



LIVRE BLANC

Sur l'impact environnemental dû à la présence ou la destruction de munitions

Par Marceau GUILBAUD



Geode

GLOBAL EOD EXPERTS

« Après une carrière militaire, je me suis engagé dans l'action humanitaire contre les mines puis dans la sécurité physique des stocks d'armes et de munitions et, finalement, dans la réduction des violences armées.

Lors de plusieurs missions, j'ai pu constater que la communauté internationale n'a jamais pris en compte la problématique environnementale d'une pollution pyrotechnique due à la présence de munitions conventionnelles non-explosées ou abandonnées, et des engins explosifs improvisés.

J'ai aussi pu constater que la volonté de dépolluer reposait uniquement sur le risque d'explosion et sur l'évaluation de l'impact socio-économique de cette pollution.

Pourtant, bien qu'il n'existe pas de validation scientifique, il est nécessaire de considérer que plus la dépollution pyrotechnique d'une zone est retardée, plus la probabilité d'un impact sur l'environnement et sur la chaîne alimentaire augmente.

Enfin, le recours systématique à la destruction sur place provoque une pollution localisée du sol qui ne sera pas remédié ultérieurement. Il serait donc nécessaire de prioriser les destructions sur des sites dédiés à cette activité, après stockage temporaire et déplacement vers le site de destruction en fourneau de démolition. Et, de fait, réserver la destruction in-situ aux munitions dangereuses non-déplaçables. »

Marceau Guilbaud
Co-fondateur de Global EOD Experts (GEODE)
Expert en réduction des violences armées

guilbaud.marceau@orange.fr

www.geode.lu

Ce document a été traduit vers l'Anglais par Emma Laplante.

Les photos utilisées dans ce document sont la propriété de l'auteur.

...DE L'IMPORTANCE DE DEPOLLUER RAPIDEMENT LES ZONES POLLUEES PAR MUNITIONS...

Introduction

I – La normalisation

Ce chapitre propose une revue des différents documents normatifs traitant de la dépollution pyrotechnique et de l'obligation de prendre en compte le développement durable.

II – Etat des lieux

Ce chapitre propose, en s'appuyant sur l'exemple du dépôt de munitions de MISURATA (Libye), de définir les risques non pyrotechniques lors d'une pollution par matières explosives due à l'explosion inattendue d'un dépôt de munitions. Les polluants sont principalement des métaux lourds et des molécules chimiques.

III – Impact sanitaire

Ce chapitre propose, au travers d'une revue de sources documentaires disponibles montrant les impacts directs des polluants définis au chapitre précédent sur le cycle de vie et sur la chaîne alimentaire, une évaluation de l'impact sanitaire, à plus ou moins long terme, du fait de l'absence de dépollution et de remédiation des sols.

IV – La dépollution complète

Ce chapitre propose une revue des exigences d'une dépollution totale d'une zone polluée par des matières explosives. Cette dépollution doit prendre en compte le risque pyrotechnique mais aussi être suffisamment profonde pour retirer le maximum des polluants non-pyrotechniques.

V – La remédiation des sols

Ce chapitre propose une revue non exhaustive de méthodes de remédiation des sols les moins coûteuses.

Conclusion

Références

Introduction



Source : dépôt de munitions de Misurata – Libye © marceau Guilbaud

Ce document a pour objectif de démontrer que la dépollution après une explosion accidentelle, mais aussi d'une zone dangereuse confirmée (ZDC) polluée par munitions ou par un engin explosif improvisé (EEI), ne doit pas uniquement prendre en compte le risque pyrotechnique mais aussi l'impact sur l'environnement et sur le vivant en général.

L'explosion accidentelle d'un dépôt de munitions « officiel » peut être causée par un mauvais stockage, un non-respect des règles de sécurisation physique des stocks, un incendie ou par une action extérieure violente telle qu'une action armée, terroriste ou un bombardement aérien.

Des explosions accidentelles peuvent aussi intervenir dans des stockages « non officiels » de munitions, ou dans des zones polluées par des munitions explosives isolées ou regroupées, non explosées, abandonnées ou utilisées comme engins explosifs improvisés.

Small Arms Survey (SAS)¹ définit les explosions accidentelles sur des sites de stockage de munitions (UEMS²) comme des accidents qui ont eu pour résultat, individuellement, des douzaines de victimes et des millions de dollars de dégâts au sein du dépôt même, mais aussi de son environnement immédiat. Les études de SAS ont permis d'enregistrer, entre 1979 et 2019, 623 incidents dans un peu plus de 106 pays de par le monde avec une très nette augmentation du nombre d'accident depuis 2016.

« Parmi les 106 UEMS qui ont fait le plus de victimes depuis 1979, 72 se sont produites dans une zone résidentielle – grande ville, communauté, bidonville, banlieue, petite ville ou village – ou à proximité. »²

En général, les études menées prennent en compte les effets destructeurs des explosions sur les êtres humains et sur les biens, mais pas l'impact environnemental de ces incidents, qu'ils aient été pyrotechniquement dépollués ou non.

Ce livre blanc veut aussi prendre en considération les pollutions par restes explosifs de guerre (REG) et les EEI. Effectivement, outre le risque explosif de ces menaces, il existe un risque

environnemental du fait de la dégradation physique et moléculaire de ces engins dangereux. Dégradation qui s'amplifie avec le temps.

Certains pays développés ont mis en place des procédures de dépollution et de remédiation des sols pour donner suite à des pollutions du fait de munitions, mais uniquement au niveau national. Aux Etats Unis par exemple, le ministère de la défense dispose annuellement d'un budget pour traiter tous les accidents pyrotechniques entraînant un risque environnemental pour les populations³.

Très peu d'Etats prennent en compte ce risque, et mettent en place des moyens financiers pour remédier les sols pollués par des accidents pyrotechniques, à l'exemple des accidents avec des hydrocarbures.

La communauté internationale et les donneurs institutionnels d'action contre les mines ne proposent pas de financement pour des projets de remédiation des sols. Par ailleurs, les organisations internationales d'action contre les mines, ou de sécurité physique des stocks d'armes et de munitions, ne sont pas demandeuses pour ne pas attirer l'attention sur les années passées où elles ont déclaré des sites dépollués sans jamais avoir pris en compte cette problématique. Cette absence d'intérêt résulte d'une méconnaissance de la problématique et des impacts, car peu d'études sérieuses ont été menées sur ce sujet.

L'auteur de ce rapport illustrera son propos en s'appuyant sur une étude qu'il a menée par le passé en Libye sur le dépôt de munitions de MISURATA bombardé par les forces de l'OTAN, occasionnant la destruction de l'ensemble des magasins de stockage de types igloos recouverts de terre conçus pour résister à une surpression intérieure de 3 Bars.

Ce bombardement a totalement détruit les structures du dépôt, et a occasionné la dispersion de munitions ayant subi des contraintes extérieures dues à la chaleur, la projection et le choc avec le sol. Ces explosions ont créé des dégâts sérieux aux structures internes et externes des munitions, entraînant la projection de fragments initiaux porteurs de métaux lourds, et d'éléments chimiques, en surface et en sous-sol mais à une faible profondeur.

L'auteur s'appuie aussi sur d'autres observations faites dans la région de TOBROUK (Libye), et au Tchad sur un site d'entraînement au tir mal entretenu ainsi qu'en République Démocratique du Congo (RDC). Malheureusement, ayant des moyens très limités pour entreprendre des évaluations scientifiquement incontestables, il a dû se contenter de mener des interviews avec des responsables médicaux de TOBROUK et de MISURATA, des responsables politico-administratifs régionaux au Tchad ainsi que des entretiens avec des cultivatrices en RDC, pour obtenir des éléments contextuels prouvant la nocuité de cette pollution environnementale jamais prise en compte.

La Libye fut un excellent terrain d'étude du fait que l'eau de consommation courante provient majoritairement de la désalinisation de l'eau de mer puis de son stockage dans des réserves semi-enterrées. A MISURATA, de tels lieux de stockage sont positionnés tout autour du dépôt de munitions. De plus, l'irrigation des terres produisant les fruits et légumes est aussi effectuée

à partir de telles réserves. A TOBROUK, la zone étudiée est située sur une colline surplombant la ville et le golfe de TOBROUK. Sur ce plateau sont élevés des ovins qui vagabondent et broutent la végétation rase autour des lieux de stockage à l'air libre de munitions de la seconde guerre mondiale. Les eaux de pluies entraînent les polluants dans le sol jusqu'au niveau de la mer, d'où la ressource halieutique est prélevée par les pêcheurs. Ovins et poissons sont consommés par les habitants de TOBROUK.

Au TCHAD, le champ de tir est environné par deux villages traditionnels avec des puits servant à l'alimentation des populations en eau courante.

Dans toutes ces situations, il a été constaté des taux de décès plus élevés qu'ailleurs dans le pays sans qu'aucune étude de pollution chimique ne puisse être effectuée pour en analyser les causes.

En RDC, visitant une zone de culture non utilisée après retrait des REG présents, la propriétaire a déclaré que « plus rien de poussait » !

Ce rapport doit fournir les éléments de réflexion pour permettre de conduire de telles évaluations, non contestables, en vue de la prise en compte de la problématique dans un futur proche car il existe une réelle urgence et des solutions de remédiation. Il s'agit également de fournir une base de réflexion sur l'usage intensif de la destruction sur place des restes explosifs de guerre créant, de fait, une pollution localisée du sol ; mais aussi à la réflexion sur l'impact inacceptable des brûlages d'armes et de munitions.



Pollution datant de la seconde guerre mondiale – Bataille de Gazala – Tobrouk – Les munitions sont ainsi regroupées depuis de nombreuses années au sein d'un élevage de moutons qui broutent les herbes rases et où les gardiens ont leurs locaux de vie.

Libye. © M. Guilbaud

Mine dans champs de mines de Bir Hakeim – Bataille de Gazala – l’enveloppe est encore présente mais l’explosif intérieur a été sublimisé ou consommé par des fourmis comme observée dans d’autres pays.

Libye. © M. Guilbaud





Dépôt de munitions de Misurata après explosion – Libye © marceau Guilbaud

Le 25 septembre 2015, l'Assemblée générale des Nations Unies a adopté une Résolution dénommée « Transformer le monde : Le programme de développement durable à l'horizon 2030. »⁴ Celle-ci a défini des objectifs et des cibles. L'article 55 de cette Résolution définit ces objectifs et cibles de développement durable comme suit : « *[.] sont intégrés et indissociables ; ils sont par essence globaux et applicables universellement, compte tenu des réalités, des capacités et des niveaux de développement des différents pays et dans le respect des priorités et politiques nationales. Si des cibles idéales sont définies à l'échelle mondiale, c'est à chaque État qu'il revient de fixer ses propres cibles au niveau national pour répondre aux ambitions mondiales tout en tenant compte de ses spécificités. Il appartient aussi à chaque État de décider de la manière dont ces aspirations et cibles devront être prises en compte par les mécanismes nationaux de planification et dans les politiques et stratégies nationales. Il importe de ne pas méconnaître le lien qui existe entre le développement durable et les autres processus en cours dans les domaines économique, social et environnemental [.]* ».

