

Les neiges de l'Arctique contaminées par le mercure



Du vif-argent dans la fourrure des ours blancs

Les neiges de l'Arctique contaminées par le mercure

200 À 300 TONNES DE MERCURE GAZEUX ÉMIS PAR NOS INDUSTRIES sont déposées chaque année aux pôles via la circulation atmosphérique et océanique. Cet apport contamine les chaînes alimentaires jusqu'aux Inuit qui présentent un taux de mercure alarmant.



L'air du pôle Nord est-il si pur ? Si éloignées soient-elles des grands centres industriels, les régions polaires ne sont pas à l'abri de l'influence des activités humaines polluantes. Le

cas du mercure est exemplaire. Prenons la grande île du Groenland, située à des milliers de kilomètres des grands centres industriels chimiques ou miniers, des principaux sites de combustion de combustibles fossiles comme le charbon, des incinérateurs, des sites de prospection de l'or et de toute activité émettrice de grande quantité de mercure. On y décèle les preuves d'une contamination au mercure ! Une équipe danoise a découvert que les concentrations de ce métal dans la fourrure des ours polaires sont aujourd'hui au moins 10 fois supérieures à celles mesurées sur des peaux d'animaux tués avant l'ère industrielle et conservés dans les collections de musées d'Histoire naturelle.

Pour comprendre cette situation, il faut se pencher un peu sur la nature du mercure, de ses différentes formes et des processus

chimiques auxquels il participe. Il s'agit d'un composé qui peut être rejeté sous forme ionique dissoute dans l'eau mais qui est également émis sous forme gazeuse dans l'atmosphère et 200 à 300 tonnes de mercure transitent chaque année

jusqu'aux régions polaires via la circulation océanique mondiale et les courants atmosphériques. Les conséquences sur les écosystèmes arctiques sont préoccupantes en raison de sa faculté de bioaccumulation qui permet l'augmentation des quantités de mercure stockées dans les tissus des animaux tout au long de la chaîne alimentaire. Ainsi les organismes de fin de chaîne, les superprédateurs comme les ours, mais également les phoques, les bélugas et les narvals, des oiseaux et des poissons sont-ils durement touchés. Et les peuples indigènes de l'Arctique comme les Inuit, qui se nourrissent du produit de leur chasse et de leur pêche, sont exposés à de fortes concentrations de mercure au travers de leur alimentation. Sans envisager des conséquences aussi dramatiques que la catastrophe de Minamata au Japon (entre 1949 et 1968, les rejets

LE MANTEAU NEIGEUX, UN RÉACTEUR CHIMIQUE.

Une fois déposé sur la neige, le mercure subit des réactions de photoréduction qui favorisent, selon les conditions de température ou d'irradiation, soit la réémission soit le stockage du mercure gazeux.



CATHERINE LAROSE

CHRISTOPHE FERRARI

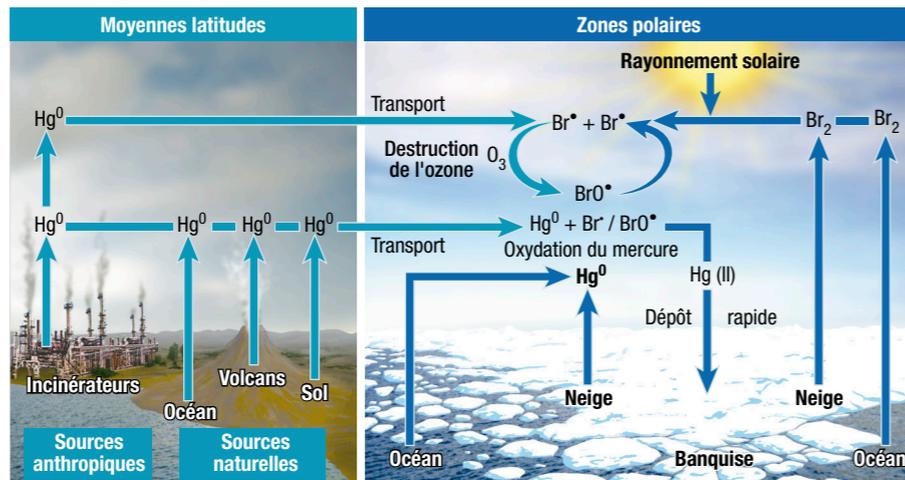
Membre de l'Institut universitaire de France et professeur à l'Université Joseph-Fourier de Grenoble, il est spécialiste de la pollution des zones polaires. Il est membre du comité d'experts du Cercle Polaire.



