

Les armes chimiques sous les mers

Ou les mers à la moutarde

Par Élise Guerrero

Introduction

Après les Première et Seconde Guerres mondiales, d'immenses quantités d'armes chimiques ont été jetées dans les mers du globe. Les problématiques liées à ce sujet seront explorées, sur la base d'études menées en Europe et au Canada. On observera plus en détails les réactions chimiques et les dangers liés à deux types d'agents chimiques les plus souvent retrouvés sous l'eau. Afin de mieux comprendre les débats qui divisent la communauté scientifique, les gouvernements et les citoyens, on se demandera s'il vaut mieux laisser les armes où elles sont ou les retirer et on observera les aspects positifs et négatifs de ces situations.

Chapitre 1 : Brève historique

La Première Guerre mondiale a parfois été nommée la Grande Guerre chimique, et pour cause : dès 1915, des offensives au gaz sont lancées sur le territoire européen. La première, à Ypres, en Belgique, devra rester dans les mémoires : elle donnera son nom au gaz utilisé (ypérite), aussi appelé « gaz moutarde » à cause de son odeur. Durant cette guerre, on dénombre près de 900 000 morts dus à ce produit chimique. (Curry, 2016).

Durant la Seconde Guerre mondiale, l'URSS, l'Allemagne, les États-Unis, le Japon et le Canada ont tous produit de grandes quantités d'armes chimiques, quoique ces agents n'aient pas été utilisés sur le champ de bataille (Chemsea, 2016; Henriet et Missiaen, 2015). Parmi ces agents chimiques, l'ypérite figure parmi les plus importants en terme de production (40% de la production allemande entre 1935 et 1945); mais de nombreux autres sont également mis au point et produits massivement (Chemsea, 2016). Au cours de la Seconde Guerre mondiale et pendant la guerre froide, les grandes puissances mondiales mènent une course à l'armement chimique : c'est à qui développera la toxine la plus efficace le plus rapidement. Durant cette période, le III^e Reich, les États-Unis et l'URSS s'affrontent secrètement à coup de kidnapping de chimistes afin de développer de nouveaux agents chimiques de guerre ou d'en produire en quantités industrielles dans des usines au nom codé. Une opération de ce genre menée par le gouvernement américain, connue sous le nom d'Opération Paperclip, se déroule de 1945 à 1952. Des scientifiques au service des nazis pendant la Seconde Guerre mondiale sont amenés

aux États-Unis afin que leur expertise dans les domaines des agents chimiques de guerre profite à l'armée américaine (Jacobsen, 2014).

Peu avant la fin de la Seconde Guerre mondiale, le III^e Reich détient de grands stocks d'armes chimiques. Pour éviter que les Alliés les saisissent une fois la guerre terminée, Hitler commande l'opération *Zunft*, ayant pour but de cacher ces agents chimiques de guerre. Excepté quelques accidents, la majorité n'a pas été retrouvée (Riche, 2011). Au Japon s'est déroulée une opération du même genre, pour éviter que les Chinois ne s'approprient les armes chimiques en même temps que le territoire japonais.

À la fin des deux guerres mondiales, d'immenses stocks d'armes chimiques diverses restent encore dans différents pays. Dans le but de décider comment en disposer, les États concernés se réunissent lors de la conférence de Potsdam. Les scientifiques pensent alors que les produits chimiques se désintègreront rapidement dans l'eau sans causer de dommages au milieu marin et le largage dans la mer est jugé la meilleure méthode (et la moins coûteuse) pour se débarrasser des armes chimiques. Les états s'empressent donc de charger leurs cargaisons de produits chimiques à bord de navires et de prendre la route vers les sites de dépôts. Cependant (et de là une première source d'incertitude par rapport à la localisation des munitions immergées), les bateaux dévient souvent largement des routes prévues. En outre, au lieu de les déverser aux endroits prévus, une grande quantité (inconnue) d'armes chimiques sont jetées par-dessus bord, tout au long du trajet. Ces agents chimiques sont contenus dans des barils, des bombes, des ogives de missiles ou parfois des caisses de bois (Curry, 2016). Comme le bois flotte, ces caisses dérivent au gré des courants au lieu de couler directement sur le sol océanique. Certaines boîtes ont été retrouvées sur les côtes suédoises et celles de l'île de Bornholm (HELCOM, 1994). Les produits chimiques ont pu se retrouver au fond des océans d'une autre façon : des bateaux entiers sont coulés, entraînant avec eux leur cargaison d'armes chimiques.

Les principales étendues d'eau concernées par les dépôts d'armes chimiques sont l'océan Atlantique (principalement les côtes canadiennes et américaines), la mer Adriatique, la mer Baltique, la mer Méditerranée et les côtes japonaises et australiennes. Notons que d'autres mers et lacs ont aussi fait office de sites de décharge, et que grand nombre de munitions ont été enfouies dans le sol terrestre (mais ce sujet ne sera pas traité ici).

Chapitre 2 : Le gaz moutarde

Le gaz moutarde, ou ypérite (1-chloro-2-(2-chloroéthylsulfanyl)éthane), n'est pas un gaz à proprement parler. C'est plutôt une substance liquide qui est vaporisée dans l'atmosphère à l'aide d'un dispositif explosif. Notons que chez les substances vésicantes, comme l'ypérite, la forme liquide est beaucoup plus dangereuse que la forme gazeuse – soit les vapeurs qui se dégagent du liquide (Ellison, 2007).