D'autres normes sont aussi à utiliser lors de l'action contre les mines et la sécurité physique des stocks d'armes et de munitions en vue de réduire les effets et impacts sur l'environnement et le vivant.

En 2015, les Nations-Unies ont lancé le Programme de développement durable 2030 définissant dix-sept (17) objectifs ayant pour vocation « *d'éliminer la pauvreté, protéger la planète et améliorer le quotidien de toutes les personnes partout dans le monde, tout en leur ouvrant des perspectives d'avenir.* »⁵

En 2019, lors du Sommet sur les objectifs de développement durable, un appel à la mobilisation de la société a été lancé, pour la décennie restante, sur trois domaines :

- L'action à l'échelle mondiale ;
- L'action à l'échelle locale ; et
- L'action à l'échelle individuelle.

La réduction des violences armées, dont l'action contre les mines participe, devrait contribuer au programme de développement durable. Sur les dix-sept objectifs définis, les actions contre les mines, les restes explosifs de guerre, les engins explosifs improvisés, etc. peuvent intervenir sur les objectifs suivants :

- La dépollution des zones dangereuses confirmées (ZDC) permet de restituer des terres cultivables, de rouvrir des voies de communication, d'améliorer l'accès au commerce, aux services de santé, aux écoles.

Cela permet d'améliorer l'atteinte des objectifs 1 à 4 :

- o Pas de pauvreté ;
- o Faim « zéro » ;
- o Bonne santé et bien-être ; et
- o Education de qualité.

- L'inclusion du genre dans les activités de réduction des violences armées participe à faire reconnaître le droit des hommes/femmes, quelques soient leurs âges, leurs origines, et réviser le rôle attendu dans leur société.

Cela permet d'améliorer l'atteinte des objectifs 5 et 10 :

- o Egalité entre les sexes ;
- o Inégalités réduites ;

- Le respect de l'environnement dans les actions de dépollution des zones dangereuses, à toutes les étapes, de la planification, à la restitution des terres, en passant par la destruction des munitions explosives, et l'éducation au risque, doit permettre l'atteinte des objectifs 6, 12, 13, 14 et 15 :

- o Eau propre et assainissement ;
- o Consommation et production responsables ;
- o Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques ;
- o Vie aquatique ; et
- o Vie terrestre.

Conformément aux principes de la série de normes ISO 14000⁶ la gestion environnementale concerne :

- a) La pollution de l'air (bruit, fumée, etc...), de l'eau et du sol ; La réduction et la destruction des déchets, en particulier des produits toxiques et dangereux ;
- b) La réduction de la consommation d'énergie ;

- c) La réduction des émissions de CO₂ ;
- d) L'utilisation des terrains ; et
- e) Les risques pour le patrimoine.

La Norme Internationale d'Action contre les Mines (NILAM) 07.13 Ed1 – Gestion de l'environnement⁷ définit, dans son introduction ce qui suit : « *[.] Une gestion efficace des aspects environnementaux dans les opérations de dépollution est importante du point de vue des organisations, des communautés à risque, des autorités nationales, des donateurs et de la communauté internationale au sens large. La protection de l'environnement fait l'objet d'une attention croissante de la part des gouvernements nationaux, des institutions internationales, et se reflète dans les exigences de plus en plus rigoureuses liées aux législations nationales de nombreux pays, et aux termes des traités internationaux. Les opérations de déminage sont entièrement soumises à la législation environnementale nationale applicable et aux traités internationaux* ».

L'action contre les mines améliore, non seulement, la sécurité et la sûreté de la population, mais également les opportunités de développement socio-économique, dans la mesure où elle vise à « *réduire l'impact social, économique et environnemental des munitions explosives.* »

Les activités d'action contre les mines ont un impact positif sur l'environnement, mais cela n'exclut pas le potentiel d'impact négatif. Il est donc important de prévenir et d'atténuer les éventuels effets néfastes par le biais d'une gestion environnementale appropriée, tenant compte des activités spécifiques menées par une organisation d'action contre les mines, et du contexte dans lequel les opérations sont menées.

« *La gestion de l'environnement vise à renforcer l'efficacité et l'efficience de l'action contre les mines dans la réalisation de son objectif. Les faiblesses de la gestion environnementale dans l'action contre les mines peuvent : réduire ou empêcher les résultats attendus des opérations ; entraîner des effets néfastes à court et à long terme sur la terre, dans l'eau, dans le sol, et dans l'air, ainsi que sur les communautés qui vivent à proximité des sites traités ; causer des accidents/incidents aux personnes, des dommages à l'environnement et aux infrastructures ; et donner lieu à des poursuites judiciaires contre les organisations, et à des demandes d'indemnisation substantielles. Les impacts négatifs sur l'environnement peuvent entraîner des impacts sociaux, économiques et politiques négatifs au niveau local, régional et national. La gestion de l'environnement appelle donc des solutions globales permettant d'évaluer les différents impacts et de sensibiliser davantage les organisations d'action contre les mines à la protection de l'environnement [.]* ».

La NILAM 07.13⁷ ne prend en compte que l'impact environnemental des activités de déminage/dépollution pyrotechniques mais pas l'impact d'une absence de déminage/dépollution pyrotechnique.

Le chapitre C.3. de l'annexe C⁹ cette NILAM définit ce qui suit : « *[.] Différents composés chimiques provenant de munitions explosives (y compris les sous-munitions non explosées et les engins explosifs improvisés (IED)) pourraient se dissoudre et pénétrer dans les cours d'eau, se*

cristalliser en nouveaux composants dans le sol, ou être incorporés dans les sols et les minéraux existants. Plantées à la surface des terres ou juste en dessous, les mines (en particulier celles improvisées) ont un impact direct sur la qualité et la composition du sol. Les contenants, les explosions ou les fuites de substances toxiques résultant de la corrosion ou de la décomposition peuvent avoir des effets sur le sol.

Les conséquences de la corrosion des fragments peuvent inclure la libération de divers alliages tels que le fer, le manganèse, le chrome, le zinc, le cuivre, etc. Un certain nombre d'éléments toxiques, et dangereux, peuvent apparaître en tant que polluant après l'utilisation d'armes hautement explosives. Dans les régions agricoles, des éléments toxiques peuvent pénétrer dans la chaîne alimentaire humaine. Par conséquent, à mesure que des éléments toxiques pénètrent dans le sol, des processus de bioaccumulation peuvent commencer et affecter la santé humaine. [...] ».

Divers types d'impacts environnementaux sont à envisager au-travers de ce qui suit :

- a) Les déjections humaines ;
- b) Les déchets domestiques ;
- c) Les eaux grises ;
- d) Les matières/déchets inflammables, huileux, lubrifiants, filtres à carburant ; etc. ;
- e) Les piles et accumulateurs ;
- f) Les déchets issus de soins médicaux, les médicaments périmés et autres produits chimiques.
- g) Etc.

La Directive Technique Internationale sur les Munitions (DTIM) 11.30¹⁰ explique la nécessité de dépolluer les sites de stockage de munitions après explosion. Cette norme est introduite par le rappel qu'il existe de nombreux exemples d'événements explosifs accidentels dans les lieux de stockage de munitions. Elle donne des conseils concernant la sécurité, la sûreté et la destruction, lors d'opérations de dépollution pyrotechniques, de manière à réduire le risque d'accident explosif indésirable.

La DTIM 11.30 définit clairement les risques liés à une explosion accidentelle dans un dépôt de munitions comme suit :

- a) *« Des munitions peuvent avoir été projetées à distance du siège d'explosion (on a déjà observé des roquettes non guidées ayant parcouru jusqu'à 20 km). Si les munitions ont été stockées amorcées, il est tout à fait possible que la force de l'explosion soit suffisante pour déclencher l'amorce. Ainsi, toutes les munitions amorcées découvertes au siège d'explosion ou à courte distance autour, doivent être considérées comme des munitions non explosées (MNE) et traitées en conséquence ;*
- b) *Les éléments explosifs des munitions peuvent être partiellement ou complètement consumés. Si la matière active est partiellement brûlée, alors la munition présentera le même risque que toute matière explosive exposée à l'air libre. De plus, des risques liés aux mélanges d'explosifs et à la recristallisation, qui provoque la formation d'isomères plus sensibles, tels le TNT, peuvent intervenir ;*

- c) *Les munitions peuvent être brisées, exposant ainsi des matières actives ou pyrotechniques (phosphore blanc, sous-munitions) qui sont susceptibles d'avoir été dispersées à travers le site ;*
- d) *Les munitions peuvent avoir été brisées, exposant ainsi leurs composants électriques ; Les agents propulsifs peuvent ne pas avoir été consommés durant l'explosion et l'incendie qui en résulte. Des agents propulsifs peuvent donc être répandus à travers tout le site. Ils sont susceptibles de s'enflammer spontanément au cours des opérations NEDEX. Ces mises à feu spontanées dépendent de la stabilité chimique de l'agent, ainsi que de la température ambiante ;*
- e) *Les munitions qui ont été projetées à l'extérieur du site peuvent aussi avoir pénétré sous la surface du sol. Cela rendra nécessaire une dépollution en dessous de la surface du sol ;*
- f) *Au niveau du siège d'explosion, s'il peut être identifié, on trouvera un cratère. Si l'accident est conséquent, on en trouvera même une multitude. On doit partir du principe que des munitions sont toujours présentes à l'intérieur de celui-ci, et que les explosions successives sont susceptibles d'en avoir comblé certains, enterrant ainsi des munitions toujours présentes dans le cratère.*
- g) *Les munitions ayant été soufflées par l'explosion sans déflagrer ou détoner seront beaucoup plus sensibles aux éléments extérieurs. Les risques augmenteront de façon significative pendant les orages, et l'accident pourrait se répéter à cause des éclairs ;*
- h) *Les infrastructures (bâtiments, route, etc.) sont susceptibles d'avoir été fragilisées et elles risquent de s'effondrer ;*
- i) *De mauvaises conditions météorologiques peuvent provoquer des inondations et des coulées de boue qui recouvriront les munitions non explosées ; et*
- j) *Les explosifs exposés à l'air libre sont susceptibles de contaminer les eaux de surface et les nappes phréatiques. L'eau peut être colorée en rose pour donner suite à une contamination par TNT, RDX et HMX. Les explosifs sont également toxiques ; par exemple, les personnes exposées à du TNT sur une période prolongée peuvent être atteintes d'anémie et de dysfonctionnements du foie. Les équipements de protection individuels (PPE) (masque facial et gants de protection) peuvent, de ce fait, être requis lorsque les explosifs sont récupérés. Une procédure de dépollution complète sera également nécessaire. »*

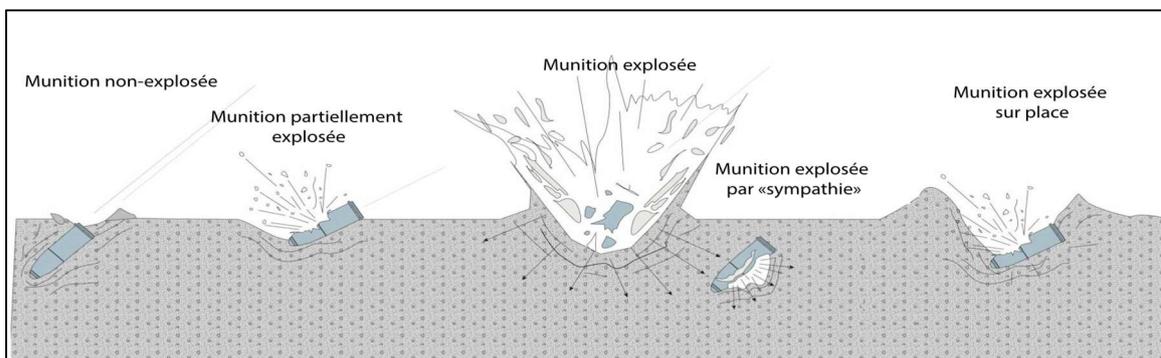
Ce chapitre montre la méconnaissance des réalités chimiques et toxiques des contenants et des contenus de munitions en général.