STAFFAN WIDSTRAND

PLUIE DE MERCURE.

Au printemps, le mercure gazeux (Hg^0) est oxydé par le brome (Br) et se transforme en mercure divalent ($Hg(II)$) qui se déverse en pluie sur le manteau neigeux.



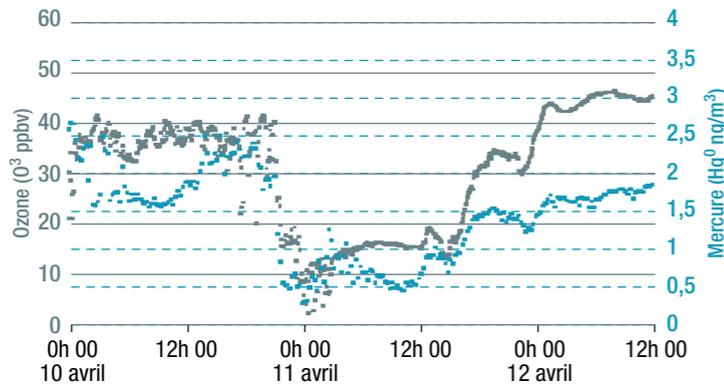
de mercure d'une usine pétrochimique avaient sévèrement intoxiqué près de 2 millions de personnes, dont 900 périrent des effets du mercure sur le système nerveux), les peuples indigènes de l'Arctique vont bientôt devoir faire face à de graves problèmes de santé publique. Bien des points obscurs subsistent quant à l'explication de la manière dont le mercure atmosphérique pénètre dans la chaîne alimentaire des régions polaires. De nombreuses équipes de recherche travaillent sur cette question. Au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement de Grenoble (LGGE) en France, nous nous sommes intéressés aux milieux dits « gelés », à savoir les manteaux neigeux et la glace qui recouvrent une grande partie des régions polaires. Ces milieux nous

amènent à envisager la neige sous trois aspects: la neige comme lieu de dépôt et de réactivité chimique des espèces mercurielles (les différentes formes chimiques du mercure), la neige comme lieu de vie abritant une grande variété d'organismes microscopiques, et la neige comme lieu de mémoire dû à l'accumulation des couches de neiges sur de longues périodes de temps.

La contamination de la faune polaire est un fait bien établi

Les espèces mercurielles se retrouvent dans la neige par plusieurs processus. Tout d'abord par dépôt humide, via les précipitations neigeuses elles-mêmes. Lors de la formation du flocon dans le nuage, le mercure divalent (forme oxydée du mercure qui a cédé 2 électrons) présent dans le nuage, qu'il soit fixé par adsorption aux poussières ou qu'il soit sous forme gazeuse, peut se retrouver intégré au flocon en croissance. Lors de sa chute, le flocon de neige peut accrocher à sa surface du mercure divalent présent dans l'atmosphère, par lessivage atmosphérique. Cette voie s'appelle le dépôt humide, par référence à la précipitation d'eau, même si en l'occurrence la neige est de l'eau sous forme solide.

Un deuxième type de dépôt, le dépôt sec, consiste en une sédimentation des particules atmosphériques sur lesquelles s'est fixé le mercure divalent. En l'absence de vent, les particules vont lentement tomber sur les surfaces de neige sous l'effet de leur propre poids. La quantité de mercure déposé par dépôt sec est



VARIATIONS CONJOINTES D'OZONE ET DE MERCURE.

Enregistrées au nord du Québec en 2002, la chute de concentration en mercure dans l'atmosphère (en bleu) et celle de la concentration en ozone (en gris) sont simultanées.

minoritaire en comparaison avec celle qui tombe par dépôt humide.