Lorsqu'elle se retrouve au fond des mers, l'ypérite forme des agrégats semi-solides dont la couche extérieure s'hydrolyse, formant une enveloppe composée des sous-produits de l'hydrolyse. Ces sous-produits (Mustard Gas Hydrolysis Products, MGHP en anglais) sont eux-mêmes issus de la dégradation de l'hémimoutarde, c'est-à-dire le produit résultant de la rupture des liens de l'ion sulfonium (Sanserson, 2010). Par la suite, l'hémimoutarde se divise en thiodiglycol (de formule $C_4H_{10}O_2S$) et en acide hydrochlorique (de formule HCl). L'acide chlorhydrique est neutralisé par l'eau de mer. Le thiodiglycol, comme tous les glycols, est très soluble et est beaucoup moins toxique que l'ypérite elle-même (Missiaen, 2017 ; Curry, 2016 ; Helcom, 1994). Comme il disparaît rapidement dans l'eau, les indicateurs que de l'ypérite a été dégradée sur un site sont généralement le 1,4-oxathiane, le 1,4-dithiane et leurs dérivés, d'autres sous-produits de l'hydrolyse (Sanderson, 2010 ; Beldowski, 2017). Ces sous-produits varient selon les conditions du milieu : par exemple, dans la mer Baltique, c'est-à-dire à une température de 2°C et une salinité de 9 à 13 PSU (Practical salinity unit), dans un environnement alternativement anaérobie et aérobie, les sous-produits retrouvés en plus grandes proportions sont le 1,4-dithiane, le 1,4,5-oxadithiepane et le 1,2,5-trithiepane (Beldowski, 2017).

L'hydrolyse, c'est-à-dire la dégradation de l'ypérite par l'eau, peut être ralentie ou modifiée par plusieurs facteurs. Comme le taux de dissolution dans l'eau de l'ypérite est très bas, l'hydrolyse s'effectue à un rythme ralenti (Beldowski, 2017; IARC, 2012). Tout d'abord, certains produits de dégradation forment une coque insoluble autour de l'agrégat d'ypérite, ralentissant l'hydrolyse. Le gaz moutarde, ainsi entouré d'une couche de polymères protectrice, peut prendre jusqu'à des décennies à se dégrader. La composition chimique de cette croûte varie, mais on y retrouve majoritairement des produits issus de la dégradation des épaississants. Les épaississants (insolubles), tels que l'alloprène et le polyméthacrylate de méthyle, qui sont parfois rajoutés à l'ypérite pour réduire sa température de congélation, ont cette propriété de l'empêcher de réagir avec l'eau en formant une enveloppe (Hart, 2000). Celle-ci empêche en outre la diffusion de l'ypérite. (Helcom, 1994 ; Hart, 2000 ; Salerno, 2017). Peuvent aussi être ajoutés des solvants, tels que le chlorobenzène, qui ralentissent l'hydrolyse. Les sous-produits de l'hydrolyse ont eux aussi une très grande longévité dans l'eau de mer (Missiaen, 2017 ; Sanderson, 2010; Hart, 2000).

La température de l'eau influence le taux de dissolution de l'ypérite: plus l'eau est chaude, plus la dissolution est rapide (Helcom, 1994). En outre, la salinité et les courants marins influencent la vitesse de réaction (Helcom, 1994).

Bien que l'agrégat de gaz moutarde, entouré de polymères bien moins dangereux qui le protègent de l'hydrolyse, semble presque inoffensif, grand nombre de facteurs en font un produit très dangereux. Par exemple, la pêche à la drague, en raclant le fond de l'océan, abîme l'enveloppe protectrice de l'agrégat ou le contenant dans lequel l'ypérite est enfermée. L'ypérite peut de nouveau se trouver libérée et intoxiquer des organismes vivants (il en sera traité plus tard). Les agrégats étant attrapés par les filets des pêcheurs, de nombreux incidents ont lieu lorsqu'ils y sont exposés. En outre, l'ypérite adsorbe modérément aux sédiments et autres particules solides en suspension dans l'eau (National Institute of Health, 2017), ce qui a pour effet de permettre son déplacement par l'entremise du mouvement de ces particules dans la colonne d'eau et suivant les courants. Ce phénomène de re-suspension des particules déposées au fond de l'eau est observé lorsque la vitesse du courant dépasse la valeur de la vitesse de friction. La vitesse de friction (u_*) se calcule à partir de la contrainte de cisaillement de l'écoulement d'un fluide, notée τ (la force non-perpendiculaire qui s'exerce sur l'eau s'écoulant au fond de la mer) et de la masse volumique du fluide en question (ρ). La formule se lit comme suit : $u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$. Cette vitesse de friction, donc, indique à partir de quelle valeur limite de vitesse du courant de fond les sédiments se remettent en suspension dans la colonne d'eau, d'où ils sont facilement transportés hors du site et peuvent contaminer d'autres bassins (Chemsea, 2016).

Certaines études démontrent que des cyanobactéries présentes sur les sites de dépôt d'ypérite ont la capacité de dégrader ses sous-produits, et pourraient donc aider à dépolluer les sites (Sanderson, 2010; Medvedeva, 2009). Ces micro-organismes ont particulièrement été étudiés dans la région de la fosse de Bornholm, dans la mer Baltique. Il a été démontré que les micro-organismes résistants aux effets toxiques des sous-produits de l'hydrolyse étaient retrouvés en plus grande concentration dans les eaux profondes des zones de dépôt d'ypérite (40%) qu'à l'extérieur de ces zones (0% à 3%) (Sanderson, 2010). Les espèces retrouvées étaient non seulement capables de tolérer les sous-produits de l'ypérite (notamment le thiodiglycol), contrairement à d'autres micro-organismes, mais avaient la capacité d'en retirer le carbone et l'énergie dont ils avaient besoin et de métaboliser le thiodiglycol à de très basses températures. Parmi les espèces examinées, citons *Achromobacter*, *Pseudomonas* et *Arthrobacter* (Medvedeva, 2009). La possibilité de les utiliser en bioremédiation serait à explorer. Outre ces micro-organismes, la prolifération de la cyanobactérie *Microcystis aeruginosa* a été observée sur les sites où

étaient présents les produits de la dégradation de l'ypérite. La toxicité de cette cyanobactérie est reconnue : elle produit une hépatotoxine (toxine attaquant le foie), la microcystine-LR, qui peut être fatale à nombre d'espèces animales (Musée d'histoire naturelle, 2017; Tatyana, 2017; Hemansky et al, 1990).

