (OMSSA) ⁵	Expérimental	4 à 12 (10) ⁶		(Environnement Canada, 2010a)
7631-86-9 ³		5 à 50		ECETOC, 2006
7631-86-9 ⁴		5 à 100		ECETOC, 2006

¹Densité apparente

²Mesurée pour des pH de 5,5 à 6,6

³Fabriquée selon une méthode thermique (pyrogène)

⁴Fabriquée selon une méthode humide (précipitée)

⁵Composant de silice non agglomérée seulement

⁶Diamètre moyen de particule

⁷Silanols de surface

Tableau 2b. Comparaison des composants analogues de la SAS

N° CAS	Nom	Composition chimique de surface	Caractéristiques
OMSSA			
68937-51-9	Bis(triméthylsilyl) amine, produits de réaction avec l'ammoniac, l'octaméthylcyclotétrasiloxane et la silice	Groupes silanols, groupes silanols à liaisons hydrogène, groupes diméthylsilyles, triméthylsilyles, siloxanes et autres	Diverses fourchettes de dimensions (diamètre de particule primaire, 4 à 12 nm; dimensions agrégat-agglomérat > 10 nm, jusqu'à 10 µm)
Analogues			
68611-44-9	Dichlorodiméthylsilane, produits de réaction avec la silice	Groupes silanols, groupes silanols à liaisons hydrogène, groupes diméthylsilyles, triméthylsilyles, siloxanes et autres	Diverses fourchettes de dimensions; contient tous les groupes, sauf le groupe triméthylsilyle
67762-90-7	Diméthylsiloxanes et silicones, produits de réaction avec la silice	Groupes silanols, groupes silanols à liaisons hydrogène, groupes diméthylsilyles, triméthylsilyles, siloxanes et autres	Diverses fourchettes de dimensions; contient tous les groupes, sauf le groupe triméthylsilyle
68909-20-6	Bis(triméthylsilyl) amine, produits de l'hydrolyse avec la silice	Groupes silanols, groupes silanols à liaisons hydrogène, groupes triméthylsilyles, siloxanes et autres	Diverses fourchettes de dimensions; contient tous les groupes, sauf le groupe diméthylsilyle
112945-52-5	SAS pyrogène (non traitée)	Groupes silanols, groupes silanols à liaisons hydrogène, groupes siloxanes et autres	Diverses fourchettes de dimensions (diamètre de particule primaire, 5 à 100 nm, dimensions agrégat, 100 à 1000 nm; agglomérat, 100 à 250 µm)
112926-00-8	SAS précipitée (non traitée)	Groupes silanols, groupes silanols à liaisons hydrogène, groupes siloxanes et autres	Diverses fourchettes de dimensions (diamètre de particule primaire, 5 à 100 nm, dimensions agrégat, 100 à 1000 nm; agglomérat, 100 à 250 µm)
7631-86-9	SAS non traitée	Groupes silanols, groupes silanols à liaisons hydrogène, siloxanes et	Diverses fourchettes de dimensions; peut comprendre divers

		autres	polymorphes de silice
--	--	--------	-----------------------

Sources

Le silicium (Si) est le deuxième élément chimique le plus abondant dans la composition de la croûte terrestre (28 à 59 %), après l'oxygène. On trouve le silicium sous forme d'oxyde (dioxyde de silicium [SiO₂]) dans la silice cristalline de la roche, du sable et des sols; sous forme de silice amorphe biogène dans la diatomite et les fibres de silice, ou de silice non biogène dans la silice fondue (OCDE, 2004; ECETOC, 2006). Toutefois, seule la forme dissoute de la silice est biodisponible. On estime que, à l'échelle mondiale, 2,4 % de la silice dissoute qui se trouve naturellement dans les milieux aquatiques est issue de SAS de source anthropique (ECETOC, 2006).

Les données récentes sur les quantités fabriquées et importées, ainsi que sur les utilisations au Canada, ont été tirées des enquêtes menées auprès de l'industrie pour les années 2005 et 2006 aux termes d'avis publiés dans la *Gazette du Canada* en vertu de l'article 71 de la LCPE (1999) (Canada, 2006b, 2009b). Aucune activité de fabrication des OMSSA n'a été déclarée dans le cadre de l'enquête menée en réponse à l'avis émis au titre de l'article 71 pour les années civiles 2005 et 2006. Les quantités importées dépassaient 100 000 kg en 2005, et elles atteignaient presque 100 000 kg en 2006 (Environnement Canada, 2010a). Pour 2005, les déclarants étaient moins de 4, et il y en avait un seul en 2006. Trois parties ont déclaré avoir un intérêt à l'égard de la substance sous évaluation en 2005, et deux l'ont fait en 2006.

Si on remonte à plus loin, la quantité déclarée comme ayant été fabriquée, importée ou commercialisée au Canada au cours des années civiles entre 1984 et 1986 était de 100 kg. Le nombre de déclarants pour les années civiles 1984 à 1986 était inférieur à 4. On peut donc conclure que les quantités d'OMSSA importées au Canada ont augmenté entre les années 80 et l'année 2006.

Utilisations

Des renseignements relatifs aux utilisations pour les années civiles 2005 et 2006 ont été recueillis en réponse aux avis publiés en application de l'article 71 de la LCPE (1999) [Canada, 2006b; 2009b]. D'après les déclarations, les OMSSA étaient utilisés comme charges techniques dans les adhésifs et les produits d'étanchéité. De plus, les OMSSA étaient déclarés comme composants de formulation dans la section sur les utilisations de la LIS pour les années 1984 à 1986.

Selon les renseignements recueillis par l'enquête menée au titre de l'article 71 de la LCPE (1999), les OMSSA sont utilisés au Canada pour fabriquer des produits d'étanchéité à base de silicone et de caoutchouc de silicone (Environnement Canada, 2010a).

Au Canada, les OMSSA ne sont pas inscrits dans la Base de données sur les produits pharmaceutiques, la Base de données sur les ingrédients non médicinaux (base de données interne de la Direction des produits thérapeutiques), la Base de données sur les ingrédients des produits de santé naturels ou la Base de données sur les produits de santé naturels homologués en tant qu'ingrédient médicinal ou non médicinal utilisé dans les produits pharmaceutiques destinés aux humains ou aux animaux, ni dans celle des produits de santé naturels (BDPP, 2010; BDIPSN, 2010; BDPSNH, 2010; communication personnelle de la Direction des produits thérapeutiques et de la Direction des médicaments vétérinaires adressée au Bureau de la gestion du risque de Santé Canada en 2010; source non citée).

Les OMSSA ne sont pas répertoriés comme additifs alimentaires au titre 16 du *Règlement sur les aliments et drogues* (Canada, 1978). Ils n'ont pas été reconnus comme étant utilisés ou présents dans les préparations d'additifs indirects, ni dans les emballages alimentaires (communication personnelle de la Direction des aliments de Santé Canada adressée au Bureau de la gestion du risque de Santé Canada en 2010; source non citée).

Rejets dans l'environnement

Environnement Canada a développé une méthode pour estimer les pertes d'une substance pendant les différentes étapes de son cycle de vie, y compris son devenir dans un produit ou un article fini (Environnement Canada, 2008). Cette méthode, appelée le débit massique, comprend une analyse du cycle de vie et un tableur (outil de débit massique) qui intègrent les renseignements sur la fabrication, l'importation et l'utilisation qui sont disponibles pour la substance. En commençant par une masse définie de la substance, chaque étape du cycle de vie est par la suite évaluée jusqu'à ce que toute la masse ait été comptabilisée. Les facteurs pertinents sont étudiés, les incertitudes sont déterminées et des hypothèses peuvent être faites pendant chaque étape, selon les renseignements disponibles. Les pertes estimées représentent le bilan massique complet de la substance au cours de son cycle de vie et elles comprennent les rejets dans les eaux usées et dans d'autres milieux récepteurs (sol, air), la transformation chimique, le transfert vers des activités de recyclage et le transfert vers des sites d'élimination des déchets (sites d'enfouissement, incinération). Toutefois, à moins de disposer de données précises sur le taux ou le potentiel de rejet de cette substance provenant des sites d'enfouissement et des incinérateurs, la méthode ne permet pas de quantifier les rejets dans l'environnement à partir de ces sources. En fin de compte, les pertes estimées fournissent le premier volet de l'analyse de l'exposition à une substance et aident à estimer les rejets dans l'environnement et à mettre l'accent sur la caractérisation de l'exposition plus tard dans l'évaluation.