On peut constater au travers de la normalisation listée ci-dessus que l'impact environnemental de munitions mal stockées, non explosées, dans des états de dégradation plus ou moins avancés n'est pas pris en considération et, encore moins, l'augmentation de l'impact dû à la durée de présence des munitions sur ou dans le sol subissant toutes les contraintes météorologiques qui accentuent la dégradation de ces munitions et le transfert des polluants par les eaux de pluie, le broutage des animaux, etc.



Obus de mortier sortis de l'eau en République Démocratique du Congo.
© M. Guilbaud

« Si le contenu explosif est ouvert sur l'environnement, les matières explosives, ou leurs résidus, peuvent contaminer le sol et l'eau, et peuvent avoir un effet substantiel sur l'environnement. De l'amiante, des produits chimiques, et des matières propulsives liquides peuvent être trouvés dans les missiles. Des projectiles à l'uranium appauvri peuvent également être rencontrés. Ce dernier doit être traité conformément à la Note Technique 09.30 02. »¹¹



Différents états d'une munition non-explosée – source BRGM

<http://infoterre.brgm.fr/rapports/><https://www.researchgate.net/publication/265623100> - D. Hude



II - Etat des lieux

« Les impacts sur l'environnement sont silencieux »

Evoquer une pollution de l'environnement du fait de la présence de munitions non explosées, que ce soit suite à une explosion accidentelle dans un dépôt de munitions, comme dans une zone dangereuse confirmée (REG) ou une engin explosif improvisé (EEI) peut surprendre car. En effet, excepté le risque pyrotechnique d'une telle présence, peu de personnes pensent qu'il y ait un risque de pollution chimique liée à la présence de munitions conventionnelles non-explosées, même parmi les techniciens de la dépollution pyrotechnique, et encore moins parmi les acteurs internationaux chargés de planifier des programmes d'action contre les mines ou de gestion des armes et des munitions - Weapons and Arms Management (WAM). Quant aux bailleurs de fonds, ils ne peuvent envisager qu'un tel risque puisse exister avec des munitions conventionnelles si on ne leur dit pas.

Le risque de pollution de l'environnement sera aggravé par la durée de la mise en place d'un projet de dépollution avec remédiation des sols. Plus le temps passe, plus les conditions météorologiques vont aggraver la dégradation des munitions, et la diffusion de molécules polluantes dans l'air, dans l'eau et dans les sols. La chaîne alimentaire sera directement impactée par transfert des polluants dans les sols et les nappes phréatiques, la concentration de ces molécules dans les systèmes racinaires des plantes qui seront broutées par les animaux pâturant qui, eux-mêmes, seront mangés par les êtres humains. Le transfert des polluants dans les nappes phréatiques impactera les eaux de consommation courante ; les eaux, dans lesquelles la ressource halieutique est prélevée, seront aussi impactées, etc.

Une enquête sommaire menée par lors d'une étude d'impact, en 2010, au Tchad, par l'auteur, a permis de recenser la mort de dix femmes enceintes dans deux villages situés à proximité d'un champ de tir non entretenu. Ces décès n'ont pu être expliqués par la médecine locale, et n'ont pas été rattachés à des causes purement médicales. L'auteur a proposé à l'autorité régionale de faire mener une analyse des eaux dans les puits de ces deux villages pour y vérifier la présence ou non de métaux lourds provenant de la dégradation des munitions non explosées restées au sol ou dans la butte de tir non dépolluée.

Les polluants chimiques des munitions conventionnelles

En général, une munition est un ensemble cohérent, chargé avec une matière active (explosive ou pyrotechnique), elle-même enfermée dans une enveloppe, plus ou moins épaisse, en métal ou dans un autre matériau. Le moyen d'amorçage peut être « à poste », c'est-à-dire physiquement fixé à la munition, un système de propulsion peut aussi être physiquement lié au corps de la munition d'une manière permanente (coup complet).

Que ce soit la matière active, l'enveloppe ou les parties internes nécessaires à la cohérence de l'ensemble de la munition, ce sont des composés de molécules chimiques et de métaux lourds.

La toxicologie des matières actives

Qu'en est-il de la toxicité des matières explosives ? Les aromatiques nitrés (Trinitrotoluènes : TNT, DNT et MNT) et les nitratés (RDX et HMX) sont extrêmement nocifs pour la santé à des quantités très faibles (voir ci-dessous).

L'Encyclopédie en ligne de sécurité et de santé au travail, du Bureau International du Travail (BIT)¹², fournit des fiches complètes des propriétés des composés aromatiques nitrés et leurs impacts sur la santé humaine.

Du fait de leur structure moléculaire, les composés explosifs sont très résistants à la destruction. Bien que l'efficacité de la destruction des matières explosives n'ait pas été mesurée lors de tir réel, toutefois, les facteurs d'émission définissent que 10% de celles-ci ne seraient pas détruites et donc émises dans l'environnement.¹³

Les impacts liés aux délais de traitement de la pollution pyrotechnique

Les munitions non-explosées « oubliées » sur ou dans le sol et dans l'eau, sont une source durable de pollution par diffusion de molécules toxiques dans l'environnement. Le temps qui passe augmente le risque d'atteinte des êtres vivants et de la flore.

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, des Etats, des organisations internationales, des acteurs locaux (chasseurs, pêcheurs, agriculteurs, forestiers, etc.) ou des ONG environnementales alertent périodiquement sur la gravité de ce risque, mais il n'existe toujours

pas de stratégie communément admise concernant les impacts des munitions oubliées, mais aussi des stocks très importants d'obus et de munitions dispersés dans l'environnement. Malheureusement, ces munitions sont souvent encore actives, et pour les décennies à venir, voire des siècles, lorsqu'elles sont conservées à l'abri de l'air et de la corrosion (sol glaiseux par exemple). Les services de déminage nationaux des pays européens impactés mettent à jour et traitent de très nombreuses munitions issues des deux guerres mondiales mais aussi plus anciennes. Celles-ci causent encore des décès, des blessures corporelles graves à tous ceux qui sont en contact soit par hasard soit par inconscience.

Quand est-il dans les pays en voie de développement qui ne disposent pas de moyens financiers et humains pour définir le niveau de la problématique ? La communauté internationale doit prendre en compte cette problématique pour d'une part traiter les pollutions historiques, et d'autre-part, celles qui sont en cours actuellement.

Plus on attend, plus l'impact environnemental est important, sans réduire la dangerosité explosive. Les impacts sur l'environnement sont silencieux alors que les impacts explosifs, plus bruyants, sont causes de décès ou d'invalidités physiques mais ayant un impact social important !

Les métaux lourds

« Un métal est une matière, issue le plus souvent d'un minerai ou d'un autre métal, dotée d'un éclat particulier, bon conducteur de chaleur et d'électricité, ayant des caractéristiques de dureté et de malléabilité, se combinant ainsi aisément avec d'autres éléments pour former des alliages utilisables dans l'industrie, l'orfèvrerie.... On appelle en général métaux lourds les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (ex. arsenic) caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 grammes par cm^{-3} . On retrouve dans certaines publications anciennes l'appellation de « métal pesant ». Quarante et un métaux correspondent à cette définition générale auxquels il faut ajouter cinq métalloïdes¹⁴ »

Dans les munitions militaires, les métaux lourds suivants sont rencontrés soient isolément soit associés (en gras les plus « à risque* »)¹⁵ :

- Aluminium dans les chargements explosifs et/ou pyrotechniques,
- Ammoniac,
- Antimoine (ajouté au plomb des cartouches pour armes portatives),
- Argent, dans les circuits électroniques,
- **Arsenic** (ajouté au plomb des cartouches pour armes portatives),
- Baryum,
- Benzidine,
- Bore,
- **Cadmium**,
- Cuivre,
- Etc.
- **Mercur**e (Fulminate de Mercure dans les amorces et les détonateurs),
- Molybdène,
- Nickel,
- Oxyde de fer,

- **Plomb** (balles d'armes à feu, balles d'obus « canister », ceintures de forçement,
- Strontium,
- Sulfure,
- Titane,
- Tungstène,
- Uranium appauvri,
- Zinc,

*Les Eléments-traces métalliques (ETM) ont principalement un impact sur la santé des enfants et des femmes enceintes. Tous ne sont pas toxiques mais certains, mis en gras dans la liste ci-dessus, présentent à très faible dose une certaine toxicité pour l'homme, entraînant notamment des lésions neurologiques plus ou moins graves.¹⁴

Les composés organiques entrant dans la composition de munitions

Les Etats Unis ont défini plus de 200 composés chimiques dangereux pouvant être contenus dans des munitions militaires. Parmi ceux-ci, le ministère de la défense américain en considère 20 qui seraient les plus dangereux du fait de leur large usage et de l'impact potentiel sur l'environnement¹⁵ :

- 1,2,3-Propanetriol Trinitrate (Nitroglycérine),
- 1,3,5-Trinitrobenzène, et
- 1,3-Dinitrobenzène,
- 2,4-Diamino / 6-Nitrotoluène,
- 2,4-Dinitrotoluène,
- 2,6 Dinitrotoluène,
- 2,6-Diamino / 4-Nitrotoluène,
- 2-Amino / 4,6-Dinitrotoluène,
- 2-Nitrotoluène,
- 3-Nitrotoluène,
- 4-Amino / 2,6-Dinitrotoluène,
- 4-Nitrotoluène,
- Hexahydro / 1,3,5-Trinitro / Triazine (RDX),
- Methylnitrite,
- N,2,4,6-Tetranitro-N-Methylaniline (Tetryl).
- Nitrobenzène,
- Octahydro / 1,3,5,7-Tetranitro / 1,3,5,7-Tetrazocine (HMX),
- Pentarythritoltetranitrate (PETN),
- Perchlorate,
- Trinitrotoluène (TNT),

A cette liste, il est nécessaire d'ajouter ce qui suit :

- Acétate de cellulose,
- Acide de plomb,
- Acide Picrite,
- Borate de sodium,
- Chlorate de Sodium,
- Fulminate de Mercure,
- Hexachloroéthane,
- Nitrate d'Ammonium, Nitrate de Plomb et Nitrate de Potassium,
- Nitrate de Cellulose,
- Nitrostarch,
- Oxide de zinc,
- Perchlorate d'Ammonium,
- Perchlorate de Potassium,
- Peroxyde d'acétone (TATP),
- Phosphore,
- Poudres noires,
- Sulfure,
- Tétrazène,
- Etc.