L'ypérite non dégradée a la propriété de pénétrer les cellules d'organismes vivants rapidement. Les molécules entrent en contact avec les molécules de l'ADN et de l'ARN, ainsi qu'avec des protéines reliées à différentes fonctions (Sanderson, 2010). À ce contact s'effectue une réaction d'alkylation endommageant l'ADN des cellules touchées. En bref, chez les humains comme chez les organismes marins, l'exposition au gaz moutarde cause des dommages génétiques à long terme et accroît les risques de cancers du poumon, de l'œsophage et du larynx (Hart : voir Sallon, 2013 ; IARC, 2012). En outre, l'ypérite est un vésicant, une substance causant des cloques sur la peau. Chez l'humain, les dégâts sont causés au contact avec la peau ou à l'inhalation; c'est pourquoi de nombreux accidents surviennent lorsque des pêcheurs remontent des agrégats d'ypérite dans leurs filets et y sont exposés (Lepick, 1999).

Chapitre 3 : Les produits arséniés

Les produits arséniés (notamment le Clark 1 et 2, l'adamsite, la lewisite, le trihydrure d'arsenic) sont ceux qui ont été jetés au fond de l'eau en plus grande quantité (Greenberg, Sexton et Vearrier, 2014). On se concentrera ici sur la lewisite, un composé huileux qui se dérive en lewisite 1 (2-chlorovinyl)dichlorarsine), lewisite 2 (bis(2-chlorovinyl)chlorarsine) et lewisite 3 (tris(2-chlorovinyl)arsine). La seule différence entre ces trois composés organiques est le nombre de groupements chlorovinyle ($C=C-Cl$) remplaçant les atomes de chlore dans la molécule : la lewisite 1 n'en contient qu'un; la lewisite 2, deux; la lewisite 3, trois. Dans les munitions, plusieurs de ces composés sont parfois mélangés (AFSSAPS, 2010). La lewisite n'est pas hydrosoluble; cependant, elle est rapidement dégradée dans l'eau. Comme elle est liposoluble, son transport dans le corps est facile et elle peut accéder aux cellules et les endommager (Vilensky, 2005). La lewisite cause des mutations génétiques et augmente les risques de cancer; chez les mammifères, elle engendre des aberrations chromosomiques (Trammell, 1992; Watson and Griffin, 1992; Center for Disease Control, 1988; voir Institute of Medicine, 1993). La lewisite est un vésicant, mais les symptômes suite à une exposition sont beaucoup plus rapides que le gaz moutarde (Center for Disease Control, 1988; voir Institute of Medicine, 1993).

La particule la plus dangereuse pour l'environnement marin dans la lewisite est l'arsenic inorganique, tel qu'il est produit par l'hydrolyse. Selon une étude menée dans la mer Baltique (Sanderson, 2010), l'arsenic se retrouve principalement dans la couche supérieure du sédiment, d'où il est susceptible de contaminer les eaux souterraines et les eaux interstitielles (eau infiltrée entre les particules de sédiments du sol marin). L'eau près du fond marin, par contre, ne contiendrait pas de dérivés arséniés, selon cette étude. Comme pour la plupart des composés, la concentration des sous-produits de l'hydrolyse est plus grande lorsqu'on s'approche des sites de décharges majeurs (quoiqu'il soit possible d'en retrouver à plus de 20 kilomètres de ceux-ci). Ces sous-produits de l'hydrolyse sont l'acide chlorydrique, l'oxyde de lewisite et l'acide 2-chloro-vinylarsénieux, et d'autres composés arséniés – aussi toxiques du fait de la présence d'arsenic. L'hydrolyse de la lewisite est rapide; les sous-produits sont donc les seuls indicateurs de la présence de lewisite, entièrement disparue, sur un site. L'acide 2-chloro-vinylarsénieux a en outre une grande longévité (on parle de plusieurs dizaines d'années) (Sanderson, 2010). En milieu alcalin, de l'acétylène (inoffensive dans l'eau) et de l'acide arsénique (aux propriétés toxiques de l'arsenic inorganique) peuvent être produits à partir de l'oxyde de lewisite (Helcom, 1994). Notons que la mer Baltique et l'océan Atlantique, le long de la côte américaine sont des milieux alcalins avec un pH d'environ 8.

En quoi l'arsenic inorganique est-il un danger pour l'environnement? Les organismes vivants sont incapables d'éliminer l'arsenic, et l'accumulent donc dans leur corps tout au long de leur vie. Lorsque les prédateurs se nourrissent d'un grand nombre de petites proies, ils accumulent l'arsenic préalablement accumulé de tous ces organismes. Ainsi la concentration d'arsenic dans ces organismes augmente avec le niveau trophique: c'est le phénomène de bioamplification. Lorsque l'humain, niveau supérieur du réseau trophique, consomme l'animal originaire de la zone contaminée, il consomme l'arsenic accumulé par tous les organismes dont l'animal s'est nourri. C'est pourquoi ces agents chimiques sont dangereux pour la santé humaine même lorsque l'humain n'est pas directement en contact avec eux. L'arsenic inorganique est cancérigène et mutagène (Sanderson, 2010).

Chapitre 4 : Action ou inaction

Après ce bref survol des dangers et des enjeux qu'impliquent les armes chimiques disséminées dans les mers, les océans, les lacs (en Suisse et dans les Grands Lacs, par exemple) et les fleuves, on se demande s'il vaut mieux retirer ces armes ou les laisser où elles sont. D'importants débats divisent la communauté scientifique et les citoyens quant à l'avenir des armes chimiques au fond des mers.