En général, les rejets d'une substance dans l'environnement peuvent découler de différentes pertes lors de sa fabrication, de son utilisation industrielle, de son utilisation commerciale et de son utilisation par les consommateurs. Ces pertes peuvent être regroupées en sept types : 1) déversements dans les eaux usées; 2) émissions atmosphériques; 3) perte dans le sol; 4) transformation chimique; 5) élimination dans des

sites d'enfouissement; 6) perte par incinération; 7) élimination par recyclage (p. ex. le recyclage, jugé comme une perte, n'est plus pris en compte). Ces pertes sont estimées à partir de données d'enquêtes réglementaires, de données de l'industrie et de données publiées par différents organismes. Les déversements dans les eaux usées font référence aux eaux usées brutes avant tout traitement par des systèmes d'assainissement privés (sur place) ou publics (hors site). De la même manière, les pertes par transformation chimique font référence aux modifications de l'identité de la substance qui peuvent avoir lieu au cours des étapes de fabrication, d'utilisation industrielle ou commerciale, ou d'utilisation par les consommateurs, mais elles excluent celles qui ont lieu pendant les opérations de gestion des déchets telles que l'incinération et le traitement des eaux usées. La perte dans le sol inclut le transfert accidentel ou les fuites dans le sol ou sur les surfaces pavées ou non pavées pendant l'utilisation de la substance et sa durée de vie utile (p. ex. lors l'utilisation de machinerie agricole ou d'automobiles). La perte dans le sol n'inclut toutefois pas les transferts après l'utilisation de la substance ou sa vie utile (p. ex. application des biosolides sur le sol et dépôts atmosphériques).

Les pertes estimées des OMSSA au cours de leur cycle de vie (à partir d'hypothèses prudentes) sont présentées au tableau 3 (Environnement Canada, 2008). Comme le Canada ne produit pas d'OMSSA, les pertes sont estimées en fonction des déclarations sur les quantités importées pour l'année civile 2006 (un peu moins de 100 000 kg).

Tableau 3. Pertes estimées d'OMSSA pendant leur cycle de vie

Type de perte	Proportion (%)	Étapes pertinentes du cycle de vie
Eaux usées	3,9	Utilisation à des fins industrielles et commerciales
Émissions atmosphériques	1,3	Utilisation à des fins industrielles
Sol	-	-
Transformation chimique	-	-
Sites d'enfouissement	26,1	Utilisation à des fins industrielles et commerciales
Incinération	-	-
Recyclage	-	-
Exportation	68,7	-

On estime que les pertes d'OMSSA dans les réseaux d'assainissement (3,9 %) sont dues à leur utilisation à des fins industrielles et commerciales (et par les consommateurs), et que les pertes par émissions atmosphériques (1,3 %) sont attribuables uniquement à leur utilisation industrielle. Les hypothèses formulées attribuent les pertes à la manutention des contenants; à des opérations de reformulation ou à l'utilisation de produits qui contiennent ces substances (produits d'étanchéité). Une bonne partie (68,7 %) des OMSSA importés au Canada étant exportée à l'extérieur du pays, on estime qu'une plus petite quantité (26,1 %) aboutit dans les sites d'enfouissement après une utilisation industrielle ou par les consommateurs.

Compte tenu des pertes estimées selon le tableau ci-dessus, on peut penser que les OMSSA présentent un potentiel de rejets dans l'environnement. En général, les eaux

usées constituent une source courante de rejets d'une substance dans l'eau et le sol par les installations de traitement des eaux usées et la gestion des déchets subséquente des boues. Les émissions atmosphériques peuvent également donner lieu à des dépôts atmosphériques dans le sol et l'eau. Enfin, si le lixiviat n'est pas recueilli et traité, certains sites d'enfouissement auraient le potentiel de lessiver des substances dans l'eau souterraine ou certains résidus de réaction présents dans les substances pourraient être rejetés dans l'atmosphère. Cependant, comme la substance est entièrement séquestrée dans les matières qui en contiennent (caoutchoucs et produits d'étanchéité), on peut penser que les rejets dans l'atmosphère sont négligeables, voire nuls aux étapes de l'utilisation et de l'élimination en fin de vie.

Devenir dans l'environnement

D'après leurs propriétés physiques et chimiques (tableau 2a), les OMSSA devraient demeurer principalement dans le sol et les sédiments, selon le milieu de rejet.

Lorsqu'il est rejeté dans l'air, on s'attend à ce que le composant SAS des OMSSA se dépose dans les eaux de surface et dans les sols (compte tenu des estimations indiquant une tendance à s'agréger et à s'agglomérer en une masse pouvant atteindre plusieurs fois le diamètre de la particule primaire, une densité élevée et une pression de vapeur négligeable). On sait toutefois que des matières particulaires fines peuvent être transportées sur de longues distances et que, parmi celles qui sont répertoriées au Canada, certaines proviennent vraisemblablement de régions industrielles d'autres pays (Environnement Canada et Santé Canada, 2008). Les valeurs de faible à négligeable attribuées à la pression de vapeur de substances analogues ($\leq 0,001$ Pa) du composant SAS à surface traitée des OMSSA corroborent le fait qu'il s'agit d'une molécule complexe et de grande taille (Kirk-Othmer, 2010a). Les particules de SAS à surface traitée ne devraient pas se volatiliser à des températures réalistes sur le plan environnemental.

La nature particulière du composant SAS à surface traitée des OMSSA devrait influencer fortement son devenir dans l'environnement. Le diamètre de ses particules (0,01 à 10 μm) et leur densité (2 000 à 2 200 kg/m^3 ou 2 à 2,2 fois celle de l'eau), conjugués à sa stabilité chimique et à une faible solubilité dans l'eau ($< 0,001$ mg/L), permettent de croire qu'il pourrait se répartir par gravité dans les sédiments s'il est rejeté dans l'eau de surface, et qu'il aura tendance à se déposer dans le sol s'il est rejeté dans des milieux terrestres. Toutefois, une petite partie de la SAS traitée devrait se dissoudre et former un acide silicique, qui devrait rester après dissolution.

La pK_a des silanols de surface de la SAS non traitée se situe à 7,1 environ. Par conséquent, si le pH est de 6, moins de 10 % des groupes de silanols de surface seraient dissociés et, si le pH est à 9, la presque totalité de ces groupes seraient dissociés; les particules de silice non traitée auraient alors une forte charge négative. Ces particules à charge négative pourraient se lier aux cations et rester en suspension dans un milieu aqueux, ou elles pourraient s'associer et se lier avec des sols ou des sédiments chargés

positivement dans l'environnement. Le composant SAS traitée des OMSSA pourrait en outre contenir des groupes diméthylsilanols, susceptible de s'ioniser si le pH est plus élevé (p. ex. la pK_a du triméthylsilanol est 11) que celui des silanols de surface (Tripp et Haim, 1995). Quoiqu'il en soit, pour un pH normalement observé dans l'environnement, les particules de silice traitée auraient une charge négative, ce qui faciliterait leur suspension dans une solution aqueuse et leur association avec des minéraux du sol, des matières organiques ou des sédiments cationiques.

On sait que les particules de SAS se dissolvent dans les milieux aqueux et qu'elles y forment de l'acide orthosilicique [$Si(OH)_4$, n° CAS 10193-36-9], comme le montre l'équation (1) ci-dessous, ainsi que des formes oligomériques d'acide silicique (Kirk-Othmer, c2010a) :



Aux pH normalement observés dans l'environnement (6 à 9), la solubilité de la SAS ne dépend pas du pH (Kirk-Othmer, c2010a). Les valeurs primaires de la pK_a de l'acide orthosilicique étant supérieures à 9 ($pK_{a1} = 9,9$, $pK_{a2} = 11,8$, $pK_{a3} = 12$, $pK_{a4} = 12$; Lide, 2007-2008), la plus grande partie sera neutre aux pH normalement observés dans l'environnement (si le pH est de 9, moins de 15 % est ionisé). Lorsque le pH est supérieur à 9, la solubilité de la SAS augmente considérablement en raison de l'ionisation de l'acide silicique. Ainsi, dans des conditions de pH courantes, la solubilité de la SAS sera faible; d'autres paramètres, dont le diamètre des particules et la température ainsi que la pression de l'air ambiant, peuvent déterminer le niveau de solubilité. Les particules dont le diamètre est inférieur à 5 nm ont une solubilité progressivement croissante par rapport aux particules dont le diamètre augmente continuellement. De plus, la solubilité dans l'eau de la SAS augmente lorsque la température et la pression sont plus élevées (Kirk-Othmer, c2010a).

On s'attend à ce que le traitement rende la surface plus hydrophobe que celle de la SAS pyrogène non traitée, ce qui pourrait contribuer à réduire la solubilité SAS dans les OMSSA dans l'eau, en raison d'une plus faible humidité superficielle. Cependant, les substances organiques telles que les agents de surface, les sels, les acides et les alcalis présents dans l'environnement peuvent contribuer à humecter la silice à surface traitée, favorisant son adsorption aux sols et aux sédiments dans l'environnement (ECETOC, 2006). Néanmoins, la floculation des particules et l'élimination de la colonne d'eau par la sédimentation devraient être favorisées par une hydrophobie accrue de la SAS (Barthel, 1995).