Bien que les recherches sur les problèmes environnementaux en relation avec les polluants chimiques datent de plus de trente années, les effets potentiels concernant l'impact environnemental sont encore peu connus. La nature des effets potentiels et l'impact sur la santé dépendent de la dose, de la durée d'exposition et du mode d'exposition mais aussi de la sensibilité des populations exposées et du climat.¹⁶

Les éléments suivants donnent quelques effets sur la santé pour cinq des plus dangereux composés¹⁵ :

Eléments	Effets
TNT	Possibilités de cancer du foie, de la peau et cataractes.
RDX	Possibilités de cancer, problèmes de prostate et nerveux, nausées et vomissements. Dommages sur les organes internes lors de tests sur des animaux.
HMX	Dommages potentiels sur le foie et le système nerveux lors de tests sur des animaux.
Perchlorate	Démangeaisons, larmolements et douleurs, gastro-entérite, nausées, vomissements et diarrhées. Possibilités d'acouphènes, étourdissements, élévation de la pression sanguine, troubles de la vision et tremblements. Impacts sur la Thyroïde.
Phosphore blanc	Impact sur la procréation, brûlures de la peau, irritation de la gorge et les poumons, vomissements, crampes d'estomac, déficience du foie, du cœur ou des reins. Décès.

Les concentrations en matières actives sur l'environnement dépendent du type de munition, des conditions environnementales, et de la densité de munitions. En général, cette dernière est faible et s'atténue rapidement avec l'éloignement du site que ce soit dans le sol (ou l'eau) et dans l'air. Mais le transfert peut aussi se faire par les eaux de pluie, le vent, le soleil vers les nappes phréatiques ou des zones plus éloignées.

Les autres composants des munitions militaires

Une munition militaire est constituée, dans la majorité des cas, d'un corps, d'un système d'amorçage et d'un système de propulsion. Des composants électriques ou électroniques sont aussi des constituants des munitions modernes.

Vieillessement et dégradation des munitions

Les munitions ont une durée de vie définie par le fabricant lors de la conception dépendant des conditions de stockage et des conditions extérieures d'utilisation. L'enveloppe des munitions est peinte et cela participe à retarder les effets de vieillissement de la munition. De plus, le concepteur de la munition a aussi créé un emballage qui fournira les meilleures conditions de stockage, de transport et de manutention jusqu'à son utilisation finale qui marquera, normalement, sa fin de vie.

Hors de cette situation optimale, la durée de vie de la munition initiale sera réduite par différentes causes de dégradation¹⁷ :

- De la matière énergétique (chargement) ;
- Des parties électroniques ;
- De la structure extérieure.

Tous dommages mécaniques (impact, corrosion) ou vibrations accélèrent le vieillissement. Mais, outre ces dommages, les munitions se dégradent aussi chimiquement avec le temps. La dégradation sera également accélérée par :

- de grandes variations de température (par exemple, changement de cycle chaud/froid) ;
- les températures basses ;
- une humidité élevée ou faible ; et/ou
- une pression.

Corrosion des munitions militaires

La corrosion désigne l'altération d'un objet manufacturé par son environnement.

Les exemples les plus connus sont les altérations chimiques des métaux dans un milieu aquatique – avec ou sans apport d'oxygène – telle la rouille du fer et du cuivre, la formation de vert-de-gris sur le cuivre et ses alliages (bronze, laiton) : on parle de corrosion aqueuse.

La corrosion atmosphérique est générée par l'atmosphère et ses conditions climatiques. Quelques exemples ci-après montrent des composants qui ont été exposés au climat et/ou l'humidité sur un dépôt de munitions de MISURATA (Libye) après une explosion suite à bombardement.



Elément de mine marine. Source ©M. Guilbaud



Présence de sels de nitrate (jaune). Source ©M. Guilbaud



Bombe cassée libérant son chargement.
Le corps a subi les effets d'une chaleur intense.
Source ©M. Guilbaud



Douille d'obus d'artillerie en cuivre.
Source ©M. Guilbaud



Moteur de roquette avec composants électroniques et carburant solide. Source ©M. Guilbaud



Cartouches pour armes portatives brûlées (plomb et antimoine).
Source ©M. Guilbaud

III - Impact sanitaire des restes explosifs de guerre (REG)

« Le dérèglement climatique attendu pourrait exacerber les risques d'inondation de certaines zones de dépôts de munitions enterrées »

La pollution par munitions, d'une manière générale, est surtout identifiée à une contamination au plomb. Effectivement, ce métal est connu pour causer le saturnisme, quelle qu'en soit la dose absorbée, et qui cible en priorité les femmes enceintes et les enfants. Mais ces dernières années, des matières à forte pouvoir explosif ont également été impliquées. Leurs effets sanitaires sur les êtres vivants sont souvent mentionnés dans la littérature anglaise, mais il n'existe aucune étude sur ces effets dans la littérature française.

Depuis de très nombreuses années, les munitions militaires ont été fabriquées avec des composés toxiques ou écotoxiques dont certains ne sont ni dégradables ni biodégradables. Le plomb, le mercure et l'arsenic sont les plus courants mais plus récemment, l'uranium appauvri a aussi été utilisé dans des munitions anti-blindages puis remplacé par le Tungstène.¹⁵

D'autres composés (le TNT, le RDX, les Perchlorates...) sont lentement dégradables. Ils sont retrouvés dans le sol ou dans les sédiments, aussi bien terrestres qu'aquatiques, dans lesquels ils occasionnent des effets toxiques pouvant déboucher sur une stérilisation partielle ou totale des sols et une intoxication des êtres vivants. Il est à noter que peu ou pas d'observation de pollution de l'air par les matières explosives.²⁹

D'autres encore, (Nitrates, cuivre, zinc, laiton, cadmium...) sont moins toxiques sous certains seuils.

Ce dossier ne traite pas des munitions à chargement chimiques qu'elles soient d'un usage passé ou présent.

Les enjeux environnementaux liés à la dépollution pyrotechnique de REG.

L'approche One Health (une vie, une santé)¹⁸ définit les enjeux en rapports avec l'environnement, la biodiversité et la santé humaine. Cette approche pourrait être incluse dans la réduction des violences armées dont l'action contre les mines.

Avec le temps, les restes explosifs de guerre (REG) s'enfoncent naturellement dans le sol, et la végétation reprend ses droits sur les sites d'enfouissement. Cette situation occasionne une décomposition chimique de ces munitions, l'insertion des polluants dans le sol et l'eau, mais aussi leur concentration dans les végétaux, et/ou une transmission vers la faune. Puis, avec le

temps, en fonction des méthodes agraires (labourages successifs), ces munitions refont surface.

D'autre part, l'explosion d'une munition crée un cratère dans le sol. Celui-ci correspond à l'impact de la munition causant un trou plus ou moins profond en fonction de la résistance du sol, le poids de la munition, et la hauteur de descente (chute ou orbe).

Lors de l'explosion initiée par l'impact, le cratère sera élargi d'une taille relative à la quantité nette d'explosif (QNE), et au type de matière active. Ces deux actions provoquent l'arrachement d'une portion de sol, et sa projection dans l'environnement immédiat. Les polluants de la munition se transmettent à cette portion de sol, et au cratère lui-même. Cela crée une pollution locale.

Lors d'une destruction volontaire menée par un expert du domaine (NEDEX), il y a aussi création d'un cratère avec les mêmes caractéristiques physiques et environnementales que ci-dessus.

Lors de toute explosion d'une matière explosive, une projection de poussières accompagne les effets de souffle et de chaleur. Plus la QNE est élevée et plus les effets sont importants, jusqu'à la création d'un nuage de polluants et de déchets projetés, qui seront soumis aux vents dominants et aux conditions météorologiques. Par l'intermédiaire de ce nuage, les polluants se déplaceront sur des zones plus ou moins éloignées du siège d'explosion et retomberont au sol en fonction de leur poids et de la météo.

La connaissance de l'histoire d'un site, des faits de guerre, des combats ayant eu lieu sur celui-ci est importante pour ne pas oublier ces sites, et les risques liés, pour pouvoir les traiter en vue de retirer tous les agents polluants dus à ces situations. Les archives locales, régionales, nationales et même internationales, des sources géographiques mais aussi des enquêtes géophysiques réalisées lors d'études préparatoires à des travaux de voiries, de construction, etc. sont utilisés. Les récits populaires peuvent aussi aider à retrouver ces lieux.

Depuis plusieurs années, le climat se dérègle et cela pourrait exacerber les risques d'inondations. Des zones de dépôt de munitions, qu'ils soient enterrés ou de surface, pourraient subir ce type d'événement mais aussi des incendies plus récurrents. Les forêts dites « de guerre », du fait de leur usage ou de leur ciblage intensif pendant un ou plusieurs conflits, sont aussi sujettes à cette menace. L'augmentation de la chaleur, de fortes pluies, aura aussi un impact direct sur la dégradation des métaux et donc de la pollution.

Ces dernières années, des explosifs récents, des carburants liquides ou solides de roquettes, ont été découverts dans des sites de stockage. L'uranium appauvri a été utilisé, bien que cela soit contesté par les nations en ayant fait usage, sur certains sites : Irak, Balkans, etc. Mais il faut du temps pour d'une part, identifier les nouveautés, et d'autre part, définir leur toxicité sur l'homme et son environnement. Par exemple, le Tungstène a remplacé l'Uranium appauvri pour, à priori, des raisons de toxicité moindre. Des tests effectués sur des rats, en leur injectant de la poussière de tungstène, ont induits des cancers avec des tumeurs localisées sur le site

d'injection. Sur l'homme, rien n'a été prouvé sauf en cas d'exposition de très longue durée au contact ou lors d'ingestion.¹⁹

L'usage de chlorate, pour ses qualités comburantes, dans les explosifs composites, en tant que comburant associé à des carburants hautement énergétiques, a été intensif dès la première guerre mondiale (Cheddite, TNT). Jugé trop sensible, il a été remplacé par le perchlorate, plus stable. Ce dernier a été largement utilisé dans les grenades et les munitions de tranchée.²⁰

Dans le Nord de la France, la présence de Perchlorate dans les eaux de consommation courantes est un risque potentiel de retard de développement des enfants.²¹

Les hydrocarbures sont aussi des polluants présents dans les moteurs de propulsion des missiles fabriqués lors de la guerre froide et encore disponibles sur de nombreux théâtres de guerre.