Mais avant même de savoir quoi faire des munitions immergées, il est important de rappeler que la majorité des sites de dépôt ne sont même pas répertoriés. Au Canada, par exemple, on sait que de grandes quantités d'armes gisent le long des côtes de la Nouvelle-Écosse et de Terre-Neuve, mais on sait rarement les quantités véritables et les lieux précis. Peu d'entre eux sont répertoriés sur les cartes ; bien souvent, les zones signalées sont très peu précises, n'ayant pas été enregistrées au moment du dépôt. La navigation dans ces zones est donc très dangereuse, lorsqu'elle n'est pas interdite, particulièrement pour les pêcheurs, qui sont les plus souvent victimes d'accidents à cause des armes chimiques.

Pour quelles raisons voudrait-on récupérer les agents chimiques du fond de l'eau ? Tout d'abord, on sait que les contenants d'agents chimiques se corrodent et fuient, et que la diffusion de ces produits toxiques contamine les êtres vivants. En retirant les munitions de l'eau, donc la source des fuites, on s'assure que l'environnement marin ne sera plus sujet à de constantes fuites chimiques (Katona, 2014 ; Beldowski, 2017). Comme vu plus tôt, des études démontrent que les organismes marins développent des tumeurs et subissent des dommages génétiques (McNeely, 2007; Long, 2016; Noualhat, 2014) en raison de leur exposition à des agents chimiques. Les dommages à l'environnement marin sont également dus aux produits arséniés (lewisite, trihydrure d'arsenic, adamsite, Clark I et Clark II) : comme vu plus tôt, on observe une bioaccumulation qui met même en danger la santé humaine. Encore une fois, éliminer les sources sous-marines d'arsenic préviendrait, à long terme, ce phénomène de bioaccumulation des agents toxiques chez les organismes marins comme chez l'humain.

En plus de la contamination de la chaîne alimentaire, qui représente un contact indirect de l'humain avec les armes chimiques, de nombreux accidents survenus au cours des dernières années prouvent que les agents peuvent plus facilement qu'on le pense se retrouver en contact direct avec l'humain. Des pêcheurs, notamment, rapportent régulièrement amasser dans leurs filets des douilles de munitions chimiques ou des agrégats de gaz moutarde. Le Danemark est le seul pays à offrir une compensation aux pêcheurs victimes rapportant des armes chimiques (Noualhat, 2014). Les ouvriers travaillant sur des projets près de dépôts d'armes chimiques (comme les pipelines Nord Stream ou l'exploitation pétrolière en Nouvelle-Écosse) courent donc de graves risques d'accident au contact des armes chimiques ont également des risques d'accident (Curry, 2016).

Ce qui pousse certains à vouloir retirer les munitions des mers est le manque de données que l'on a sur leurs comportements. On sait que les contenants se corrodent et fuient, mais on ne sait pas à quel rythme, et jusqu'à quand ils garderont enfermés ces agents chimiques. Impossible de savoir quand et

comment seront relâchés dans l'eau les stocks d'armes chimiques pour l'instant à l'abri de leurs coques métalliques. Ajoutons que dans l'éventualité d'un déclenchement soudain d'un explosif contenant des agents chimiques, il serait impossible de connaître l'étendue ni la gravité des dégâts.

Comment ferait-on pour nettoyer les sites de dépôt ? Différentes façons de récupérer les agents chimiques de guerre sont possibles. Certaines comportent des risques d'accident plus importants que d'autres – ces dernières sont souvent plus coûteuses. La technique la plus répandue consiste à incinérer les agents chimiques récupérés comme on le ferait pour d'autres produits chimiques toxiques. On fait brûler dans des fours à très haute température (1400°C) les agents chimiques, ce qui produit des fumées dont on peut capter les particules toxiques grâce à des filtres adaptés (Dessibourg, 2013 ; Lecompte, 2017 ; Sanderson, 2018). Cette méthode requiert des infrastructures coûteuses qui existent en Europe et aux États-Unis, mais pas au Canada (Long, 2018). Ajoutons que tous les agents chimiques ne peuvent être traités de cette manière : l'agent DF, par exemple, se transforme en fluorure d'hydrogène à la suite du traitement thermique, composé qui corroderait fortement l'infrastructure (Dessibourg, 2013). En outre, la lewisite (un composé arsénié) libère de grandes quantités d'arsenic lorsque soumise à ce procédé. Sous forme de vapeurs, elle récupère ses propriétés vésicantes (Lecompte, 2017).

Le fait que l'arsenic ne soit pas éliminé ou transformé par les organismes rend très difficile son traitement une fois les armes arséniées récupérées. Une méthode pour se débarrasser de l'arsenic est le de réintroduire dans une industrie l'utilisant (Beldowski, 2017). Le recyclage des armes chimiques, en les transformant en produits utiles par une suite de réactions, permet également de faire de ces armes destructrices des outils pacifiques (McNeely, 2007; Sanderson, 2018).

Le sarin et l'ypérite sont deux agents chimiques que l'hydrolyse suffit à rendre inoffensifs. L'hydrolyse de l'ypérite produit majoritairement de l'acide chlorhydrique et du thiodiglycol, deux composés peu dangereux et facilement traitables (Dessibourg, 2013). Afin d'accélérer la réaction d'hydrolyse, l'enceinte réactionnelle est chauffée. Cependant, il est impossible de faire réagir complètement le substrat (le sarin ou l'ypérite), comme toute réaction chimique n'est jamais tout à fait complète. Le désavantage majeur de cette méthode est que les sous-produits de l'hydrolyse sont produits en une quantité environ cinq fois supérieure à la quantité initiale (Dessibourg, 2013 ; Lecompte, 2017).