Un troisième type de dépôt est le dépôt accéléré lié aux pluies de mercure. Elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours, et ont été observées pour la première fois à Alert dans l'Arctique canadien par William Schroeder et son équipe de l'agence gouvernementale Environnement Canada (Toronto) en 1995. Les chutes brutales des concentrations de mercure élémentaire gazeux dans l'atmosphère (de 1,5 à 0,1 ng/m^3 en une dizaine de minutes) s'accompagnent d'un dépôt rapide de mercure divalent sur la surface de la neige. Les concentrations de mercure divalent dans la neige de surface peuvent être multipliées par un facteur 100, voire plus, en quelques heures. Ce phénomène rapide dépose dans certaines régions polaires des quantités impressionnantes de mercure sur les surfaces de neige. Certains auteurs avancent les chiffres de plusieurs centaines de tonnes par an pour ces zones reculées. La neige reçoit donc de l'atmosphère une contribution importante qui pourra de cette manière s'accumuler tout au long du printemps. Le mercure ainsi déposé reste-t-il inerte dans la neige en attendant la fonte? Une réponse positive à cette question permettrait de comprendre comment les écosystèmes polaires sont contaminés via la fonte de la neige pendant l'été.

Mais le mercure ne reste pas inerte dans la couche superficielle de neige. Une fois déposé, il subit des transformations chimiques provoquées par les rayons du Soleil. Le printemps polaire voit dans la plupart des régions une exposition permanente à la lumière, jour et nuit. Par des processus de photoréduction, le mercure est transformé en mercure élémentaire gazeux qui peut alors retourner dans l'atmosphère. Les rayons du Soleil sont à ce moment de l'année suffisamment puissants pour permettre cette réémission du mercure dans l'air. À l'intérieur du manteau neigeux, dans les espaces d'air entre les grains, les espèces mercurielles peuvent alors être très réactives. Par exemple, il est fréquent de mesurer dans l'air piégé à 30-40 cm de profondeur des concentrations en mercure élémentaire gazeux plus élevées qu'en surface, ce qui prouve que

DU MERCURE À 1 M DE PROFONDEUR!

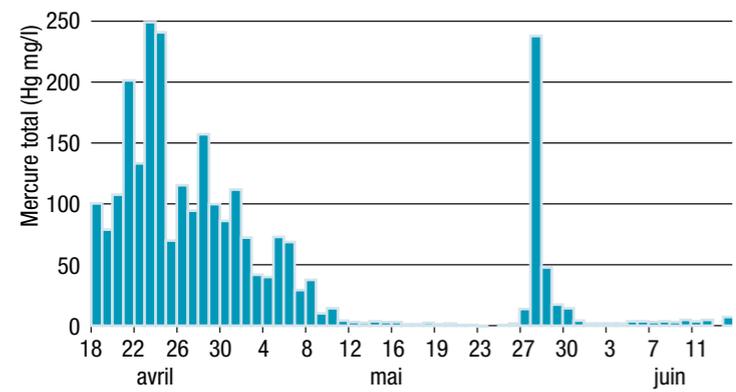
L'analyse des prélèvements effectués dans le couvert neigeux du glacier Kongsvergen au Spitzberg montre que le mercure est piégé dans le névé, la neige tassée du glacier.

XAVIER FAIN/LGGE-CNRS



GERARD BODINEAU

BAIE DU ROI, SPITZBERG.
 La fonte du glacier du Roi (Kongsvergen), qui borde le massif des Trois Couronnes, tend à s'accélérer ce qui remet en circulation le mercure piégé.



DEUX PICS ANNUELS À NY-ÅLESUND.

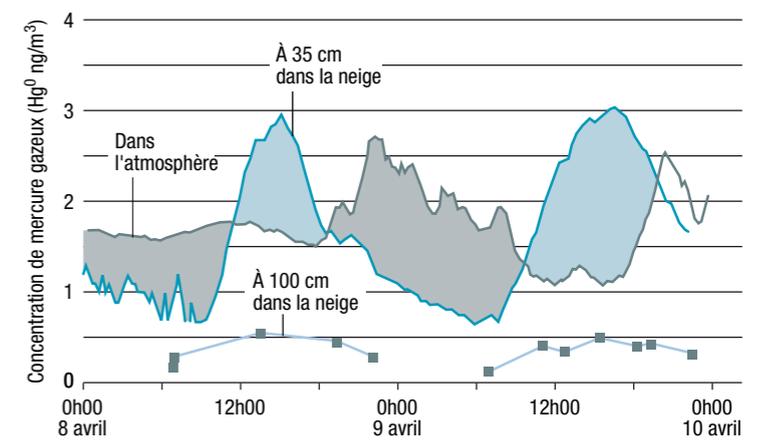
Le programme Chimerpole, financé par l'institut polaire français (Ipev), a permis de suivre l'évolution des teneurs en mercure divalent de la neige à Ny-Ålesund (Svalbard) au cours du printemps 2007.