Les enjeux liés aux types de toxicité

Les matières explosives sont stables dans le sol et résistants à la biodégradation. Différents auteurs ont rapporté que le TNT (2,4,6-trinitrotoluène), le RDX (hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine) et le HMX (octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine) sont toxiques, mais des investigations ont été menées dans des sols artificiels avec des substances isolées.²²

Un même composant de munition (ex. : hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine) peut être caractérisé par plusieurs formes de toxicité.²² En outre, certains produits (métaux lourds notamment) peuvent mutuellement renforcer leur toxicité (et écotoxicité) ou exacerber celle d'autres produits (effets dits synergiques et possible effets de potentialisation). Des interactions toxiques, pouvant conduire à la mort, ont aussi été démontrées pour certains composés organiques (charge explosive) de munitions, par des tests faits sur des rats de laboratoire.²²

Exemples d'agents toxiques ou écotoxiques de type explosif ou propulsif pouvant être présents dans des munitions militaires conventionnelles.

Source GESTIS Database²³

Nom commun	Nom chimique Numéro CAS	Solubilité dans l'eau (g/L)	Commentaires
Fulminate de mercure	Fulminate de mercure (CAS 628-86-4)	Très peu soluble	Toxique par inhalation, ingestion, contact avec la peau : dermatites voire érythèmes. Toxicité importante en milieu aquatique avec des effets prolongés.
Amatol	2,4,6-Trinitrophénol + Nitrate d'ammonium	Totalement soluble	Toxique par inhalation, ingestion, contact avec la

	(CAS 8006-19-7) (CAS 88-89-1) CAS 6484-52-2)		peau, avec les yeux : Atteintes cornéenne et mucosités nasale, dermites (peau jaunie), douleurs gastriques, troubles nerveux, atteintes sanguines, rénales et au foie. Des atteintes à la fertilité, mutagènes et cancérigènes sont probables.
Cordite	Nitrocellulose, Nitroglycérine, Nitroguanidine (CAS 9004-70-0)	Peu soluble	Insuffisance de données.
HMX Octogène	Octahydro-1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-Tetrazocine (CAS 2691-41-0)	Insoluble	Toxique par ingestion, contact avec la peau
Lyddite	Acide Picrique (CAS 88-89-1)	Soluble lentement	Toxique par inhalation, ingestion, contact avec la peau, avec les yeux : Atteintes cornéenne et mucosités nasale, dermites (peau jaunie), douleurs gastriques, troubles nerveux, atteintes sanguines, rénales et au foie. Des atteintes à la fertilité, mutagènes et cancérigènes sont probables.
PETN	Tétranitrate de pentaérythritol (CAS 78-11-5)	Soluble faiblement	Insuffisance de données.
RDX Cyclonite Hexogène Hexolite Composition A, B, C, D et H6	Cyclotriméthylènetrinitramine Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (CAS 121-82-4)	Insoluble	Susceptible d'être cancérigène pour l'homme ! Insuffisance de données.
Tétryl	2,4,6-Trinitrophénylméthyl nitramines (CAS 479-45-8)	Très peu soluble	Le Tétryl compte parmi les composés les plus toxiques et dangereux pour l'homme.
TNT	2,4,6-Trinitrotoluène (CAS 118-96-7)	Très peu soluble	Une exposition à de fortes doses peut provoquer des anémies et des maladies du foie. On a également observé des hypertrophies de la rate et des effets négatifs pour le

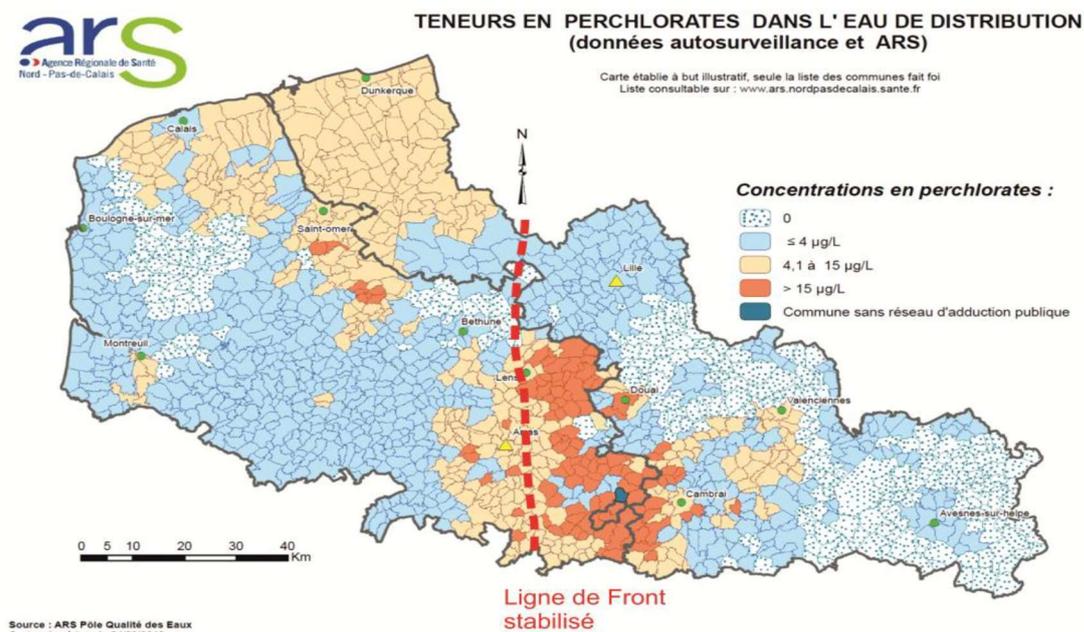
			<p>système immunitaire chez des animaux qui avaient ingéré et respiré du trinitrotoluène, ainsi que des irritations cutanées. Les autres effets délétères sont une baisse de la fertilité masculine et un risque cancérigène (c'est un dérivé d'un hydrocarbure aromatique, dont beaucoup de propriétés sont communes avec le benzène, de nature cancérigène).</p>
--	--	--	--

**Exemples d'agents toxiques ou écotoxiques
de type explosif ou propulsif pouvant être présents dans des munitions militaires
conventionnelles.**

Source OMS²⁴

Nom commun	Nom chimique Numéro CAS	Solubilité dans l'eau (g/L)	Commentaires
Uranium Uranium appauvri		Insoluble	<p>Toxique par inhalation, ingestion, contact avec la peau.</p> <p>L'uranium appauvri est à la fois potentiellement chimiotoxique et radiotoxique, les deux organes les plus attaqués étant les reins et les poumons. La nature physique et chimique de l'uranium appauvri auquel le sujet est exposé, de même que l'intensité et la durée de l'exposition, déterminent les effets sur la santé.</p> <p>Les études à long terme portant sur des professionnels exposés à l'uranium ont signalé certains troubles de la fonction rénale selon l'intensité de l'exposition. Il semblerait néanmoins d'après certaines données que ces troubles puissent être transitoires et que la fonction rénale revienne à la normale après élimination de la source d'une exposition excessive.</p> <p>Les particules insolubles d'uranium, de 1 à 10 µm de diamètre, tendent à</p>

		<p>rester dans les poumons et pourraient y provoquer des lésions par rayonnement, voire des tumeurs malignes, si leur présence entraîne une irradiation suffisamment intense pendant une période prolongée.</p>
--	--	---



Exemple d'impact de pollution par munitions démontrant le lien entre sites de combat et présence de pollution par Perchlorate
 Source BRGM <http://infoterre.brgm.fr/rapports/><https://www.researchgate.net/publication/265623100> - D. Hude

Les enjeux liés aux types de toxicité – Par l'exemple

Au-travers du rapport: *Civilian exposure to munitions-specific carcinogens and resulting cancer risks for civilians on the Puerto Rican island of Vieques following military exercises from 1947 to 1998* (Sanderson et al., 2017), il est possible de mieux comprendre, au travers de l'action de dépollution menée par l'armée américaine à Porto-Rico (île de Vieques), le risque de contracter un type de cancer du fait d'activités militaires mettant en œuvre des munitions mal stockées, et pas détruites suffisamment tôt, auquel la population civile des deux villes principales de l'île a été soumis.

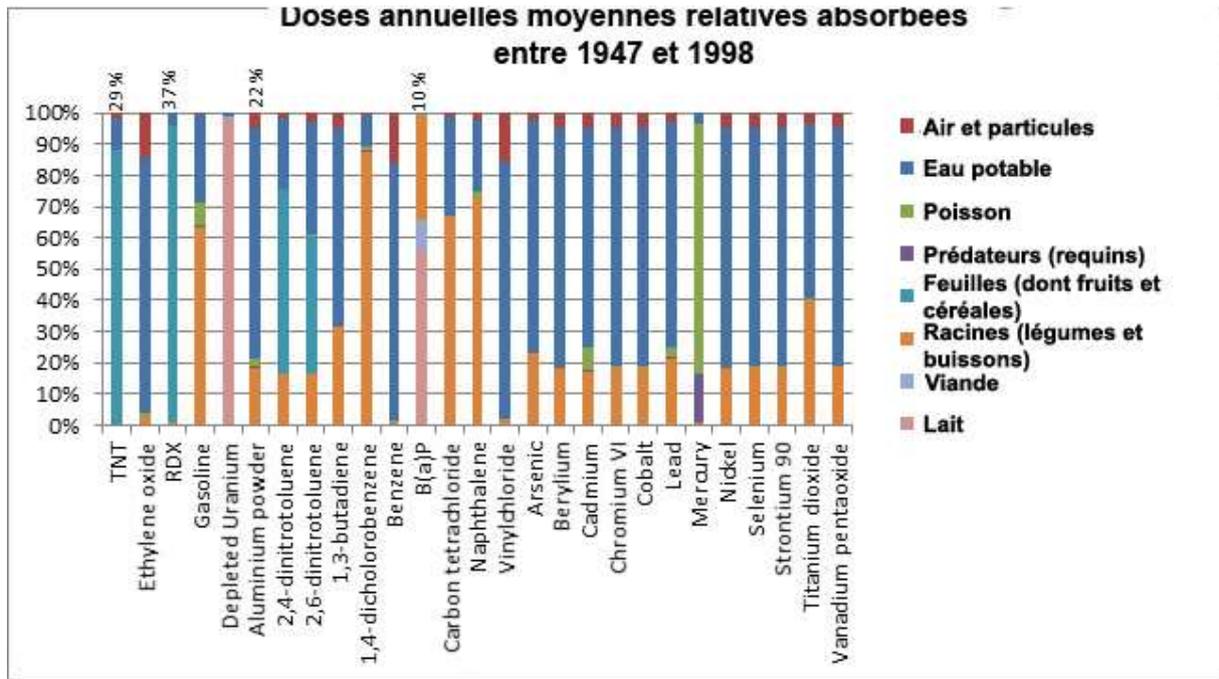


Tableau définissant les modes d'absorption (%) des molécules cancérogènes par type de matière explosive par les populations des Iles de Porto Rico²⁵



Destruction de grenades à main dans un pneu pour concentrer la projection des éclats dans l'environnement – Mauritanie.