Persistence et potentiel de bioaccumulation

Persistence dans l'environnement

Aucune donnée empirique ou modélisée n'a été recensée qui aurait pu permettre de faire une estimation quantitative de la persistance des particules de SAS traitée des OMSSA dans les milieux naturels, y compris l'eau.

Le composant SAS à surface traitée des OMSSA se trouve sous la forme d'agglomérats grossiers ($\leq 10 \mu\text{m}$) ou plus fins ($< 10 \mu\text{m}$, pouvant aller jusqu'à $> 10 \text{nm}$); on trouve très peu ou pas du tout de particules primaires distinctes (10 nm) [Environnement Canada, 2010a; voir le tableau 4].

Tableau 4. Distribution type des diamètres des particules de deux polymorphes de SAS (ECETOC, 2006)

	<i>SAS pyrogène</i>	<i>SAS précipitée</i>
Particule primaire	5 à 50 nm	5 à 100 nm
Agrégat	100 à 1 000 nm	100 à 1 000 nm
Agglomérat	1 à 250 μm	1 à 250 μm

Les particules primaires sont agrégées par des liaisons siloxane formées à la faveur du processus de pyrolyse-déshydratation associé à la fabrication des particules de silice. Cependant, des agglomérats plus gros peuvent être formés par les liaisons hydrogène ou les interactions de van der Waals, sensiblement plus faibles que les liaisons siloxane (Kirk-Othmer, c2010b). Les liaisons hydrogène entre les agglomérats peuvent se défaire dans un milieu aqueux, et les liaisons siloxane qui retiennent les particules primaires ensemble peuvent être sujettes à s'hydrolyser dans un milieu aqueux. Il peut s'ensuivre une décomposition des agrégats dans un milieu aqueux, mais elle sera beaucoup plus lente que celle des liaisons hydrogène. Ding *et al.*, (2010) ont démontré qu'avec un apport d'énergie suffisamment puissant dans les dispersions aqueuses, il était possible de décomposer les agglomérats hydrophobes et hydrophiles en agrégats. Cependant, même l'apport énergétique le plus élevé (mélangeur à cisaillement élevé pendant 4 heures, à 8 000 tr/min) ne parvient pas à décomposer les agrégats en particules primaires.

Un autre processus potentiellement important pourrait se produire, à savoir la dissolution du réseau de SiO_2 de la SAS et la formation de $\text{Si}(\text{OH})_4$ [équation (1)] ainsi que de formes oligomériques (décrites précédemment dans la section Devenir dans l'environnement), ce qui peut entraîner la transformation d'une partie des particules de silice en acides inorganiques. Cependant, la nature hydrophobe de la SAS traitée présente dans les OMSSA peut inhiber la dissolution observée pour la SAS non traitée. Il se peut donc que la transformation de la SAS traitée en acide silicique soit minimale en milieu aqueux, et que le gros de la SAS à surface traitée présente dans les OMSSA persiste sous forme de matière particulaire agrégée ou agglomérée dans l'environnement.

Étant donné les propriétés physiques et l'absence de biodégradation prévue de la SAS traitée des OMSSA, on s'attend à ce que les OMSSA soient persistantes dans le sol, les sédiments, l'air, ainsi que l'eau.

Le potentiel de transport atmosphérique à grande distance du composant SAS traitée des OMSSA n'a pu être modélisé en raison de ses propriétés particulières uniques. Il a été établi qu'une bonne partie des concentrations ambiantes de matière particulaire (la moitié au moins des particules fines) a été transportée sur une grande distance depuis les régions industrielles des États-Unis, une constatation qui se tient si on considère que les particules plus fines sont plus susceptibles d'être transportées sur de longues distances (Environnement Canada et Santé Canada, 2000). Dans la mesure où le composant SAS traitée des OMSSA a tendance à former des agrégats et des agglomérats pouvant atteindre un diamètre $MP_{>0,1}$ à 10^0 (voir le tableau 2b), on peut penser qu'il est peu susceptible d'être transporté sur de longues distances dans l'atmosphère, et qu'il aurait plutôt tendance à se déposer à proximité des sources d'émission.

Selon les données expérimentales, les OMSSA répondent aux critères de persistance dans l'eau, le sol, les sédiments et l'air (demi-vies dans le sol et l'eau supérieures à 182 jours; demi-vie dans les sédiments supérieure à 365 jours; demi-vie dans l'air supérieure à 2 jours), tel qu'il est énoncé dans le *Règlement sur la persistance et la bioaccumulation* (Canada, 2000).

Potentiel de bioaccumulation

Les valeurs expérimentales recensées pour le log K_{oc} d'analogues du composant SAS traitée des OMSSA (pour les autres SAS à surface traitée ou SAS non traitées, voir le tableau 2b) ne sont pas applicables aux matières particulaires (NOTOX, 2002; IUCLID Data Set, 2002; OCDE, 2004).

Aucune donnée expérimentale n'a été relevée pour ce qui est de l'accumulation dans la masse corporelle entière de la SAS à surface traitée ou non traitée chez les espèces aquatiques ou terrestres. Qui plus est, aucun modèle existant de relations quantitatives structure-activité (RQSA) ne permet de prédire le potentiel de bioaccumulation des OMSSA. De plus, les facteurs de bioconcentration (FBC) et de bioaccumulation (FBA) ne sont pas vraiment utiles pour évaluer le potentiel de bioaccumulation des métaux et d'autres substances inorganiques (comme le SiO_2). En effet, les FBC et les FBA ne sont pas d'une grande utilité pour ce qui est de prédire les risques liés aux éléments (Schlekat *et al.*, 2007). Par exemple, certains éléments peuvent être naturellement et fortement accumulés par le milieu environnant à cause de leur essentialité nutritionnelle. Il est notoire que la silice dissoute joue un rôle central dans le développement, la physiologie et la structure squelettique des algues, des plantes et des animaux (Markert, 1994; Marten, 2007). De fait, la silice dissoute (c'est-à-dire l'acide silicique monomérique ou oligomérique) peut être assimilée activement par les organismes vivant en eau douce ou marine (les diatomées, les radiolaires et les éponges). Ces processus naturels sont pour la plupart associés à la fonction structurale (OCDE, 2004; Exley, 1998). Notamment, les diatomées, l'un des organismes importants pour ce qui est de la capacité à transformer

l'acide silicique sur les plans de la diversité, de l'ubiquité et de la biomasse, assimilent l'acide silicique pour former le frustule de silice qui imprègne leur coque (Exley, 1998).

L'assimilation de la silice est un processus naturel pour la grande majorité des plantes, dont elle influence énormément la fonction et la productivité (OCDE, 2004; Sparks *et al.*, 2010). La silice, sous sa forme d'acide silicique, est puisée par les racines, puis elle est transloquée dans toute la plante sous la forme d'acide silicique monomérique. Dans les tissus, la silice est présente sous forme de corps amorphes appelés « phytolithes » (entre autres; d'autres formes ont été identifiées [Sparks *et al.*, 2010]). Les concentrations de silice dans les tissus végétaux varient de 0,1 à 10 % de poids sec, selon l'espèce. Le lien entre la disponibilité en silice et le rendement accru des récoltes a été abondamment démontré dans le cas du riz, du blé et du maïs (Sparks *et al.*, 2010). Par ailleurs, la silice présente dans les tissus végétaux offre un soutien structural et accroît la résistance contre les agents pathogènes, l'herbivorisme et la translocation de l'eau et des sels (Sparks *et al.*, 2010; Exley, 1998). Par conséquent, l'absorption de silice amorphe par les plantes est considérée comme étant un processus naturel dans l'environnement.

D'après les données disponibles, le potentiel de bioaccumulation des OMSSA devrait être faible. La silice dissoute (l'acide silicique) peut être activement assimilée par les espèces végétales terrestres et aquatiques par voie de processus naturels liés, pour la plupart, à la fonction structurale. Selon les données recensées sur l'absorption du composant représentatif des OMSSA par diverses voies d'exposition, il ne semble pas qu'ils soient bioaccumulables par les organismes vivant dans l'eau, l'air ou le sol, ni qu'ils satisfassent aux critères relatifs à la bioaccumulation (FBA > 5 000), tels qu'ils sont établis dans le *Règlement sur la persistance et la bioaccumulation* (Canada, 2000).

Potentiel d'effets nocifs sur l'environnement

Évaluation des effets sur l'environnement

A – Dans le milieu aquatique

La toxicité des OMSSA pour les organismes aquatiques a été décrite à partir d'analogues d'un composant de la substance, la SAS à surface traitée. Plus précisément, on a utilisé diverses SAS analogues du composant principal des OMSSA, la SAS à surface traitée, pour déterminer la variabilité des propriétés physiques et chimiques, et notamment le degré d'hydrophobie, pouvant découler des variations dans le niveau de traitement de surface de la substance. Les données empiriques sur la toxicité pour les organismes aquatiques de la SAS à surface traitée (n° CAS 68611-44-9) et de la SAS non traitée (n°s CAS 112945-52-5 et 7631-86-9) figurent au tableau 5.