À l'heure actuelle, il est cependant impossible de connaître l'emplacement de tous les sites de dépôt et de dispersion des agents et de naufrages de bateaux renfermant des agents chimiques. La possibilité de retirer des munitions s'adresserait donc aux sites répertoriés uniquement, qui sont peu nombreux.

Même dans l'éventualité où les sites seraient pour la plupart répertoriés, leur nombre immense requerrait des ressources démesurées si l'on voulait tous les nettoyer (Piscitelli, 2014 : voir Euronews, 2014; Beldowski, 2017). Uniquement le long de la côte néo-écossaise, l'estimation s'élève à 1200 sites (McNeely, 2007). Plusieurs experts recommandent, avant toute action concernant les munitions immergées, une meilleure documentation des sites, des risques, du transport et du comportement des produits chimiques dans l'eau (Sanderson, 2018 ; Helcom, 1994 ; Salat, 2004 ; Pratt, 2004 ; Missiaen, 2017).

Pour quelles raisons voudrait-on laisser les agents chimiques au fond de l'eau ? Certains recommandent de laisser les armes chimiques là où elles le sont. Cette option peut sembler étonnante au vu de la toxicité pour l'environnement et de la dangerosité des agents chimiques, mais elle est appliquée dans beaucoup de cas. En effet, comme on l'a vu plus tôt, on connaît mal le comportement des agents chimiques dans l'eau, le rythme de corrosion des contenants et leur état. Tenter de retirer les munitions du fond des mers est donc périlleux : le risque que les caisses se cassent durant l'opération est non-négligeable (Beldowski, 2017; Katona, 2014). Il est possible de mener de façon sécuritaire ce type d'opération, mais le coût en est élevé. Les gouvernements prêts à payer pour réparer ces dégâts sont rares. L'armée canadienne, notamment, est peu disposée à payer pour nettoyer les côtes canadiennes (Long, 2018). Les études menées jusqu'à présent (presque exclusivement européennes) ciblaient surtout le repérage des munitions et la façon de les localiser et peu de preuves existent quant à la véritable toxicité des agents chimiques (Sanderson, 2018). Il faudrait donc commencer par connaître véritablement les dangers et effets des agents chimiques avant d'entreprendre quelque mesure que ce soit pour les retirer. Ce pourrait en effet être une opération dangereuse si l'on est mal renseigné sur les agents chimiques.

Si les contenants se corrodent à un rythme lent, on estime que l'environnement est plus à même de gérer les fuites chimiques, alors que dans l'éventualité d'un relâchement massif de produits toxiques (par exemple, lors d'une opération de récupération des munitions), il est impossible de connaître les réactions et les conséquences sur l'environnement marin (Ungaro, 2014 ; voir Euronews, 2014 ; Katona, 2014). On laisse donc souvent les munitions en espérant que les fuites toxiques soient lentes et en partie assimilées par l'environnement (Beldowski, 2017 ; Sanderson, 2018). Ajoutons qu'un nouvel équilibre écologique a pu s'établir suite à la contamination d'un environnement par des armes chimiques, et qu'il est souvent déconseillé de perturber un équilibre écologique. En effet, ce nouvel équilibre incluant les produits chimiques, retirer ceux-ci serait créer un nouveau déséquilibre majeur dans l'environnement.

Dans certains cas, les animaux marins ont colonisé et utilisé les munitions comme récif où se cacher, chasser et se nourrir, rendant impossible la récupération des armes (Lang, 2016 ; voir Curry, 2016). Le fait que des organismes vivants soient capables d'entretenir un contact aussi rapproché avec des munitions chimiques laisse supposer que leur toxicité ne les affecte pas, qu'ils se sont adaptés à celle-ci ou que les produits ne fuient pas. Il serait en outre impossible d'envisager quelque opération que ce soit sur ces munitions, devenues un refuge pour la vie.

Dans d'autres cas, les sédiments ont recouvert les munitions et formé une croûte au-dessus ou les ont même ensevelies profondément, les prévenant donc de fuir dans l'environnement marin (Beldowski, 2017 ; Katona, 2014). Par contre, les eaux interstitielles sont tout de même contaminées (Sanderson, 2010).

Les solutions prônées dans le cas où les munitions resteraient sur le sol marin sont donc une meilleure documentation des sites, leur cartographie, leur surveillance constante par les scientifiques et l'interdiction partielle ou totale d'activité dans ces zones (Pratt, 2004 ; Beldowski, 2016 : voir Curry, 2016 ; Salat, 2004). C'est ce dernier point qui pose souvent problème : lorsque les sites sont répertoriés, des activités telles que la pêche, la pêche à la drague, l'exploitation pétrolière ou l'installation de pipelines sont encore possibles. Soulignons deux cas particuliers : celui des pipelines Nord Stream et Nord Stream 2, en mer Baltique ; et les permis d'exploration pétrolière près des côtes néo-écossaises.

En mer Baltique, le tracé des pipelines parallèles Nord Stream (complétées en 2013) passe au-dessus de sites de dépôts d'armes chimiques majeurs : la fosse de Gdansk et le bassin de Bornholm (Gazprom, 2016 ; Sanderson, 2018). Cependant, une étude menée tout au long du projet démontre que la suspension de particules toxiques issues de la dégradation des armes chimiques n'était pas plus dangereuse que la présence de ces produits dans l'eau en eux-mêmes. Aucun agent chimique non dégradé n'a été retrouvé dans les échantillons, et la biodiversité ne semblait pas affectée par la présence ou l'absence de munitions chimiques. Notons toutefois que cette étude a été entièrement financée par Nord Stream. Il est possible, lors d'études sur la toxicité des munitions immergées, que les concentrations des produits soient trop faibles pour être détectées par les appareils ou recevables scientifiquement. Comme on ne peut se procurer ou synthétiser d'armes chimiques pour faire des tests en laboratoire et que l'on dépend des produits trouvés en divers états sous la mer, il est très difficile de mener ce genre d'étude, et surtout d'obtenir des résultats constants (Sanderson, 2018).