© M. Guilbaud

IV - Dépollution complète – Pyrotechnique et chimique

Une explosion dans un dépôt de munitions, comme lors d'une opération d'action contre les mines mais aussi, du fait d'un reste explosif de guerre (REG), où de toute charge explosive placée dans un engin explosif improvisé (EEI) pourrait causer une destruction partielle des munitions en cause.

Les munitions dont le corps sera suffisamment protecteur au choc, au souffle et à la chaleur, ou trop éloignées du site d'explosion, seront projetées soit partiellement soit complètement. La même projection peut avoir lieu si le magasin de stockage est de type léger ou à l'air libre. La projection, en fonction du poids de la munition projetée, se fera selon un orbe plus ou moins tendu. Dans tous les cas, la munition aura subi un effet dû au choc, au souffle, à la chaleur et à la projection (début d'initiation) causant des dégradations partielles ou totales de l'enveloppe mettant à nu des éléments constitutifs à la munition en position de stockage (voir photos ci-dessous).

« De nombreuses munitions non explosées ont été 'perdues', ou leurs sites d'enfouissement ont été 'oubliés' causant un risque imprévisible »

Lors du stockage, les munitions sont amorcées ou non. Si la fusée est « à poste », la sécurité, si elle existe, est en place pour empêcher le fonctionnement intempestif de la munition concernée.

Mais, lors de l'impact avec le sol, ou avec tout autre obstacle, la munition peut subir des ruptures exposant des éléments actifs de l'amorçage (amorce, détonateur, percuteur). De ce fait, l'amorçage peut avoir lieu, d'une manière non prévue, lors du déplacement de la munition par le technicien chargé de la dépollution pyrotechnique. Le risque est pyrotechnique en lien avec une probable explosion mais aussi environnemental du fait de l'exposition des composants internes à l'environnement et une dégradation accélérée.

Quelques exemples de munitions ayant subi les effets d'une explosion inattendue



Rupture du dispositif d'amorçage « stand off »
Source ©M. Guilbaud



L'explosion a projeté des éléments de munitions mélangés
aux gravats. Source ©M. Guilbaud



Rupture du corps exposant le chargement
Source ©M. Guilbaud



La chaleur a accéléré la dégradation du métal
Source ©M. Guilbaud



Rupture du dispositif propulsif exposant des composants
électroniques. Source ©M. Guilbaud



Rupture de l'enveloppe externe.
Source ©M. Guilbaud

Dans le cas des REG, MEA, EEI posés, placés ou projetés, le fait que ceux-ci n'aient pas fonctionné comme prévue ne retire ni leur dangerosité pyrotechnique, ni leur impact environnemental. Là encore, les délais pris pour procéder aux actions d'action contre les mines sont importants.

Réduction du risque pyrotechnique et de l'impact environnemental

Bien que la dépollution pyrotechnique ne soit pas l'objectif de ce document, il faut prendre en compte la pollution environnementale causée par l'absence de dépollution pyrotechnique des restes explosifs de guerre propulsés. Effectivement, ceux-ci le sont par un moteur solide ou liquide qui, bien qu'en position de stockage lors de l'explosion du dépôt, peuvent prendre le régime de la propulsion qui déplacera la munition concernée selon une trajectoire plus ou moins tendue, et sur une distance pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres voire plusieurs kilomètres.

Les délais d'attente pour dépolluer une zone dangereuse confirmée généreront une aggravation des risques et menaces. Ce délai permettra un transfert des polluants provenant de la décomposition de ces munitions sous l'effet des conditions météorologiques.

En milieu aquatique, les délais de décomposition sont plus rapides et donc, les effets seront plus rapides sur la faune et la flore, avec transfert vers la chaîne alimentaire humaine.

Exigences de dépollution

L'usage prévu du terrain ayant subi une explosion accidentelle ou provoquée, comme étant pollué par toute munition explosive du fait d'une activité armée, doit être un facteur essentiel pour déterminer les exigences de dépollution NEDEX, ainsi que pour l'allocation des ressources nécessaires. L'usage prévu du terrain devrait définir le niveau de dépollution nécessaire ; par exemple, il est inutile et coûteux en ressources de dépolluer un terrain jusqu'à une profondeur de 2 mètres si ce terrain doit être réutilisé pour créer un espace forestier.

La NILAM 09.10²⁶ définit ce qui suit : « *Un terrain doit être considéré comme dépollué quand l'organisation chargée de la dépollution a assuré le retrait et/ou la destruction de toutes les munitions non explosées à une profondeur donnée.* »

La profondeur spécifiée d'une dépollution doit être définie par une enquête technique, ou par toute autre source d'information fiable qui établit la profondeur d'enfouissement du danger dû à la présence de mines ou de munitions non explosées, et une évaluation sur l'utilisation envisagée du terrain. En l'absence d'informations vérifiées sur la profondeur d'enfouissement, une profondeur par défaut doit être définie par l'autorité nationale en charge de l'action contre les mines. Elle devrait être basée sur les données techniques concernant les menaces habituellement rencontrées dans le pays, tout en tenant compte de l'usage prévu du terrain. Par expérience, la pollution immédiate d'une explosion sera en surface ou juste en-dessous la

surface. Les moyens de détection de métaux les plus courants sont limités et donc, une profondeur de 130 mm devrait être la norme.

Méthodologies de dépollution

Les facteurs suivants doivent être pris en compte durant l'élaboration des méthodologies de dépollution NEDEX²⁶ :

- a) Une enquête technique doit être menée, qui couvrira les points suivants :
 - L'identification des types de munitions et les risques d'instabilité des munitions non explosées ;
 - L'identification des dangers en profondeur ; et
 - Une évaluation de la densité de munitions non explosées dans le rayon de la zone de danger ($/m^2$). La densité de REG / munitions incluse ;
 - 1) les munitions amorcées qui ont dû être détruites in situ comme REG ;
 - 2) les munitions non amorcées qui ont été retirées manuellement ; et
 - 3) les fragments métalliques provenant des munitions qui ont détonnées ou déflagrées.
- b) Un plan de dépollution doit être basé sur une évaluation technique et du risque. Il devrait inclure :
 - Evaluation formelle du risque ;
 - Les ressources nécessaires (y compris les engins de levage lourds et blindés pour créer un passage) ; et
 - Une formation suffisante.

Les délais nécessaires pour une dépollution NEDEX sont toujours difficiles à évaluer du fait du nombre important de variables.



Dépollution d'une zone polluée suite à explosion dans un dépôt de munitions. La méthode employée est désignée comme « dépollution du champ de bataille ». Le but est d'obtenir aucun signal lors du contrôle qualité. Misurata – Libye

© M. Guilbaud

Il existe différents processus pour effectuer une dépollution NEDEX²⁶ :

- a) Etablir le rayon de la zone de danger qui nécessite une dépollution NEDEX ;
- b) Quadriller la zone de l'extérieure vers l'intérieur, en prenant en compte la zone de danger et la zone de stockage de munitions ;
- c) Au sein de la zone de danger, dans les endroits où la population est soumise au plus haut risque, la dépollution doit être entreprise en priorité ;
- d) Faire effectuer les opérations de marquage par du personnel qualifié en munitions. Ceux-ci, à l'opposé des personnels NEDEX, peuvent faire gagner du temps, contredire la nécessité de destruction sur site et, dans certains cas, donner des recommandations concernant le déplacement des munitions, ce qu'un personnel NEDEX n'est pas toujours habilité à faire. Leur formation touchant à la conception des munitions signifie qu'ils peuvent effectivement accélérer les opérations de dépollution dans les limites acceptables de la sécurité.
- e) Le système de base d'un marquage à la peinture devrait être ;
 - VERT – pas de chargement explosif et peut être déplacé sur la zone des déchets par n'importe qui ;
 - ORANGE – Certifié comme « déplaçable en sécurité » par un spécialiste pour une destruction en fourneau centralisé. La munition peut être déplacée par un personnel de soutien ; et
 - ROUGE – Détruit sur place par un personnel NEDEX lors d'une séance planifiée de destruction.
- f) Effectuer la dépollution de surface initiale, à moins que l'évaluation de la menace n'ait démontré que la dépollution en profondeur est absolument nécessaire et prioritaire. Toute munition amorcée, non sécurisée ou inconnue, doit être détruite par détonation ou par bas-ordre sur site ;
- g) Constituer une zone de démolition pour la destruction des munitions découvertes non amorcées ou définies comme déplaçables ;
- h) Établir une procédure de vérification des déchets pour s'assurer qu'il n'y ait plus aucune trace d'explosif (Free From Explosive – FFE) ; et
- i) Établir un système de comptabilisation des munitions lors des opérations de dépollution et de destruction (il est ensuite possible de comparer ces chiffres à ceux des pertes de munition dans le stock (dans le cas des dépôts officiels).

Le mode opératoire d'une dépollution sera dépendant de tout ce qui a été défini précédemment mais, il est indispensable de traiter le risque pyrotechnique (explosion accidentelle lors de la dépollution) et le risque environnemental en même temps.

Une des meilleures méthodes sera le dispositif employé lors d'une dépollution du champ de bataille²⁶ : une ligne de personnels en charge des opérations suivantes :

- Fouille visuelle de la surface du sol ;
- Retrait de tous les éléments liés aux munitions à caractère explosif ou neutre ;
- Marquage des couloirs fouillés, à l'avancement ;

- Evacuation des éléments trouvés, lors de la fouille visuelle, vers la zone de stockage qui doit être compartimentée en fonction de la dangerosité des éléments trouvés et avant destruction des composants supposés explosifs ;

Les personnels déployés sur cette ligne ne sont pas des techniciens NEDEX mais doivent avoir reçu une formation suffisante avant leur déploiement sur site.

Un expert en munitions doit être placé à l'arrière de la ligne de fouille visuelle. Quand un membre de cette ligne lève un bras pour indiquer qu'il a observé un objet non identifié, l'expert s'avance au niveau de cette personne pour diagnostic. Ce geste doit interrompre immédiatement tout déplacement de la ligne jusqu'à ce que le chef d'équipe donne l'ordre de reprendre la recherche.

Après identification du risque par l'expert en munition, un piquet de couleur sera placé à proximité de l'objet identifié pour indiquer la teneur du risque et l'attitude à prendre pour le traitement.

Lors d'une fouille visuelle, le risque placé sous la surface du sol ne sera pris en compte que si des indices dépassent de celui-ci. Si la fouille visuelle doit prendre en compte le risque de pollution enterrée à une profondeur maximale de 180 mm, les personnels seront équipés de moyens adaptés à la détection de métaux.



Source © M. Guilbaud

La philosophie doit être la suivante :

« Tout ce qui est devant est dangereux alors que l'arrière est sécurisé ».

Pour réduire les risques, si cela est possible, une zone de destruction devra être établie à proximité et tous les éléments à risques devraient être détruits régulièrement. Ainsi, le stockage sera sécurisé, le transport limité.

La zone de déchets devrait être sécurisée pour empêcher toute diversion malveillante.