Tableau 5. Données empiriques sur la toxicité pour les organismes aquatiques des composants représentatifs et analogues des OMSSA

Composant représentatif (n° CAS)	Diamètre des particules (nm)	Organisme d'essai	Type d'essai	Paramètre	Valeur (mg/L)	Référence
SAS à surface traitée (68611-44-9)	N.D. ⁴	<i>Daphnia magna</i>	Toxicité aiguë (24 h)	EL ₅₀ ¹	> 10 000	NOTOX, 2002; IUCLID Data Set, 2002
	N.D.	Poisson-zèbre (<i>Brachydanio rerio</i>)	Toxicité aiguë (96 h)	LL ₅₀ ²	> 10 000	
	N.D.	Algues (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	Toxicité chronique (72 h)	EL ₅₀	> 10 000	
SAS pyrogène non traitée (112945-52-5)	N.D.	Poisson-zèbre (<i>Brachydanio rerio</i>)	Toxicité aiguë (96 h)	LL ₅₀	10 000	OCDE, 2004
		<i>Daphnia magna</i>	Toxicité aiguë (72 h)	EL ₅₀	> 10 000	
			Toxicité aiguë (72 h)	EL ₅₀	1 000	
SAS non traitée (7631-86-9)	< 62 000 ⁵	Algues (<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>)	Toxicité chronique (72 h)	CSEO ³	> 1 000	Van Hoecke <i>et al.</i> , 2008

¹ EL₅₀ – Taux de charge d'une substance qu'on estime susceptible de causer un effet chez 50 % des organismes d'essai.

² LL₅₀ – Taux de charge d'une substance qu'on estime létale pour 50 % des organismes d'essai.

³ CSEO – Concentration sans effet observé, soit la concentration la plus élevée ne causant pas d'effet statistiquement significatif par rapport au groupe témoin dans un essai de toxicité.

⁴ Non disponible.

⁵ Diamètre des particules agrégées ou agglomérées.

La toxicité aiguë de la SAS à surface traitée (dichlorodiméthylsilane, produits de réaction avec la silice; n° CAS 68611-44-9) pour le poisson-zèbre (*Brachydanio rerio*), les daphnies (*Daphnia magna*) et les algues (*Scenedesmus subspicatus*) sont décrites dans le document *High Production Volume Assessment Report*, préparé par NOTOX (2002) et résumé dans les sommaires du IUCLID Data Set (IUCLID Data Set, 2002), soumis à l'Environmental Protection Agency des États-Unis (USEPA) en 2002.

Les essais sur le poisson-zèbre et les daphnies ont été réalisés pour 2 concentrations; les dilutions de la substance d'essai (1 000 et 10 000 mg/L) ont été agitées pendant 20 heures, puis laissées à décanter pendant 4 heures avant qu'on y plonge les organismes d'essai (NOTOX, 2002; IUCLID Data Set, 2002). Les concentrations d'essai dépassaient la limite de solubilité, et des substances d'essai non dissoutes ont été observées au fond et à la surface du milieu de suspension (IUCLID Data Set, 2002). Aucune mortalité n'a été recensée chez le poisson-zèbre soumis aux concentrations d'essai les plus élevées (10 000 mg/L). Aucune immobilisation n'a été observée chez les daphnies à des concentrations de 1 000 et de 10 000 mg/L. La solution portant une concentration de

10 000 mg/L a été filtrée avec de la laine de Perlon avant les essais, pour faciliter le repérage des daphnies (IUCLID Data Set, 2002).

L'incidence de la SAS à surface traitée sur le rythme de croissance et la biomasse des algues (*Scenedesmus subspicatus*) a été évaluée (NOTOX, 2002). Les solutions d'essai ont été préparées en ajoutant respectivement 63, 630 et 6 250 mg de substance à 500 mL d'eau ultrapure, puis elles ont été agitées pendant 24 heures et filtrées. Les concentrations nominales finales, mesurées à partir des solutions non filtrées, étaient de 101, 1 008 et 10 000 mg/L (IUCLID Data Set, 2002) respectivement. Aucun effet n'a été observé sur le rythme de croissance de la biomasse (NOTOX, 2002).

Les effets aigus de la SAS non traitée pour le poisson-zèbre (*B. rerio*) et les invertébrés (*D. magna*) ont été décrits dans le document *Chemical Screening Initial Data Set (SIDS) Initial Assessment Report* préparé par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE, 2004). Dans le résumé des études sur les SAS non traitées, les n^{os} CAS 7631-86-9, 112945-52-5 et 112926-00-8 ont été pris en compte. Dans deux études sur les effets aigus de la SAS pour le poisson-zèbre (*B. rerio*), des concentrations surchargées (1 000 et 10 000 mg/L) de SAS non traitée ont été agitées pendant 20 heures dans l'eau de dilution; la solution a été laissée à décanter pendant 4 heures (OCDE, 2004), et la suspension a ensuite été soumise aux essais. Aucun effet n'a été observé à la concentration la plus élevée après quatre jours.

Les effets aigus de la SAS non traitée pour les daphnies (*D. magna*) ont également fait l'objet de deux études. Dans la première étude, les solutions d'essai ont été préparées en agitant les solutions surchargées (1 000 et 10 000 mg/L) pendant 20 heures, puis les suspensions ont été soumises à des essais. Après 24 heures d'exposition, 7,5 % et 2,5 % des daphnies étaient immobiles dans les concentrations de 1 000 et 10 000 mg/L, respectivement. Toutefois, les effets observés n'étaient pas liés à la concentration; on a observé la présence de particules sur les appendices des sujets immobiles. Il serait donc permis de croire que les effets sur la mobilité des sujets étaient attribuables à un empêchement physique (OCDE, 2004). Dans la seconde étude, trois solutions d'essai ont été préparées comme suit :

- 1) solution surchargée de 1 000 et 10 000 mg/L, agitée pendant 20 heures;
- 2) solution surchargée de 1 000 et 10 000 mg/L, agitée pendant 20 heures et passée dans un filtre de laine de Perlon;
- 3) solution surchargée de 1 000 et 10 000 mg/L, agitée pendant 20 heures et passée dans un filtre de microfibre de verre (1,75 µm et 1,2 µm, successivement).

Avec la première méthode, 5 % et 25 % respectivement des daphnies étaient immobiles après une exposition de 24 heures à des concentrations de 1 000 et 10 000 mg/L. Avec la deuxième méthode, 10 % et 22,5 % respectivement des daphnies étaient immobiles après une exposition de 24 heures à des concentrations de 1 000 et 10 000 mg/L. Enfin, avec la troisième méthode, aucune immobilisation significative n'a été observée. On présume par conséquent que l'immobilisation observée pourrait être attribuable à des empêchements physiques (OCDE, 2004).

D'après les données expérimentales, la SAS à surface traitée et la SAS non traitée présentent une toxicité faible pour les organismes aquatiques.

En résumé, les analogues du composant principal des OMSSA, la SAS à surface traitée, et de la SAS non traitée, présentent une faible toxicité pour le poisson-zèbre et les daphnies. On a observé une certaine immobilisation des daphnies après leur exposition à une suspension non filtrée de SAS non traitée, mais ces effets seraient toutefois attribuables à des empêchements physiques des organismes en raison des fortes concentrations de particules de fort diamètre dans la substance d'essai. Par conséquent, d'après les données expérimentales liées aux substances analogues pertinentes du composant principal des OMSSA, la SAS traitée, on ne s'attend pas à ce que cette substance cause des effets nocifs aigus chez les organismes aquatiques exposés à de faibles concentrations.

B – Autres milieux naturels

Le rat peut servir de modèle animal pour les organismes terrestres sauvages. La toxicité par inhalation de la SAS à surface traitée (n° CAS 68611-44-9), une substance analogue des OMSSA, pour les rats a été décrite dans le document *High Production Volume Assessment Report* préparé par NOTOX (2002). Puisque les études portant sur des mammifères visent essentiellement à établir les effets pour la santé humaine, les résultats détaillés de l'exposition des rats figurent dans la section qui porte sur ce sujet aux présentes. En ce qui concerne les OMSSA, les conclusions des études sur l'exposition par inhalation des rats appliquées à la santé humaine sont considérées comme étant applicables aux organismes terrestres.

Évaluation de l'exposition dans l'environnement

Aucune donnée sur les concentrations d'OMSSA dans l'eau au Canada n'ayant été recensée, on a évalué les concentrations dans l'environnement à partir de renseignements disponibles, y compris les estimations relatives aux quantités de cette substance, aux taux de rejets et à la taille des plans d'eau récepteurs.