Quant aux permis de prospection sismique au large de la Nouvelle-Écosse, le dossier a été traité par Myles Kehoe et Michael Ojoleck. Autoriser des travaux sur le sol marin, lorsque celui-ci sert de dépôt

à des munitions chimiques dont on ne connaît pas l'état de dégradation, est potentiellement très dangereux pour l'environnement : lesdits travaux risquent de provoquer la resuspension des sédiments, qui relâchent leurs molécules toxiques (et donc permet leur déplacement vers d'autres zones) ou même de casser les contenants corrodés des armes chimiques. Dans plusieurs des sites connus de dépôts d'armes (comme à Sydney Bight), des permis d'exploration sismique ont été accordés par le département de la Défense nationale et les Forces armées canadiennes à des compagnies pétrolières (Kehoe, 2017). Aucune étude concernant les risques associés à cette activité n'a été menée; il est donc impossible de connaître les conséquences de la prospection sismique sur les sites de dépôt (Défense nationale, 2002).

Quel que soit le sort des munitions immergées, rappelons que les citoyens habitant les régions côtières concernées par la problématique (par exemple, près des côtes néo-écossaise, belge, australienne, suédoise...) sont mis en danger par les dépôts d'armes chimiques à proximité des côtes, souvent dans des zones peu profondes. En mer Baltique, les zones les plus profondes font moins de 500 mètres de profondeur (Curry, 2016). En Belgique, on retrouve des armes à 60 kilomètres des côtes ; en Italie, à quelques centaines de mètres ; au Japon, dans le port même de Kanda (Missiaen, 2004 : voir Salat, 2004 ; Piscitelli, 2014 : voir Euronews, 2014; Noualhat, 2014). Des munitions sont régulièrement retrouvées sur les plages de ces zones ; la plupart des citoyens ne savent pas comment reconnaître ni comment agir face à ces objets, ce qui pose de sérieux problèmes pour la sécurité et la santé humaine (Long, 2018 ; Katona, 2014).

Conclusion

En conclusion, nous avons pu observer les façons dont différents agents chimiques de guerre affectent l'environnement marin. Après avoir vu les dangers que représentent ces armes chimiques gisant au fond des mers de la planète, nous avons pu explorer les pistes de solutions proposées, souvent controversées : faut-il laisser ou retirer les armes chimiques du fond des mers? Parmi les aspects qui n'ont pas été traités, notons le sujet des armes conventionnelles, jugées parfois plus dangereuses et toxiques que les armes chimiques, et les décharges d'armes sur terre, qui contaminent les sols et les humains (Sanderson, 2018; Long, 2018).

Médiagraphie

Livres

AUDOIN-ROUZEAU, BECKER et al., 2010, *Gaz ! Gaz ! Gaz !, La guerre chimique de 1914-1918*, Milan, Éditions 5 continents, 111 pages.

ELLISON, Hank, 2007, *Handbook of Chemical and Biological Warfare Agents, Second Edition*, CRC Press, 800 pages.

IARC WORKING GROUP ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISK TO HUMAN, 2012, *Chemical Agents and Related Occupations*, Lyon, International Agency for Research on Cancer [en ligne]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304425/> (consulté le 8 octobre 2017).

INSTITUTE OF MEDICINE, 1993, *Veterans at Risk: The Health Effects of Mustard Gas and Lewisite*, Washington (DC), National Academies Press (US) [en ligne]. (consulté le 19 décembre 2017) .

JACOBSEN, Annie, 2014, *Operation Paperclip, The secret intelligence program that brought Nazi scientists to America*, New York, Little, Brown and Company, 575 pages.

LEPICK, Olivier, 1999, *Les armes chimiques*, Paris, Presses Universitaires de France, 127 pages.

NOTO, LEBRUN et KY, 1991, *L'Apocalypse chimique*, Paris, Cariscript, 188 pages.

RICHE, Daniel, 2011, *Les armes chimiques et biologiques*, Paris, L'Archipel, 485 pages.

VILENSKY, Joel A., 2005, *Dew of Death: The Story of Lewisite, America's World War I Weapon of Mass Destruction*, Indiana University Press, 240 pages [en ligne]. (consulté le 19 décembre 2017).

Articles

DÉFENSE NATIONALE, « Questions & Answers : Environmental Petition 50 under the Auditor General Act by Myles Kehoe Concerning Ocean Disposal of Chemical and Biological (C/B) Warfare Agents and C/B Munitions », 8 août 2002, pages 1 à 8.

Sites web

INTERNATIONAL DIALOGUE ON UNDERWATER MUNITIONS. International Dialogue on Underwater Munitions [en ligne]. 2017. <http://underwatermunitions.org> (consulté le 17 juin 2017).

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE. Muséum national d'histoire naturelle [en ligne]. 2017. <http://www.mnhn.fr/fr/collections/ensembles-collections/ressources-biologiques-cellules-vivantes-cryoconservees/microalgues-cyanobacteries/microcystis-aeruginosa> (consulté le 19 décembre 2017).

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. U.S. National Library of Medicine, Specialized Information Services, Bis(2-Chloroethyl)sulfide [en ligne]. 2017.

<https://webwiser.nlm.nih.gov/WebWISER/getSubstanceData.do?substanceId=236&displaySubstanceName=Bisbeta-chloroethylsulfide&STCCID=&UNNAID=&selectedDataMenuItemID=75&catId=112> (consulté le 9 octobre 2017).

Articles électroniques

« Dépotoirs militaires au large de la côte atlantique du Canada ». In : Bureau du vérificateur général du Canada [en ligne]. 2 avril 2002. http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/pet_050A_f_28755.html (consulté le 24 juin 2017).