A la fin de la dépollution, la zone dépolluée doit être marquée comme sûre alors que celle qui n'a pas été traitée doit être identifiée comme dangereuse. La symbologie de danger utilisée doit être connue de tous ceux qui ont besoin d'accéder à la zone concernée.

Zone de destruction



Marquage final



Récupération des déchets métalliques et bétons en vue évacuation vers sites de retraitement.

Source © M. Guilbaud

V - Remédiation des sols

L'explosion accidentelle ou provoquée d'une munition peut causer une pollution pyrotechnique et chimique créant un impact sécuritaire et environnemental. Plus le temps passe avant qu'une dépollution pyrotechnique, accompagnée d'un retrait des matières et des matériaux polluants du sol, et plus l'impact environnemental augmente.

Si les opérations de dépollution prennent du temps, le transfert vers l'eau, le sol et sur la chaîne alimentaire sera important. Il faudra donc définir le type de pollution, son étendue, en vue de mettre en œuvre des méthodes de remédiation des sols.

Le but général d'une remédiation des sols est de traiter les éléments impactés par des polluants solides, liquides ou gazeux en vue de ramener le taux de pollution à un niveau acceptable autorisant une vie « normale », c'est-à-dire respectant les écosystèmes et les besoins alimentaires des êtres vivants sur notre Terre. A ce jour, la remédiation des sols est surtout pratiquée pour réduire les impacts des pollutions par hydrocarbures et par les métaux lourds. Mais, en ce qui concerne les polluants issus de munitions, peu d'actions opérationnelles sont effectuées dans le cadre de l'action humanitaire **d'action** contre les mines. Seuls certains pays développés se sont dotés de compétences pour se faire et les coûts sont souvent jugés prohibitifs²⁷ en ce qui concerne les méthodes physiques !

L'auteur avait constaté, lors de projets de dépollution pyrotechnique en République Démocratique du Congo, que malgré le retrait complet des munitions non explosées, et des matières en relation, les sols étaient devenus stériles et que la culture n'était plus possible.

Des études récentes démontrent que des méthodes peuvent être déployées à des coûts réduits avec une efficacité importante.²⁸

« Le choix du procédé de traitement de la pollution résulte d'une combinaison de critères : le lieu du traitement (in-situ, ex-situ), l'action à conduire (stabilisation, extraction ou dégradation) et la technique à mettre en œuvre pour y parvenir (mécanique, chimique ou biologique). Ces trois paramètres sont extrêmement liés à la nature de la reconversion du site. En effet, les niveaux de dépollution exigés ne seront pas les mêmes si le site est pressenti par exemple pour être transformé en parking ou en zone résidentielle avec dans ce cas une activité humaine potentiellement en contact avec le sol »²⁹.

Les professionnels de la remédiation des sols pollués par des munitions explosives disposent de différentes méthodes : incinération, décapage, etc. Celles-ci sont très coûteuses à l'hectare, et nécessitent une seconde opération de traitement sur un site extérieur avant de ramener les sols après traitement, ou un remplacement complet du sol initial. De plus, le traitement dit physico-chimique produit des déchets et/ou des gaz de serre. Le décapage de la couche supérieure du sol à remédier engendre une déstructuration du sol et une érosion des mêmes sols. Enfin, ce traitement réduit l'activité biologique du sol initial car, soit les terres remédiées, soit celles qui seraient mises en place à titre de remplacement, ne contiennent plus ou pas les nutriments essentiels à la végétation locale.

Des méthodes plus récentes de remédiation des sols font appel à la biologie. Effectivement, des plantes et/ou des micro-organismes sont testés pour remédier les sols pollués par des métaux lourds mais aussi des molécules chimiques issues des matières explosives.

A la date de ce dossier, des essais en laboratoire ou sur des sites d'expérimentation sont effectués principalement aux Etats-Unis. Aucun déploiement opérationnel sur des zones larges, selon des critères définis par la communauté internationale de l'action humanitaire contre les mines, dans des pays en voie de développement ou émergents n'a été effectué.

L'utilisation des micro-organismes « serait efficace pour dégrader les polluants organiques mais la mise en œuvre de la dépollution nécessite des moyens techniques importants. De la même façon que pour les méthodes physico-chimiques, la mise en place de ces méthodes de bio-dépollution nécessite l'excavation des sols et leur traitement dans des bioréacteurs ou dans des aires de compostage. »²⁷

Depuis quelques années, les plantes sont aussi utilisées pour remédier les sols, les eaux intérieures et les nappes phréatiques pollués par les métaux lourds et/ou les molécules explosives. De fait, les plantes ont démontré leur actions directes ou indirectes sur les polluants en les absorbant ou en les dégradant. D'autres plantes stockent les polluants dans les racines, rhizomes, tiges et feuilles. Ces actions sont désignées par un terme général : phytoremédiation, et en ce qui concerne les molécules explosives, pourraient être définies comme phytodépollution. On parlera aussi de mycoremédiation ou mycodépollution en utilisant des champignons pour remédier des écosystèmes.

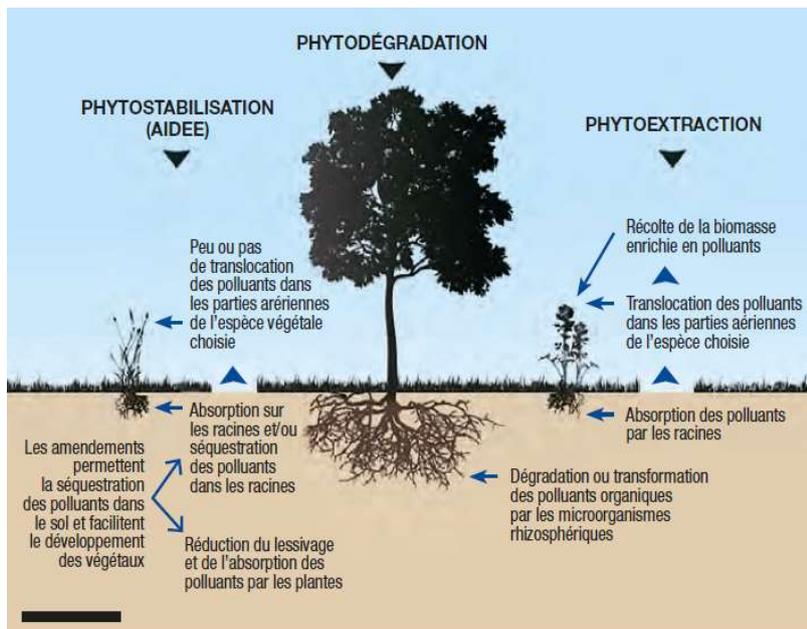
Dans le cadre de la phytodépollution on parlera de :

- Phytoextraction,
- Phytostabilisation,
- Phytodégradation ou Rhizo-dégradation,
- Phytotransformation, et
- Rhizofiltration.

La phytovolatilisation est apparue récemment pour traiter les pollutions par mercure ou sélénium.³⁰

Techniques de phytoremédiation ou phytodépollution

Le LAROUSSE définit la phytoremédiation comme la « *Méthode de dépollution des sols ou d'épuration des eaux utilisant l'activité métabolique des plantes (absorption et transformation des composés polluants)* ».



Le terme « phytodépollution » pourrait être définie comme « la dépollution des sols ou des eaux, pollués par des composés explosifs, en utilisant l'activité métabolique des plantes ».

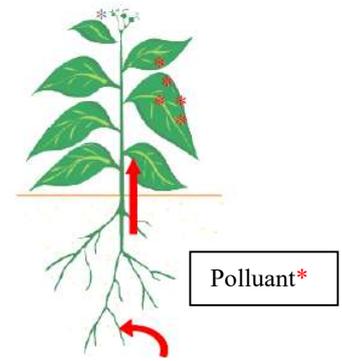
Les plantes peuvent soit filtrer, soit stocker, voir transformer les polluants constitués par des métaux lourds mais aussi des composés explosifs.

Les techniques de gestion de la pollution
 Les Phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués – INERIS –
 novembre 2018³¹

Phytoextraction (phytoaccumulation/phyto-filtration)

Méthode qui est fondée sur l'usage d'espèces végétales hyper-accumulatrices qui absorbent du sol, par les systèmes racinaires, les polluants, et les transportent dans leurs parties aériennes (feuilles),³² permettant une réduction des concentrations de polluants dans les sols. Des chélateurs³³ peuvent être ajoutés pour améliorer les capacités naturelles des plantes.³⁴

Cette méthode se révèle efficace pour une grande variété de métaux lourds mais a des limites car seuls les polluants assimilables par les végétaux sont « traités ». La possibilité de recyclage de ces métaux (phytomining) rendrait cette technique plus rentable³⁵ et évitera l'incinération ou le compostage des plantes « chargées ».

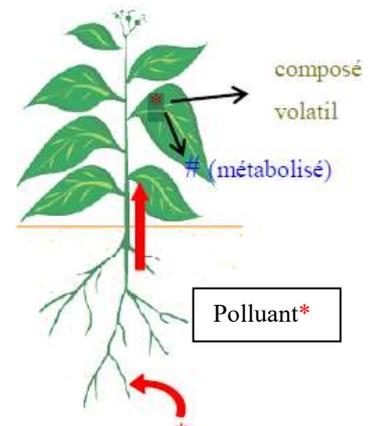


Source : M. Villa²⁹

Phyto-dégradation ou Phyto-transformation

Méthode qui est fondée sur la capacité de certaines plantes à absorber un polluant et de le dégrader. Les animaux peuvent aussi avoir cette compétence naturellement mais, alors que les animaux rejettent par les excréments ces résidus digérés, les plantes doivent dégrader totalement le polluant pour en obtenir un engrais favorable à leur croissance.

En l'absence de cette utilisation, les plantes stockent les polluants dans leurs cellules. Chez les animaux et les humains, les organismes étrangers insolubles ou peu solubles sont transformés majoritairement par le foie en composés solubles.

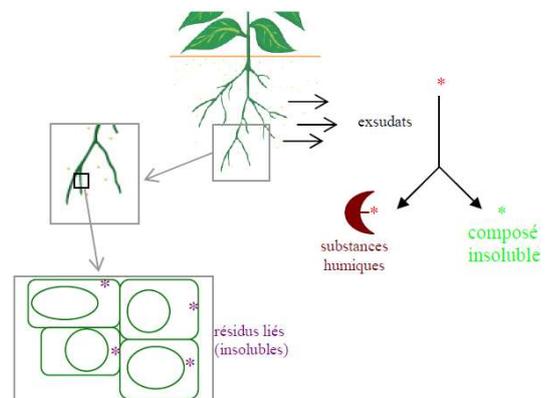


Source : M. Villa²⁹

Phyto-stabilisation

La phyto-stabilisation fournit une alternative au problème de contrôle de la contamination pour des polluants qui ne sont pas traités par les méthodes précédentes.

Elle repose sur le stockage des polluants en vue de limiter la dispersion dans l'environnement.