A – Rejets industriels

Dans le cas des OMSSA, on prévoit une exposition aquatique due aux rejets découlant d'une utilisation industrielle vers une usine de traitement des eaux usées qui évacue son effluent dans des eaux réceptrices. La concentration de la substance dans les eaux réceptrices près du point de rejet de l'usine de traitement des eaux usées est utilisée comme la concentration environnementale estimée (CEE) dans l'évaluation du risque que pose la substance en milieu aquatique. On peut la calculer à l'aide de l'équation

$$C_{\text{eau-ind}} = \frac{1000 \times Q \times P \times (1 - T)}{N \times E \times D}$$

où

$C_{\text{eau-ind}}$: concentration en milieu aquatique due aux rejets industriels, en mg/L
Q	: quantité de substance totale utilisée chaque année sur un site industriel, en kg/an
P	: pertes dans les eaux usées, fraction
T	: taux d'élimination de l'usine de traitement des eaux usées, fraction
N	: nombre de jours de rejets annuels, en jour/an
E	: débit de l'effluent de l'usine de traitement des eaux usées, en m ³ /j
D	: facteur de dilution dans l'eau réceptrice, sans dimension

Une analyse de l'exposition propre au site a été réalisée pour le milieu aquatique d'un seul site industriel qui reformule des OMSSA aux fins de la fabrication d'adhésifs et de produits d'étanchéité (Environnement Canada, 2010c). En 2006, la quantité importée d'OMSSA atteignait presque 100 000 kg. Le site a été retenu parce qu'il représente un choix réaliste pour l'application d'un scénario de rejet de la pire éventualité au Canada, étant présumé que la quantité de substances rejetées est proportionnelle à la quantité consommée ou produite.

Cette analyse d'exposition propre au site porte sur une installation, une usine de traitement des eaux usées et un plan d'eau récepteur. On a établi la concentration environnementale estimée (CEE) dans les eaux réceptrices sur la base de la concentration dans l'effluent de traitement des eaux usées et en appliquant un facteur de dilution de 10 en fonction des eaux réceptrices. La concentration dans les effluents d'eaux usées traitées peut être fondée sur des données estimées ou déclarées. À défaut de données déclarées, on a estimé la concentration sur la base d'une fraction de la substance perdue par l'installation vers une usine de traitement des eaux usées municipales, d'un taux d'élimination de l'usine de traitement des eaux usées et du débit de son effluent. La fraction de perte, estimée de façon prudente à 1,1 %, est attribuable aux opérations de manutention des contenants de produit chimique et aux procédés industriels s'appliquant aux installations à l'étude. Il convient de noter que cette plage devrait représenter la limite supérieure des pertes dans les eaux usées et que les rejets d'une installation réelle devraient être inférieurs à cette limite supérieure. Le taux d'élimination de l'usine de traitement des eaux usées municipale a été estimé à 95,2 % (ASTreat Model, 2006). Le débit de l'effluent d'une usine de traitement des eaux municipale est proportionnel à la population desservie; dans le cas à l'étude, il avoisinait 300 000 m³ par jour.

À partir des estimations susmentionnées, la CEE du composant SAS à surface traitée des OMSSA a été estimée à $4,9 \times 10^{-5}$ mg/L pour un utilisateur industriel d'OMSSA. On a également supposé que la fréquence de rejet était de 365 jours, soit la fréquence estimée pour les grands consommateurs industriels d'OMSSA. Comme un seul utilisateur a été pris en considération aux fins de l'analyse propre au site, ainsi que certaines hypothèses de la limite supérieure, on considère que la valeur de CEE obtenue représente le niveau d'exposition dans le cadre d'un scénario réaliste de rejet de la pire éventualité dans les eaux réceptrices près du point de rejet de l'usine de traitement des eaux usées sur un site industriel au Canada.

B – Rejets commerciaux

On trouve des OMSSA dans certains produits commerciaux qui ne sont pas destinés au grand public, mais leur utilisation peut être dispersive. Il en découle que des OMSSA peuvent être rejetés dans l'eau par suite de l'utilisation des produits commerciaux qui en contiennent.

Le tableur Mega Flush, conçu par Environnement Canada, a été utilisé pour estimer la concentration de la substance dans divers plans d'eau récepteurs des effluents d'usines de traitement des eaux usées pouvant contenir des OMSSA issus de produits commerciaux (Environnement Canada, 2009). Le tableur fournit ces estimations pour environ 1 000 sites de rejet dans tout le Canada, et ce, d'après des hypothèses réalistes.

Ces dernières incluent :

- pertes dans les égouts estimées à 2,7 ou 2,8 %;
- taux d'élimination des usines de traitement des eaux usées estimé à 0,0 % faute de traitement;
- 46,9 % en cas de traitement primaire seulement et 95,2 % en cas de traitements primaire et secondaire combinés;
- nombre de jours de rejet égal à 365 jours par an;
- facteur de dilution dans l'eau réceptrice sur une échelle de 1 à 10.

La CEE du composant SAS à surface traitée des OMSSA dans les plans d'eau récepteurs analysés se situe entre $2,3 \times 10^{-7}$ et $1,8 \times 10^{-3}$ mg/L. L'estimation a été calculée en supposant que les consommateurs utilisent environ 100 000 kg/an de la substance. L'équation et les entrées utilisées pour calculer la CEE sont décrites dans le rapport d'Environnement Canada (2010d).

Caractérisation des risques pour l'environnement

La démarche suivie dans cette évaluation écologique préalable consistait à examiner les divers renseignements à l'appui et à tirer des conclusions en suivant la méthode du poids de la preuve et le principe de prudence requis par la LCPE (1999). Les éléments de preuve pris en compte comprennent une comparaison des estimations prudentes de l'exposition aux données écotoxicologiques disponibles, ainsi que des renseignements sur la persistance, la bioaccumulation, les sources et le devenir de la substance.

Les OMSSA devraient être persistants dans l'air, l'eau, le sol et les sédiments. Le potentiel de bioaccumulation est jugé faible compte tenu de l'évaluation de leur principal composant, la SAS à surface traitée.

Les faibles volumes d'importation des OMSSA par un site unique au Canada, dont une bonne partie est par la suite exportée, donne à penser que les rejets les plus importants dans un milieu aquatique se produisent à ce site industriel. Les rejets dans l'environnement au Canada touchent principalement l'eau et, dans une mesure moindre,

l'air. Une fois rejetés dans l'air, les OMSSA se déposent essentiellement dans l'eau et le sol si on tient compte de la densité relativement élevée et de la faible pression de vapeur du composant SAS traitée (plus de 90 %) des OMSSA. De plus, les mesures de santé et de sécurité au travail ont restreint les quantités de matières particulaires inhalables rejetées dans l'air à moins de 10 µm (soit MP₁₀). Il s'ensuit que les émissions fugitives du seul site au Canada ne posent vraisemblablement aucun risque pour les mammifères à respiration aérienne.

Si on considère sa nature hydrophobe et la grande taille de ses particules, de même que les données expérimentales sur la toxicité (EL₅₀ > 10 000 mg/L) de l'analogue le plus pertinent (n° CAS 68611-44-9), le composant SAS à surface traitée des OMSSA présente un faible potentiel de risque pour les organismes aquatiques.

Lorsque des OMSSA sont rejetés dans un plan d'eau, ils se répartissent dans les matières particulaires en suspension et les sédiments de fond, où les organismes benthiques sont exposés à la substance. Néanmoins, on ne dispose d'aucune donnée de surveillance environnementale propre aux organismes vivant dans les sédiments pour cette substance. Aussi, la toxicité des matières particulaires telles que les OMSSA pour les espèces benthiques ne peut être extrapolée selon l'approche d'équilibre pour un milieu aquatique. Dans le cas de la matière particulaire, les liens qui régissent les caractéristiques de la substance tels que la toxicité et le comportement dans le milieu aquatique ne sont pas applicables au milieu sédimentaire. Par conséquent, la toxicité des OMSSA pour les organismes benthiques ne peut être établie avec certitude en raison du manque de données et de la non-validité des extrapolations à partir des données sur le milieu aquatique. Cela étant dit, on ne s'attend pas à une toxicité élevée des OMSSA pour les organismes benthiques.

En résumé, si on tient compte des CEE prudentes d'OMSSA dans les rejets dans l'environnement attribuables aux activités industrielles et commerciales, et de la faible toxicité du composant SAS à surface traitée des OMSSA, cette substance ne devrait pas présenter de risque pour l'environnement au Canada.

Incertitudes dans l'évaluation des risques pour l'environnement

Des incertitudes subsistent dans la présente évaluation des risques en raison du manque de données sur les propriétés physiques et chimiques spécifiques au composant SAS traitée des OMSSA (p. ex. hydrosolubilité). Toutefois, des méthodes de déduction à partir d'analogues ou des données sur de proches analogues ont été utilisées pour pallier les principales lacunes dans les données (avec une marge d'erreur acceptable).