« Pétition de suivi concernant les dépotoirs militaires au large des côtes de l'Atlantique ». In : Bureau du vérificateur général du Canada [en ligne]. 16 février 2004. http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/pet_050B_f_28756.html (consulté le 24 juin 2017).

AGENCE FRANÇAISE DE SÉCURITÉ SANITAIRE DES PRODUITS DE SANTÉ. « Piratox sheet #3 : "Lewisite" ». In : ANSM [en ligne]. 2011, numéro 3.

http://ansm.sante.fr/var/ansm_site/storage/original/application/5fe84c0ccff5503039ff2bb00ba25aba.pdf (consulté le 21 décembre 2017).

BREWER, Peter G. et NAKAYAMA, Noriko. « What Lies Beneath: A Plea for Complete Information ». In: Environmental Science & Technology [en ligne]. 2008, vol. 42, no. 5. <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es087088h> (consulté le 19 juin 2017).

CHEMSEA. « Results from the CHEMSEA project – Chemical MUNITIONS Search and Assessment ». In : International Dialog on Underwater Munitions [en ligne]. 23 janvier 2016. http://underwatermunitions.org//wp-content/uploads/2016/08/CHEMSEA_Findings_24.01.pdf (consulté le 17 juin 2017).

CHRISTENSEN et al. « Acute toxicity of sea-dumped chemical munitions: luminating the environmental toxicity of legacy ». In: Global Security: Health, Science and Policy [en ligne]. 2016,

volume 1.

<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23779497.2016.1219962?scroll=top&needAccess=true>
(consulté le 17 décembre 2017).

COX, Kevin. « DND to hunt for chemical, biological arms dumps ». In : The Globe and Mail [en ligne]. 2009. <https://www.theglobeandmail.com/news/national/dnd-to-hunt-for-chemical-biological-arms-dumps/article18284156/> (consulté le 28 juin 2017).

CURRY, Andrew. « Chemical Weapons Dumped in the Ocean After World War II Could Threaten Waters Worldwide ». In : Smithsonian.com [en ligne]. 11 novembre 2016.
<http://www.smithsonianmag.com/science-nature/decaying-weapons-world-war-II-threaten-waters-worldwide-180961046/> (consulté le 15 juin 2017).

DESSIBOURG, Olivier. « Les options pour éliminer les armes chimiques » In : Le Temps [en ligne]. 2013, <https://www.letemps.ch/monde/2013/11/14/options-eliminer-armes-chimiques> (consulté le 20 août 2017).

EURONEWS. « Les mers européennes, dépotoirs pour les armes chimiques ». In : Euronews [en ligne]. 21 février 2014. <http://fr.euronews.com/2014/02/21/les-mers-europeennes-depotoirs-pour-les-armes-chimiques> (consulté le 14 juin 2017).

GREENBERG, SEXTON et VEARRIER. « Sea-dumped chemical weapons: environmental risk, occupational hazard ». In : NCBI National Center for Biotechnology Information Search database [en ligne]. 2014. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26692048> (consulté le 19 juin 2017).

HELCOM. “Report on Chemical Munitions Dumped in the Baltic Sea. Report to the 16th Meeting of the Helsinki Commission”. [en ligne]. 1994. from: <http://www.helcom.fi/Lists/Publications/Report%20on%20chemical%20munitions%20dumped%20in%20the%20Baltic%20Sea.pdf> (consulté le 20 octobre 2017).

HENRIET, Jean-Pierre, MISSIAEN, Tine. « Chemical munition dump sites in coastal environments : a border-transgressing problem ». [en ligne]. 2015.
https://www.researchgate.net/publication/266498412_Chemical_munition_dump_sites_in_coastal_environments_a_border-transgressing_problem (consulté le 20 août 2017).

HERMANSKY et al. « Microcystin-LR ». In: Pubchem [en ligne]. 1990, pages 279 à 285, <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/r?dbs+hsdb:@term+@rn+@rel+101043-37-2> (consulté le 19 décembre 2017).

HUEBNER, Kermit D. « Arsine Poisoning ». In : Medscape [en ligne]. 2015. <http://emedicine.medscape.com/article/833740-overview> (consulté le 1er juillet 2017).

KATONA, Steve. « Nasty Surprises on the Ocean Floor: Chemical Warfare Agents and Ocean Health » In : Ocean Health Index [en ligne]. 2014. http://www.oceanhealthindex.org/news/Nasty_Surprises_on_the_Ocean_Floor (consulté le 18 décembre 2017).

LECOMTE, Erwan. « Arsenal chimique en Syrie : comment le détruire ? ». In : Sciences Avenir [en ligne]. 2017, https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/materiaux/guerre-en-syrie-comment-detruire-des-armes-chimiques_19757 (consulté le 20 août 2017).

MCNEELY, Joshua. In : Netawek Ikjikum [en ligne]. 2007, vol.3. <http://mapcmaars.ca/theblog/2007/12/military-munitions-dumped-in-coastal-waters-around-the-maritimes/> (consulté le 23 juin 2017).

MEDVEDEVA et al. « Microbial responses to mustard gas dumped in the BalticSea ». In: Marine Environmental Research [en ligne]. 2009, volume 68, numéro 2, pages 71 à 81. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19481794> (consulté le 9 octobre 2017).

NAIMSKI, Laure. « Armes chimiques sous la mer ». In : Arte [en ligne]. 3 mai 2016. <http://future.artetv.fr/armes-chimiques-sous-la-mer> (consulté le 20 octobre 2016).

National Center for Biotechnology Information. « 1,4-Oxathiane ». In : PubChem Compound Database [en ligne]. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1_4-Oxathiane#section=Top (consulté le 19 août 2017).