Les deux épisodes de pluie de mercure en avril et en mai ont déposé jusqu'à 250 mg de mercure, rapidement réémis sous forme gazeuse vers l'atmosphère. En dehors de ces pluies de mercure, la teneur reste très faible et varie peu.

la neige produit du mercure élémentaire gazeux. Le manteau neigeux est ainsi une source d'émission de mercure. Dans certains cas, c'est l'inverse : les teneurs en mercure élémentaire gazeux sont plus faibles dans l'air piégé dans la neige qu'à l'extérieur. Dans ce cas, le manteau neigeux devient un puits : il stocke le mercure. Au travers de ces deux cas, que l'on rencontre aussi bien dans les neiges côtières que dans celles des glaciers à l'intérieur des terres, au Groenland comme dans l'archipel du Svalbard, on voit que le manteau neigeux se comporte comme un poumon avec sa propre respiration. Il est capable d'émettre comme de stocker le mercure gazeux. Tout dépend des conditions environnementales : les températures de l'air et de la neige, l'intensité de l'irradiation solaire, la composition chimique de la neige. Ainsi, les pluies de mercure ne sont-elles observées que lorsque la température descend au-dessous de -10 à -15 °C, température limite pour activer la production par l'océan de brome sous forme gazeuse qui, sous l'effet du rayon-

nement solaire, oxyde le mercure gazeux en mercure divalent qui précipite alors brutalement.

La neige polaire n'est pas seulement un réacteur chimique. Elle contient des micro-organismes (bactéries, levures, champignons...) qui se sont adaptés aux conditions de vie difficiles (températures négatives, pauvreté du milieu en nutriments). Ces organismes sont capables non seulement de vivre, mais également de se développer à des températures situées au-dessous de 0 °C. Le nombre de bactéries mesuré dans ces neiges peut atteindre 10 000 par millilitre de neige fondue. Ces micro-organismes peuvent se développer et se multiplier très rapidement lors de la fonte du manteau neigeux et leurs colonies peuvent croître de manière explosive. En 2004, au Spitzberg, principale île de l'archipel du Svalbard, nous avons collecté et isolé certaines de ces bactéries et levures. De retour au laboratoire, nous les avons fait croître dans



PUITS OU SOURCE DE MERCURE ?

La concentration de mercure gazeux (Hg⁰) contenu dans l'air piégé dans la couche de neige n'est pas constante : lorsque la teneur en mercure de l'atmosphère (courbe grise) est supérieure à celle de la couche superficielle de neige (courbe bleue), la neige se comporte comme un puits et absorbe le mercure ; quand les deux courbes sont inversées, la neige fonctionne alors comme une source et libère du mercure gazeux dans l'atmosphère.



FORTE DU MANTEAU NEIGEUX.

En un mois et demi, l'épaisse couche de neige qui couvre le site d'étude fin avril (en haut) a pratiquement disparu à la mi-juin (en bas), déversant dans le fjord le mercure qu'elle contenait.



XAVIER FAIN/LGGE-CNRS

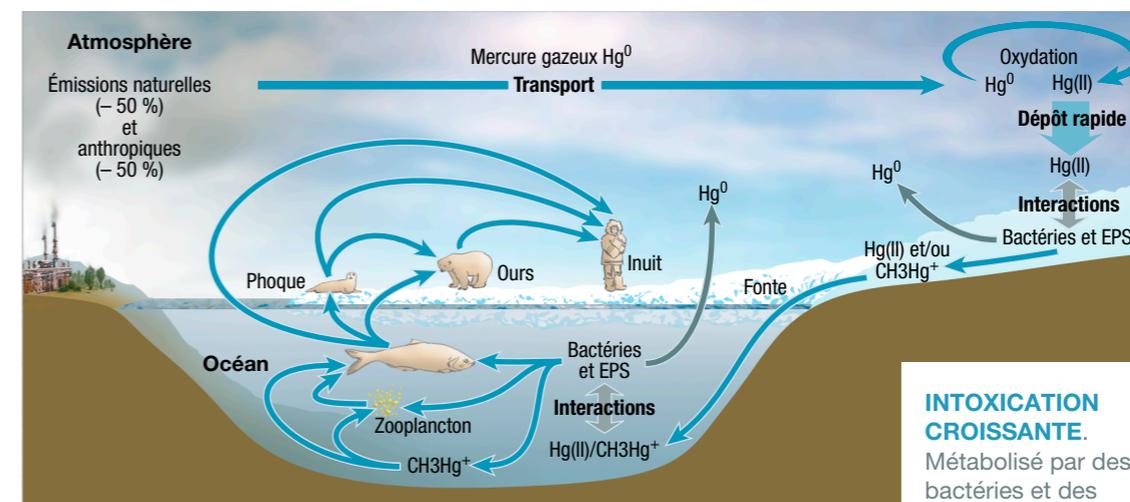
l'eau n'est pas fortement chargée mais nous avons observé, aussi bien dans la neige de fonte que dans les eaux du fjord voisin, un pic de la concentration de méthyl-mercure début juin, avec des valeurs deux fois plus élevées que