Une autre incertitude vient du fait que le composant SAS à surface traitée des OMSSA peut présenter des variations dans le diamètre des particules et des niveaux de traitement de surface, et que ces deux facteurs peuvent influencer sur le devenir dans l'environnement de la substance et les risques associés, suivant la substance à l'essai. D'après les renseignements fournis par l'industrie (Environnement Canada, 2010a), le

composant SAS à surface traitée des OMSSA se trouve dans l'environnement au Canada sous forme d'agglomérats grossiers ($\leq 10 \mu\text{m}$) ou d'agrégats à particules plus fines ($< < 10 \mu\text{m}$, mais $> 10 \text{nm}$), et la quantité de particules primaires distinctes (diamètre moyen des particules primaires de 10 nm) est négligeable; le niveau du traitement de surface se situerait entre 3,5 et 4,5 % en poids, et non dans la fourchette des valeurs mesurées de 1 à 3 %, jugée incertaine par les auteurs; et, enfin, la substance est essentiellement hydrophobe (c'est-à-dire insoluble dans l'eau puisque son hydrosolubilité est inférieure à 0,001 mg/L). Des analogues présentant des caractéristiques similaires ont été choisies pour l'évaluation des risques aux fins des présentes, mais il perdure des incertitudes parce qu'il a été impossible d'éliminer les variations dans le diamètre des particules, le niveau et le type de traitements de surface.

Les concentrations expérimentales utilisées pour les analogues du composant SAS à surface traitée des OMSSA qui sont liées à la toxicité pour les organismes aquatiques sont une source supplémentaire d'incertitude, du fait que ces concentrations dépassent la solubilité (expérimentale ou prévue) du produit chimique dans l'eau. Malgré ce fait, les données dont on dispose indiquent que le composant SAS à surface traitée des OMSSA ne présente pas un risque élevé pour les organismes aquatiques.

Comme les OMSSA font partie des UVCB (substances de composition inconnue ou variable, produits de réaction complexes ou matières biologiques), elles ne peuvent être représentées par une seule structure chimique distincte. Donc, aux fins de la comparaison des analogues, on a utilisé des « composants représentatifs » afin de faire des estimations prudentes. Étant donné que chaque UVCB peut être associée à plusieurs structures représentatives, il est reconnu que des incertitudes liées à la structure existent pour cette substance.

Même s'il est possible que d'autres produits commerciaux et de consommation contenant des OMSSA soient importés au Canada en plus de ceux qui ont été déclarés au titre des enquêtes menées auprès de l'industrie conformément à l'article 71 de la LCPE (1999), aucun renseignement n'est disponible sur la quantité de ces importations. On prévoit que les étapes du cycle de vie et les pertes proportionnelles découlant de l'utilisation de ces autres produits ne différeront pas grandement de celles prises en considération et estimées plus haut. Toutefois, la masse réelle de la perte de substance au cours de chaque étape du cycle de vie peut être supérieure aux estimations susmentionnées, si ces données étaient disponibles aux fins de considération.

Potentiel d'effets nocifs sur la santé humaine

Évaluation de l'exposition

Milieu naturel

Aucune donnée empirique n'indique des concentrations d'OMSSA dans les milieux naturels au Canada. Ils ne devraient pas non plus être présents dans les aliments et les boissons. ChemCAN, un modèle d'exposition environnementale propre au Canada, a été utilisé pour estimer les concentrations d'OMSSA dans différents milieux naturels (ChemCAN, 2003). Ce modèle de fugacité de niveau III est utilisé pour estimer les concentrations moyennes dans différents milieux et l'exposition de la population aux substances dans l'environnement. ChemCAN diffère des modèles aux sources ponctuelles mentionnés dans la section de l'évaluation écologique du document.

D'après les renseignements fournis en réponse à l'avis publié au titre de l'article 71 de la LCPE (1999), la quantité totale de la substance employée dans les produits commerciaux allait de 10 000 à 100 000 kg en 2006 (Environnement Canada, 2010a). Les pourcentages de pertes prévues grâce à l'outil de débit massique (voir le tableau 3) appliqués à la valeur supérieure de la plage des quantités (100 000 kg) d'OMSSA présentes dans les produits commerciaux au Canada en 2006 ont été utilisés pour calculer la limite supérieure prudente de l'absorption journalière d'OMSSA pour la population canadienne en général. Cela a permis de déterminer que l'extrémité de la tranche supérieure des estimations de l'exposition totale dans les milieux naturels est inférieure à 1 nanogramme par kg de poids corporel (kg p.c.) par jour. En conséquence, l'exposition potentielle de la population aux OMSSA présents dans les milieux naturels au Canada devrait être négligeable.

Produits de consommation

Aucune déclaration n'a été faite au titre de l'article 71 concernant l'utilisation des OMSSA dans des produits de consommation au Canada (Environnement Canada, 2010a). Les OMSSA sont utilisés exclusivement dans des installations industrielles (Environnement Canada, 2010a). Par conséquent, les produits de consommation ne devraient pas être une source d'exposition pour la population.

Évaluation des effets sur la santé

Les OMSSA ne sont pas classées parmi les substances ayant des effets sur la santé humaine par aucun organisme national ou international. Aucune donnée empirique concernant les OMSSA n'a été recensée dans les documents publiés, et aucun modèle RQSA ne permet de prédire la toxicité potentielle des OMSSA (ces modèles ne

permettent pas de prédire la toxicité des UVCB). Pour toutes ces raisons, l'analogue des OMSSA, le dichlorodiméthylsilane, produits de réaction avec la silice (n° CAS 68611-44-9), a été considéré aux fins de l'évaluation des effets potentiels des OMSSA pour la santé humaine. Cette substance est associée à la plus grande base de données sur les dangers parmi tous les analogues présentés dans le tableau 2b.

La toxicité de la SAS à surface traitée a été étudiée pour des animaux de laboratoire exposés par différentes voies et pendant différentes périodes. Les données expérimentales sont résumées ci-dessous.

Dans une étude de l'exposition par voie alimentaire d'une durée de 24 mois, des rats Wistar ont ingurgité des doses uniques de SAS à surface traitée de 100 mg/kg p.c. par jour. Aucun sujet n'a montré de signes cliniques liés au traitement, ni aucun effet cancérigène (NOTOX, 2002). Dans une autre étude de l'exposition par voie alimentaire d'une durée de 6 mois, des rats Wistar ont ingurgité des doses uniques de SAS à surface traitée de 500 mg/kg p.c. par jour. On a observé une légère transformation progressive quoique réversible du cortex surrénalien chez les rats, attribuée à l'état de stress chronique (IUCRID Data Set, 2000; NOTOX, 2002). Une dernière étude de l'exposition par voie alimentaire, d'une durée de 5 à 8 semaines, a consisté à faire ingurgiter à des rats Wistar des doses de 500, 1 000 ou 2 000 mg/kg p.c. par jour au début, augmentées progressivement jusqu'à 4 000, 8 000 et 16 000 mg/kg p.c. par jour, respectivement. Des pertes pondérales et la diminution de la consommation alimentaire, combinées à des signes d'apathie et à la diminution des activités de toilettage, ont été observées dans le groupe qui recevait des doses de 8 000 et de 16 000 mg/kg p.c. par jour; dans le groupe qui recevait des doses de 1 000 et de 16 000 mg/kg p.c. par jour, on a observé une baisse du glycogène cytoplasmique des hépatocytes, possible indicatif d'une sous-alimentation des sujets. Dans le groupe ayant reçu les doses les plus élevées, quatre animaux sont morts. La dose minimale avec effet nocif observé (DMENO) a été établie à 1 000 mg/kg p.c. par jour (NOTOX, 2002).

D'autres chercheurs se sont intéressés à l'exposition à la SAS à surface traitée par inhalation chez les rats. Dans une étude d'une durée de 13 semaines, des rats Wistar ont inhalé des doses de 35 mg/m³. On a observé des lésions de type granulome dans les poumons, des augmentations des macrophages alvéolaires, des corps granuleux dans les espaces alvéolaires, des débris et des leucocytes polymorphonucléaires, des bronchiolisations de la paroi alvéolaire, des fibroses interstitielles et l'hypertrophie des ganglions lymphatiques du médiastin chez les animaux d'essai (NOTOX, 2002). Dans une autre étude sur l'exposition par inhalation d'une durée de 2 semaines, des rats Wistar ont reçu des doses de 0, 31, 87 ou 420 mg/m³. Une perte pondérale associée à la concentration a été observée dans les groupes ayant inhalé 87 mg/m³ et plus. Les poumons présentaient les mêmes lésions que celles qui ont été observées dans l'étude de 13 semaines sur l'exposition par inhalation. Les rats ayant inhalé les doses maximales ont montré des symptômes aigus de détresse respiratoire et d'apathie (NOTOX, 2002).

La SAS à surface traitée ne s'est pas révélée mutagène dans les essais sur la mutation bactérienne inverse réalisés pour *Salmonella typhimurium* de souches TA98, TA100,

TA1537 et TA 1538, ni dans ceux pour *E. coli* de souche WP2 uvrA. Le résultat a également été négatif lorsque la substance a été soumise à un essai *in vitro* d'aberration chromosomique des cellules ovariennes chez le hamster chinois (NOTOX, 2002).