National Center for Biotechnology Information. « Lewisite oxide ». In : PubChem Compound Database [en ligne]. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5378690#section=Top> (consulté le 19 décembre 2017).

National Center for Biotechnology Information. « Thiodiglycol ». In : PubChem Compound Database [en ligne]. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/thiodiglycol#section=Top> (consulté le 19 août 2017).

Nord Stream 2. <https://www.nord-stream2.com/media/documents/pdf/en/2017/07/nsp2-permitting-brochure-dk-digital-en-2017-06-27.pdf> (consulté le 17 décembre 2017).

NOUALHAT, Laure. « “Armes chimiques”, y a du gaz dans l’eau ». In : Libération [en ligne]. 25 février 2014. http://www.liberation.fr/eclairs/2014/02/24/armes-chimiques-y-a-du-gaz-dans-l-eau_982670, (consulté le 14 juin 2017).

Rosenblatt et al. « Problem Definition Studies on Potential Environmental Pollutants. II. Physical, Chemical Toxicological and Biological Properties of 16 Substances ». In: Toxnet [en ligne]. 1975. <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+6393> (consulté le 20 décembre 2017).

SALAT, Natalie. « Searching For Chemical Warfare Dump ». In : Legion Magazine [en ligne]. 2004. <https://legionmagazine.com/en/2004/11/searching-for-chemical-warfare-dump/> (consulté le 20 décembre 2017).

SALERNO, Alicia. « Évaluation de l’efficacité de dégradation et de décontamination cutanée du CeO₂ vis-à-vis d’un composé organophosphoré, le Paraoxon ». In : HAL [en ligne]. 2017, <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01541051/document> (consulté le 9 octobre 2017).

SALLON, Hélène. « Gaz moutarde, sarin ou VX : des armes chimiques interdites ». In : Le Monde [en ligne]. 2013, http://www.lemonde.fr/international/article/2013/05/01/gaz-moutarde-sarin-ou-vx-des-armes-chimiques-interdites_3168130_3210.html#JtKwW1cAUVDhiui8.99 (consulté le 8 octobre 2017).

SANDERSON et al. “Potential Environmental Risks Associated With Dumped Chemical Warfare Agents (CWA) in the Baltic Sea Very Low According to New Research”. In: Journal of Hazardous Materials [en ligne]. 2012. <https://www.nord-stream.com/press-info/press-releases/potential-environmental-risks-associated-with-dumped-chemical-warfare-agents-cwa-in-the-baltic-sea-very-low-according-to-new-research-399/> (consulté le 17 décembre 2017).

SANDERSON *et al.* « Environmental Hazards of Sea-Dumped Chemical Weapons ». In: Environmental Science & Technology [en ligne]. 2010, vol. 44, no. 12. <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es903472a> (consulté le 19 juin 2017).

SASSER *et al.* « LEWISITE » In : TOXNET [en ligne]. 1989. <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2> (consulté le 19 juillet 2017).

SASSER *et al.* « Toxicology studies on lewisite and sulfur mustard agents: two-generation reproduction study of lewisite in rats; final report. » In : TOXNET [en ligne]. 1989. <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?./temp/~ErIYjf:2> (consulté le 19 juillet 2017).

SWANN *et al.* « BIS(2-CHLOROETHYL)SULFID » In : TOXNET [en ligne]. 1983. <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2> (consulté le 19 juillet 2017).

TATYANA, Zaitseva, MEDVEDEVA, Nadezhda. « Influence des produits d'hydrolyse du gaz moutarde sur le développement des espèces de masse de cyanobactéries ». In : ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ [en ligne]. 2017, numéro 1, pages 70 à 80. <http://ecopri.ru/journal/article.php?id=5942> (consulté le 19 décembre 2017).

VILLEDIEU, Yannick. « L'horreur des armes chimiques ». In : Radio-Canada [en ligne]. 2017. <http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1026935/horreur-armes-chimiques-histoire-guerre-gaz-sarin-nucleaire-syrie-mondiale-destruction-civils-population> (consulté le 28 juin 2017)

Images d'un site internet

Gazprom. Route map of Nord Stream and Nord Stream 2. [Image en ligne]. <http://www.gazprom.com/about/production/projects/pipelines/built/nord-stream2/> (consulté le 19 décembre 2017).

Vidéo

Coen, Koutsikas et Nadler. Armes chimiques sous la mer [Vidéo en ligne]. Nicolas Koutsikas *et al.* ; 16 novembre 2014. 88 minutes. <http://pages.rts.ch/docs/histoire-vivante/6206493-armes-chimiques-sous-la-mer.html> (consulté le 20 août 2017).

Personnes reliées au projet

Myles Kehoe. Envoi de références documentaires et de documents (cartes marines, articles de journaux et autres documents).

Tine Missiaen. 16 juillet 2017 au 25 juillet 2017. Réponses écrites à des questions.

Jacek Beldowski. 28 août 2017 au 13 octobre 2017. Réponses écrites à des questions et envoi de références documentaires.

Nicola Ungaro. 8 octobre 2017 au 18 décembre 2017. Envoi de documents de l'ICRAM (Istituto Central per la Ricerca Scientifica e Tecnologica Applicata al Mare).

Jamie Knill. 15 décembre 2017 au 3 janvier 2018.

Joshua McNeely. 3 janvier 2018. Envoi de documents et réponses écrites à des questions.

Terrance P. Long. 4 janvier 2018. Entretien audiovisuel.

Hans Sanderson. 17 décembre 2017 au 5 janvier 2018. Entretien audiovisuel.

Remerciements

Je tiens à remercier Myles Kehoe, Terrance Long, de l'IDUM, Hans Sanderson, Tine Missiaen, Jacek Beldowski, Jamie Knill et Joshua McNeely de MAARS et Nicola Ungaro pour leur générosité et l'aide qu'ils et elles m'ont apportée.