celles enregistrées sur le reste de la période printanière. Bien qu'on ne puisse parler d'une entrée massive de mercure, ce pic montre qu'un processus différent agit à cette période, processus qu'il nous reste à identifier... Les micro-organismes polaires n'ont pas fini de nous réserver des surprises. En effet, certains ont la capacité de générer des exopolysaccharides, de longues chaînes de sucres naturels exposés sur la face externe de leur membrane cellulaire pour se protéger des conditions difficiles. Or ces sucres sont retrouvés à de fortes concentrations dans les glaces de mer et vont donc, à la fonte, se diffuser dans les écosystèmes marins. Nous avons montré en laboratoire que ces sucres sont de vraies éponges à mercure : ils le captent et le

des milieux de culture adaptés et avons ajouté du mercure à des concentrations proches de celles trouvées dans les neiges étudiées. Quelle ne fut pas notre surprise de constater que ces micro-organismes interagissaient avec le mercure à ces fortes concentrations, soit pour l'éliminer par un mécanisme de détoxification, soit au contraire pour le transformer en méthyl-mercure, une des espèces mercurielles toxiques. Ces bactéries et levures auraient donc la faculté de produire ce poison et de le libérer dans le milieu. Si cela a bien été observé en laboratoire, notre campagne de terrain au printemps 2007 au Spitzberg avait pour objectif d'examiner si à la fonte, l'eau de ruissellement était fortement chargée en méthyl-mercure. Nos premiers résultats montrent que

piègent. Notons que, comme les micro-organismes, ils sont la nourriture des premiers maillons hétérotrophes de la chaîne alimentaire, à savoir le microzooplancton dinoflagellés et ciliés principalement. Le phytoplancton et les algues des glaces, eux, absorbent directement le mercure à la fois sous sa forme divalente dissoute dans l'eau et sous sa forme méthylée libérée par les micro-organismes. Les micro-organismes et leurs activités à la fonte pourraient donc constituer cette fameuse porte d'entrée dans les chaînes alimentaires arctiques tant recherchée...

mais une d'entre elles nous intéresse tout particulièrement : les glaces des calottes polaires. Elles ont piégé, au cours des centaines de milliers d'années nécessaires à leur lente formation, les gaz contenus dans l'atmosphère au moment de la chute de neige. Si l'on réussit à mesurer le mercure gazeux contenu dans un échantillon de glace ancienne, il devient possible d'estimer la quantité de mercure gazeux présente dans l'air à différentes époques passées et d'en déduire si les concentrations actuellement mesurées dans les écosystèmes polaires diffèrent. En clair, il s'agit de savoir



Une fois le méthyl-mercure incorporé dans les chaînes alimentaires, il se bio-accumule dans les différents maillons, chaque animal en ingérant une quantité qui dépend de sa nourriture (phytoplancton ou algue, zooplancton, proie phytophage ou prédatrice) jusqu'à atteindre des niveaux de concentration très élevés chez les poissons prédateurs, les phoques et les ours polaires. Ces superprédateurs sont eux-mêmes consommés par les populations Inuit du Groenland qui présentent des taux de mercure de 7 à 8 fois plus élevés que ceux relevés chez leurs voisins européens danois, norvégiens et suédois.

Une pollution récente ?