Deux études de toxicité pour la reproduction et le développement ont été recensées. Dans une étude de 6 mois sur une génération unique combinée à une étude de fertilité et de toxicité parentale, des rats mâles et femelles ont reçu des doses alimentaires de la substance de 500 mg/kg p.c. par jour, 8 semaines avant l'accouplement pour la première portée, et 17 semaines avant l'accouplement pour la seconde portée. Aucun effet associé au traitement n'a été observé chez les parents ni les rejetons, et aucun effet n'a été observé aux gonades des femelles et des mâles (NOTOX, 2002). Dans une étude sur la toxicité pour la reproduction portant sur 2 générations, des rats mâles et femelles ont reçu des doses alimentaires de 100 mg/kg p.c. par jour pendant 24 mois. Aucun effet sur la fertilité ni sur les rejetons n'a été observé (NOTOX, 2002).

Caractérisation des risques pour la santé humaine

Étant donné l'inexistence de données empiriques sur les effets pour la santé des OMSSA, on a utilisé un analogue, le dichlorodiméthylsilane et produits de réaction avec la silice, pour caractériser les effets potentiels sur la santé humaine. Les seuls effets potentiels de l'exposition aux OMSSA pour la santé touchent le système respiratoire. On s'attend à ce que l'exposition de la population aux OMSSA par les milieux naturels et les aliments soit négligeable. On ne prévoit aucune exposition de la population aux OMSSA issus de l'utilisation de produits de consommation. Puisque l'exposition de la population dans les milieux naturels au Canada devrait être négligeable, le risque pour la santé humaine est considéré comme faible.

Incertitudes dans l'évaluation des risques pour la santé humaine

L'estimation de l'exposition aux OMSSA dans l'environnement est très incertaine étant donné l'absence de données publiées sur les concentrations d'OMSSA dans les milieux naturels. C'est pourquoi la modélisation des concentrations dans l'environnement est fondée sur la quantité connue d'OMSSA utilisée dans les produits commercialisés au Canada en 2006. Comme la valeur maximale des quantités commercialisées a été utilisée dans la modélisation, les résultats modélisés devraient représenter des estimations prudentes de l'exposition environnementale. De plus, il existe une incertitude en raison des hypothèses utilisées dans le modèle.

De même, en raison des lacunes dans les données empiriques sur les effets pour la santé des OMSSA, le niveau de confiance à l'égard de la base de données sur les effets pour la santé est faible.

Conclusion

D'après les renseignements contenus dans le présent rapport d'évaluation préalable, il est conclu que les OMSSA ne satisfont pas aux critères énoncés aux alinéas 64(a) ou 64(c) de la LCPE (1999) car ils ne pénètrent pas dans l'environnement en une quantité, à une concentration ou dans des conditions de nature à avoir, immédiat ou à long terme, un effet nocif sur l'environnement ou sur la diversité biologique, ou à mettre en danger l'environnement essentiel pour la vie. En outre, les OMSSA répondent aux critères de persistance, mais ils ne répondent pas aux critères du potentiel de bioaccumulation énoncés dans le *Règlement sur la persistance et la bioaccumulation* (Canada, 2000).

À la lumière des renseignements disponibles sur la santé humaine, on conclut que les OMSSA ne satisfont pas au critère énoncé à l'alinéa 64(c) de la LCPE (1999) car ils ne pénètrent pas dans l'environnement en une quantité, à une concentration ou dans des conditions de nature à constituer un danger au Canada pour la vie ou la santé humaines.

Par conséquent, on conclut que les OMSSA ne satisfont à aucun des critères énoncés à l'article 64 de la LCPE (1999).

Références

- Aitken, R.J., Creely, K.S., Tran, C.L. 2004. Nanoparticles: an occupational hygiene review [en ligne]. Édinburgh (Écosse) : Institute of Occupational Medicine. Accès : <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr274.pdf>
- ASTreat Model [modèle sur l'élimination des usines de traitement des eaux usées]. 2006. Version 1.0. Cincinnati (États-Unis) : Procter & Gamble Company. Disponible auprès de Procter & Gamble Company, C.P. 538707, Cincinnati (OH), 45253-8707, États-Unis.
- Auner, N., Weis, J. (éd). 1996. Organosilicon chemistry II, from molecules to materials. Weinheim (Allemagne) : Wiley-VCH. 852 p.
- Barthel, H. 1995. Surface interactions of dimethylsiloxy group-modified fumed silica. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 101(2-3):217-226.
- [BDIPSN] Base de données sur les ingrédients des produits de santé naturels [en ligne]. 2010. Ottawa (Ont.) : Santé Canada. Accès : <http://webprod.hc-sc.gc.ca/nhp-id-bdip/sn/search-rechercheReq.do?lang=fra>
- [BDPP] Base de données sur les produits pharmaceutiques en ligne [en ligne]. 2010. Ottawa (Ont.) : Santé Canada. Accès : <http://webprod.hc-sc.gc.ca/dpd-bdpp/index-fra.jsp>
- [BDPSNH] Base de données des produits de santé naturels homologués [en ligne]. 2010. Ottawa (Ont.) : Santé Canada. Accès: <http://205.193.93.55/lnhpd-bdpsnh/start-debuter.do>
- Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem.Soc.* 60:309.
- Canada. 1978. *Règlement sur les aliments et drogues*. C.R.C., ch. 870. Accès : <http://laws.justice.gc.ca/fra/C.R.C.-ch.870/index.html>
- Canada. 1999. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)*. L.C. 1999, ch. 33. *Gazette du Canada*. Partie III, vol. 22, n° 3. Accès : <http://www.gazette.gc.ca/archives/p3/1999/g3-02203.pdf>
- Canada. 2000. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) : Règlement sur la persistance et la bioaccumulation*, C.P. 2000-348, 23 mars 2000, DORS/2000-107. *Gazette du Canada*, Partie II, vol. 134, n° 7, p. 607-612. Accès : <http://gazette.gc.ca/archives/p2/2000/2000-03-29/pdf/g2-13407.pdf>
- Canada. Ministère de l'Environnement, ministère de la santé. 2006a. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) : Avis d'intention d'élaborer et de mettre en œuvre des mesures d'évaluation et de gestion des risques que certaines substances présentent pour la santé des Canadiens et leur environnement*. *Gazette du Canada*, Partie I, vol. 140, n° 49, p. 4109-4117. Accès : <http://www.gazette.gc.ca/archives/p1/2006/2006-12-09/pdf/g1-14049.pdf>
- Canada. Ministère de l'Environnement, ministère de la Santé. 2006b. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) : Avis concernant certaines substances considérées comme priorité pour suivi*. *Gazette du Canada*, Partie I, vol. 140, n° 9, p. 435-459. Accès : <http://canadagazette.gc.ca/partI/2006/20060304/pdf/g1-14009.pdf>
- Canada. Ministère de l'Environnement, ministère de la Santé. 2009a. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) : Avis de douzième divulgation d'information technique concernant les substances identifiées dans le Défi*. *Gazette du Canada*, Partie I, vol. 143, no 52, p. 3879-3843. Accès : <http://canadagazette.gc.ca/rp-pr/p1/2009/2009-09-26/html/notice-avis-fra.html>

Canada. Ministère de l'Environnement. 2009b. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) : Avis concernant les substances du groupe 12 du Défi*. *Gazette du Canada*, Partie I, volume 143, n° 52, p. 3813-3834. Accès : <http://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2009/2009-12-26/pdf/g1-14352.pdf#page=7>

[CDC] Centres for Disease Control and Prevention (États-Unis). 2005. NIOSH pocket guide to chemical hazards [en ligne]. Atlanta (GA) : CDC, National Institute for Occupational Safety and Health. Accès : <http://www.cdc.gov/niosh/npg/default.html> [consulté le 18 novembre 2010].

[ChemCAN]. 2003. ChemCAN: level III. fugacity model of regional fate of chemicals [en ligne]. Version 6.00. Peterborough (Ont.) : Canadian Environmental Modelling Centre, Trent University. Accès : <http://www.trentu.ca/academic/aminss/envmodel/models/CC600.html>

Ding, P., Orwa, M.G., Pacek, A.W. 2010. De-agglomeration of hydrophobic and hydrophilic silica nano-powders in a high shear mixer. *Powder Technol.* 195:221-26.

[ECETOC] Centre d'écologie et de toxicologie de l'industrie chimique européenne. 2006. Synthetic amorphous silica (CAS No. 7631-86-9). Bruxelles (Belgique) : ECETOC Joint Assessment of Commodity Chemicals. 231 p.

Environnement Canada. 2008. Guidance for Conducting Ecological Assessments under CEPA, 1999, Science Resource Technical Series, Technical Guidance Module: Mass Flow Tool. Document de travail. Gatineau (Qc) : Environnement Canada, Division de l'évaluation écologique.

Environnement Canada. 2009. Guidance for Conducting Ecological Assessments under CEPA, 1999, Science Resource Technical Series, Technical Guidance Module: Mega Flush Consumer Release Scenario. Document de travail. Gatineau (Qc) : Environnement Canada, Division de l'évaluation écologique.

Environnement Canada. 2010a. Données sur les substances du lot 12 recueillies en vertu de l'article 71 de la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)*. Données recueillies par Environnement Canada, Division de la mobilisation et de l'élaboration des programmes.

Environnement Canada. 2010b. Assumptions, limitations and uncertainties of the Mass Flow Tool for OMSSA, CAS RN 68937-51-9. Document provisoire interne. Gatineau (Qc) : Environnement Canada, Division de l'évaluation écologique.

Environnement Canada. 2010c. IGETA Report: CAS RN 68937-51-9, 2010-08-25. Rapport inédit. Gatineau (Qc) : Environnement Canada, Division de l'évaluation écologique.

Environnement Canada. 2010d. Mega Flush Report: CAS RN 68937-51-9, 2010-08-25. Version 2.1.1. Rapport inédit. Gatineau (Qc) : Environnement Canada, Division de l'évaluation écologique.

Environnement Canada, Santé Canada. 2000. Liste des substances d'intérêt prioritaire – Rapport d'évaluation : Particules inhalables de 10 microns ou moins. Ottawa (Ont.) : Environnement Canada et Santé Canada. Accès : <http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/En40-215-47F.pdf>

Environnement Canada, Santé Canada. 2008. Évaluation préalable pour le Défi concernant l'octaméthylcyclotétrasiloxane (D4), n° CAS 556-67-2. Ottawa (Ont.) : Environnement Canada, Santé Canada. 85 p. Accès : http://www.ec.gc.ca/ese-ees/2481B508-1760-4878-9B8A-270EEE8B7DA4/batch2_556-67-2_fr.pdf

[ESIS] European Chemical Substances Information System [base de données en ligne]. c1995-2009. Bureau Européen des Substances Chimiques (BESC). Accès : <http://ecb.jrc.it/esis> [consultée en octobre 2010].

Exley, C. 1998. Silicon in life: A bioinorganic solution to bioorganic essentiality. *J. Inorg. Biochem.* 69:139-144.

[FS] Fiche signalétique. 2007. CAB-O-SIL™TG-C413, Silicon Dioxide, Synthetic Amorphous Silica, CAS RN 68909-20-6. Billerica (MA) : Cabot Corp.

[FS] Fiche signalétique. 2008. CAB-O-SIL®TS-720, TS-720D, Silicon Dioxide, Synthetic Amorphous Silica, Pyrogenic (Fumed) Amorphous Silica, CAS RN 67762-90-7. Billerica (MA) : Cabot Corp.

[FS] Fiche signalétique. 2010. HDK®H20, Hydrophobic pyrogenic silica, CAS RN 68611-44-9. Adrian (MI) : Wacker Chemical Corp.

Heppleston, A.G. 1969. The fibrogenic action of silica. *Br. Med. Bull.* 25(3):282-287.

IUCLID Data Set [en ligne]. 2000. Silane, dichlorodimethyl, reaction products with silica. N° CAS 68611-44-9. Commission européenne, Bureau Européen des Substances Chimiques. 30 p. Accès : <http://ecb.jrc.ec.europa.eu/IUCLID-DataSheets/68611449.pdf>

IUCLID Data Set [en ligne]. 2002. Silane, dichlorodimethyl-, reaction products with silica. N° CAS 68611-44-9. 's-Hertogenbosch (Pays-Bas) : NOTOX Safety and Environmental Research B.V. 60 p. Accès : <http://www.epa.gov/hpv/pubs/summaries/slndichl/c14020.pdf> [consulté le 5 novembre 2010].

[Kirk-Othmer] Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology [en ligne]. c2010a. Silica, amorphous. Hoboken (NJ) : John Wiley & Sons, Inc. 33 p. Accès : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471238961.0113151823010404.a01.pub2/pdf> [consulté en octobre 2010].

[Kirk-Othmer] Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology [en ligne]. c2010b. Rubber compounding. Vol 21. Hoboken (NJ) : John Wiley & Sons, Inc. 58 p. Accès : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471238961.1821020211120914.a01.pub2/pdf> [consulté en octobre 2010].

Langer, S.H., Connell, S., Wender, I. 1958. Preparation and properties of trimethylsilyl ethers and related compounds. *J. Org. Chem.* 23(1):50-58.

Lide, D.R. (éd.) 2007-2008. CRC handbook of chemistry and physics [en ligne]. 88^e éd. CRC Press. Accès : http://www.ebook3000.com/CRC-Handbook-of-Chemistry-and-Physics--88th-Edition_9410.html

Markert, B. 1994. The biological system of the elements (BSE) for terrestrial plants (Glycophytes). *Sci. Total Environ.* 155:221-228.

Martin, K.R. 2007. The chemistry of silica and its potential health benefits. *J. Nutr. Health Aging* 11(2):94-98.

[NCI] National Chemical Inventories [base de données sur CD-ROM]. 2007. Issue 1. Columbus (OH) : American Chemical Society. Accès : <http://www.cas.org/products/cd/nci/index.html> [consultée en août 2007].

[NOTOX] NOTOX Safety and Environmental Research B.V. 2002. HPV assessment report on silane, dichlorodimethyl-, reaction products with silica, CAS No. 68611-44-9 [en ligne]. Hertogenbosch (Pays-Bas) : NOTOX Safety and Environmental Research B.V. [rapport préparé dans le but d'être soumis en vertu du US-HPV Challenge Program]. 14 p. Accès : <http://www.epa.gov/hpv/pubs/summaries/slndichl/c14020.pdf> [consulté le 5 novembre 2010].

[OCDE] Organisation de coopération et de développement économiques. 2004. Soluble silicates, Silicic acid, sodium salt: 1344-09-8, Silicic acid (H₂SiO₃), disodium salt: 6834-92-0, Silicic acid (H₂SiO₃), disodium salt, pentahydrate: 10213-79-3, Silicic acid (H₂SiO₃), disodium salt, nonahydrate: 13517-24-3, Silicic acid, potassium salt: 1312-76-1 [en ligne]. SIDS initial assessment report for SIAM 18. Genève

(Suisse) : Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Accès : <http://www.chem.unep.ch/irptc/sids/OECDSEIDS/SolubleSilicates.pdf> [consulté en octobre 2010].

Schlekat, C.E., McGeer, J.C., Blust, R., Borgmann, U., Brix, K.V., Bury, N., Couillard, Y., Dwyer, R.L., Luoma, S.N., Robertson, S., *et al.* 2007. Bioaccumulation; hazard identification of metals and inorganic metal substances. *In* : Adams, W.J., Chapman, P.M. (éd). Assessing the hazard of metals and inorganic metal substances in aquatic and terrestrial systems. Pensacola (FL) : SETAC Publications, CRC Press. Chapitre 4, p. 55-87.

Schwarz, J.A., Contescu, C.I., Putyera, K., éd. 2004. Dekker encyclopedia of nanoscience and nanotechnology. London (Angleterre) : CRC Press Taylor and Francis Group. 4014 p.

Sparks, J.P., Chandra, S., Derry, L., Parthasarathy, M.V., Daugherty, C., Giffin, R. 2010. Subcellular localization of silicon and germanium in grass root and leaf tissues by SIMS: evidence for differential and active transport. *Biogeochemistry* [en ligne]. Accès : <http://www.springerlink.com/content/0j7850204155470p/fulltext.pdf>

Tripp, C.P., Hair, M.L. 1995. Reaction of methylsilanols with hydrated silica surfaces: the hydrolysis of trichloro-, dichloro-, and monochloromethylsilanes and the effects of curing. *Langmuir* 11(1):149-55.

[USEPA] U.S. Environmental Protection Agency. 2009. High Production Volume Information System (HPVIS) [en ligne]. Washington (DC) : USEPA, Office of Pollution Prevention and Toxics. Accès : <http://www.epa.gov/hpvis/index.html> [consulté le 18 novembre 2010].

Van Hoecke, K., De Schamphelaere, K.A., Van der Meeren, P., Lucas, S., Janssen, C.R. 2008. Ecotoxicity of silica nanoparticles to the green alga *Pseudokirchneriella subcapitata*: importance of surface area. *Environ. Toxicol. Chem.* 27(9):1948-57.

Villota, R., Hawkes, J.G. Food applications and the toxicological and nutritional implications of amorphous silicon dioxide. *Crit. Rev. Food. Sci. and Nutr.* 23(4):289-321.

Walker, P. 1998. Chambers Science and Technology Dictionary. Londres (Angleterre) : Chambers Harrap Publishers.