L'état actuel des recherches sur le mercure dans les régions polaires nous amène à considérer le problème dans le temps. Que se passait-il avant ? Et que se passera-t-il demain ? Il existe de nombreuses formes d'archives du passé, comme les sédiments et les coraux,

dans quelle mesure nos activités industrielles polluantes sont responsables de la contamination au mercure des glaces de l'Arctique. Mesurer la teneur en mercure dans les bulles d'air piégées dans les glaces est une véritable prouesse technologique : il faut d'abord extraire le mercure contenu dans la glace, puis parvenir à mesurer l'infime quantité présente dans cet air fossilisé. C'est là une voie de nos recherches actuelles. Nous avons déjà réussi à remonter en partie dans le passé, grâce à la mesure d'air aspiré à des profondeurs d'une centaine de mètres dans la calotte à Summit au centre du Groenland. L'air a été aspiré jusqu'à 80 mètres de profondeur sous la surface, dans ce que l'on appelle le névé. Au-delà de cette profondeur, l'air est enfermé dans la glace, piégé sous forme de bulles d'air, et il faut donc l'en extraire. Notre mission de décembre 2008-janvier 2009 à Dôme C, en Antarctique, nous a permis de

INTOXICATION CROISSANTE.

Métabolisé par des bactéries et des levures, le mercure, transformé en méthyl-mercure hautement toxique, s'accumule aux différents échelons de la chaîne alimentaire. À l'extrémité de la chaîne trophique, l'ours polaire et les Inuit présentent des taux de mercure anormalement élevés.



ALAN LE TRESSOLER/PEV

CHUTE DU TAUX DE MERCURE.

En comparant les eau de fonte actuelle du Svalbard avec des prélèvements effectués en profondeur dans les glaciers du Groenland, les chercheurs du LGGE ont montré que le taux de mercure avait baissé de moitié depuis 1980.

prélever des échantillons jusqu'à 60 m de profondeur dans le névé et d'obtenir des données concernant l'évolution récente du mercure atmosphérique pour l'hémisphère Sud. Les tout premiers résultats, à partir des données obtenues pour le névé, nous permettent de retracer l'évolution des concentrations atmosphériques depuis les soixante dernières années. Ainsi les concentrations présentes dans l'air n'ont pas cessé d'augmenter jusqu'aux années 1970 où elles ont atteint leur maximum. Depuis, en raison de nombreux efforts pour limiter les émissions humaines de mercure, elles ont chuté d'un facteur 2. Notre prochain objectif sera d'examiner l'évolution des niveaux atmosphériques bien avant l'ère

industrielle afin de quantifier précisément l'influence de l'homme sur les quantités de mercure mobilisées vers l'atmosphère. Quant aux futures concentrations atmosphériques, la question se pose de savoir si elles vont encore décroître. Pour le déterminer, il faut d'abord disposer de points de comparaison en dehors de la présence de l'homme et de ses activités émettrices de mercure. C'est pourquoi nous examinons dans un premier temps le passé pour mieux asseoir nos prévisions sur les évolutions futures.

Quoi qu'il en soit, un problème de taille se pose déjà : l'industrialisation rapide de pays comme la Chine et l'Inde, qui consomment des quantités importantes de charbon, lequel dégage

du mercure lors de sa combustion. Il y a fort à parier que la décroissance amorcée ne sera que de faible durée et que les apports de mercure vers l'atmosphère et les régions polaires vont regagner en intensité. Ce grave problème de pollution montre à quel point les écosystèmes polaires sont fragiles et sensibles aux agressions provenant des pays industrialisés. L'origine humaine des émissions de mercure semble être de plus en plus claire dans cette contamination et montre, si cela était encore nécessaire, qu'il n'existe aucun endroit en lien avec l'atmosphère qui ne subisse l'influence de l'homme. ■

Écrit avec la collaboration d'Aurélien Dommergue, maître de conférences au Polytech' Grenoble (Université Joseph-Fourier), Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE).

Pour en savoir plus

■ « Étude des échanges en mercure entre atmosphère et manteau neigeux saisonnier. Spéciation du mercure dans les neiges et glaces polaires et alpines et étude des flux de dépôt et d'émission », d'A. Dommergue, thèse de l'Université Joseph-Fourier, Grenoble, soutenue le 2 octobre 2003
■ « Pluie de mercure sur l'Arctique », de C. Ferrari (*in* « La Recherche », n° 381, décembre 2004)
■ « Fast depletion of elemental gaseous mercury in the Kongsvegen Glacier snowpack in Svalbard », de X. Fain, C. Ferrari *et al.* (*in* « Geographical Research Letters », vol. 33, n° 6, 2006)

Les neiges de l'Arctique contaminées par le mercure



www.lecerclepolaire.com