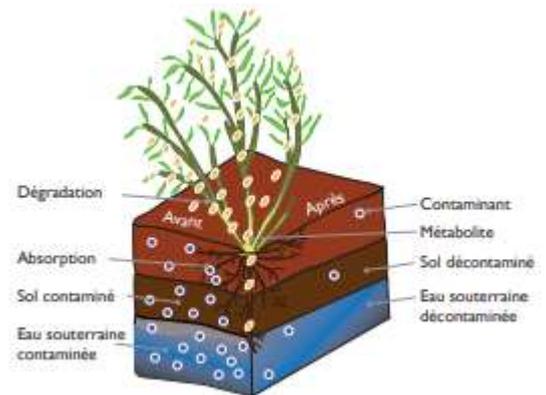
Source : M. Villa²⁹

Les plantes peuvent aussi être utilisées comme des pompes organiques pour absorber de grands volumes d'eau. Bien que le polluant ne pénètre pas dans la plante, il reste alors localisé dans la zone polluée initialement. Cela ne permet pas de diminuer la pollution dans le sol mais réduit la migration des contaminants vers les nappes phréatiques.

Phytodégradation ou Phytotransformation

Source : M. Villa²⁹

Dans ce cas, les plantes absorbent et dégradent les polluants dans les tissus ou sécrètent des enzymes relatifs aux rhizomes et son environnement (rhizosphère).

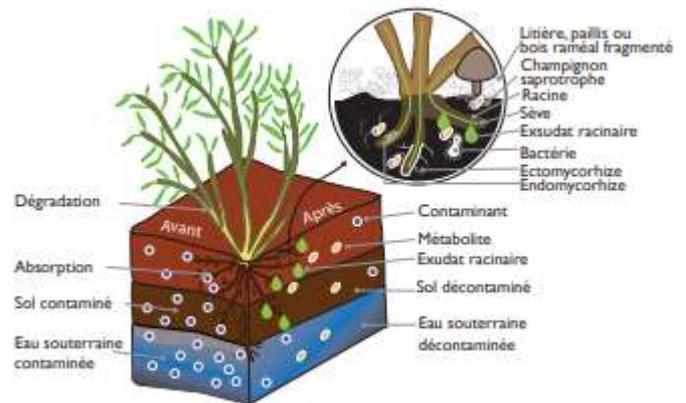


Phytodégradation. source³⁴

La Rhizodégradation ou phytostimulation

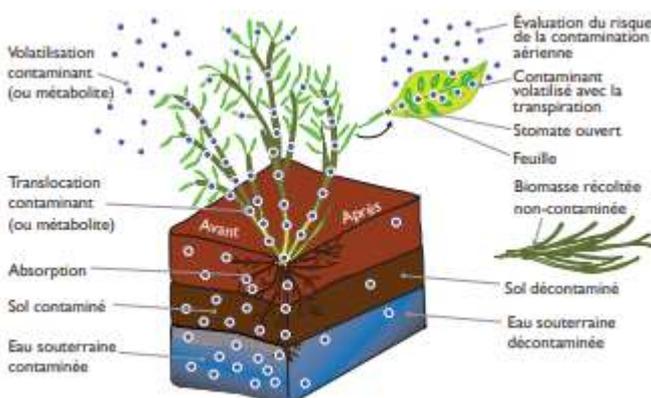
Qui exploite l'effet stimulant de la rhizosphère sur la dégradation microbologique des composés organiques³⁶.

Cette démarche est notamment utilisée depuis plusieurs années par l'armée américaine dans le cadre de la dépollution de sites contaminés par des explosifs (TNT) ou par des herbicides.



Rhizodégradation. source³⁴

La Phytovolatilisation



Phytovolatilisation. source³⁴

Les polluants organiques, et certains composés inorganiques, sont extraits du sol par les plantes, transportés dans leur système vasculaire, puis relargués dans l'atmosphère par transpiration. C'est une technologie intéressante parce que les polluants sont ainsi entièrement volatilisés (sous forme de gaz), et il n'est donc pas nécessaire de récolter, et de traiter les plantes utilisées. Par contre, le risque du transfert des polluants vers l'atmosphère doit être bien caractérisé avant d'entreprendre de la phytovolatilisation. Le

peuplier hybride peut par exemple volatiliser et dégrader rapidement du TCE présent dans une eau polluée³⁷.

Bioremédiation

Les techniques de bioremédiation utilisent les propriétés dépolluantes de micro-organismes (des bactéries essentiellement, mais également des champignons) endogènes ou exogènes au terrain contaminé³⁸ dans le but de dégrader ou transformer les contaminants à une forme moins contaminée.³⁹

Parmi ces techniques, on notera celles qui suivent⁴⁰ :

- Biodépollution ;
- Biotransformation ;
- Bioremédiation ;
- Bioaugmentation ;
- Biostimulation ;
- Bioventilation ;
- Compostage ; et
- Landfarming.

En 2009, un brevet intellectuel a été déposé⁴¹ concernant des plantes capables d'absorber des composants explosifs nitrés qui sont mises en culture puis, sont exposées à des microbes anaérobies dans la panse d'un animal ruminant. Ces microbes anaérobies ruminiaux décomposent les composants biodégradables et les rendent substantiellement non toxiques pour l'animal en quelques jours.

Critères de choix des plantes pour la phytodépollution



Dès le 16^{ième} siècle, on a découvert une plante qui poussait sur des sols riches en métaux. Des études menées au 19^e siècle ont permis de constater que cette plante - *Alyssum bertolonii*⁴² ou la *moutarde brune*⁴³ - était capable d'accumuler une forte teneur en métaux (nickel) provenant du sol où elle pousse. Mais d'autres plantes possédant les mêmes caractéristiques ont aussi été découvertes. Il a fallu attendre 1970 pour que cette capacité soit envisagée comme pouvant permettre une dépollution des sols.

Une plante est dite hyperaccumulatrice à partir d'une concentration dépendant du métal : plus de 1 000 mg/g de matière sèche dans les feuilles pour le nickel, plus de 10 000 mg/g pour le zinc. Pour évaluer cette hyperaccumulation, on utilise le coefficient de transfert défini par :

$$\frac{\text{Concentration du métal contenu dans les tissus aériens de la plante}}{\text{Concentration du métal contenu dans le sol}}$$

Plus ce coefficient est élevé, plus l'accumulation des métaux est importante.

Les plantes, dans un milieu contenant des métaux lourds peuvent adopter trois comportements⁴³ :

- Un prélèvement faible des métaux. La plante contrôlerait leur non-absorption au niveau de la racine. Il existe une valeur maximale de tolérance au-delà de laquelle le végétal meurt.
- Un prélèvement proportionnel à la quantité en métaux présents dans le sol. La plante est alors qualifiée d'indicatrice puisqu'elle reflète les quantités présentes dans celui-ci.
- L'hyperaccumulation des métaux dans les parties aériennes de la plante. Les mécanismes d'absorption sont actifs.

Métal	Limite inférieure (% en matière sèche de feuilles)	Nombre d'espèces	Nombre de familles
Cadmium	> 0,01	1	1
Cobalt	> 0,1	28	11
Cuivre	> 0,1	37	15
Plomb	> 0,1	14	6
Manganèse	> 1,0	9	5
Nickel	> 0,1	317	37
Zinc	> 1,0	11	5
Thallium	> 0,1	2	1

Tableau montrant le nombre de familles et de variétés concernées par l'hyperaccumulation source¹⁵

Phytodépollution des RDX et TNT

La contamination actuelle des sols et des eaux de ruissellement par le RDX et le TNT est étendue et représente un problème écologique mondial qui a débuté par suite des activités militaires intenses lors de la Première Guerre Mondiale. L'estimation du danger environnemental posé par le RDX et le TNT a permis de déterminer que les sols contaminés contenaient souvent des mélanges de composés énergétiques plutôt qu'un seul explosif. Les autres contaminants peuvent être des esters nitrés (nitroglycérine, nitrocellulose), des co-produits et des intermédiaires de synthèse, et des produits résultants d'une dégradation microbienne partielle dans le sol²⁹.

Explosif	Eaux profondes (µg/L)	Eaux de surfaces (µg/L)	Sédiments (mg/kg)	Sols (mg/kg)
TNT	0,4-21960	1-3375	6,7-711000	0,08-87000
RDX	0,5-36000	2,6-224	1-43000	0,7-74000

Niveaux de contaminations par matières explosives retrouvées sur des sites militaires⁴⁴

Dans le cas des explosifs, la phytodépollution semble être une alternative adaptée pour pallier les défauts des autres méthodes. Elle peut aussi être utilisée en complément des méthodes plus classiques. Les études préalables de phytodépollution du RDX et du TNT ont montré que les plantes sont capables d'absorber et de métaboliser ces deux explosifs.

Le peuplier⁴⁵ est couramment utilisé aux Etats Unis pour traiter des zones polluées par RDX et/ou du TNT. Une attention particulière doit porter sur la chute des feuilles chargées en polluants qui reviendrait dans le sol si ces feuilles ne sont pas ramassées et détruites. Le brûlage des feuilles ne réduit pas complètement le RDX qui passera ainsi du sol à l'air ! **Pour** le TNT, restant dans le système racinaire, il sera nécessaire d'arracher l'arbre et ses racines concentrant le polluant.

Les plantes agronomiques possèdent toutes un mécanisme d'absorption et de transfert divers. Pour une pollution en milieu humide, le riz sera utilisé. Concernant le RDX, le blé, le maïs et le soja ont été testés. Le blé est à privilégier car sa capacité d'absorption (174 kg/ha) est la plus importante de ces plantes puis le soja, le maïs et le riz. Pour le TNT, ce sera le maïs.³⁶

Des plantes lacustres ont été testées avec 500 et 1000mg/kg de concentration en RDX : la massette (*Typha latifolia*), le scirpe lacustre (*Scirpus lacustris*), l'iris d'eau (*Iris pseudoacorus*), le phalaris roseau (*Phalaris arundinacea*), le roseau (*Phragmites communis*) et le carex (*Carex riparia*). Ces plantes ont la capacité de croître dans des conditions correspondant à celles retrouvées dans les lagunes contaminées.³⁶

Pour pallier les limitations des plantes sauvages ou naturellement cultivées, certaines ont été génétiquement modifiées pour améliorer la phytoremédiation.

Avantages et inconvénients de la phytodépollution

Le CEA⁴⁶ définit d'une manière simple les avantages et inconvénients de la phytoremédiation des sols comme suis :

Avantages :

- Faibles coûts de traitement (10 à 100 fois inférieurs aux technologies classiques) ;
- Adaptation aux grandes superficies contaminées (dizaines d'hectares) ;
- Récupération des polluants ;
- Conversion possible de la biomasse en énergie ;
- Technologie visuellement attractive ;
- Faible perturbation du milieu contaminé ;
- Technologie verte ayant une bonne image auprès du public.

Inconvénients :

- Limitation aux surfaces colonisables par les racines ;
- Temps de traitement très long (minimum 3 ans) ;
- Dépendance de la nature du sol, de la météorologie, des attaques d'insectes, des micro-organismes... ;
- Besoin de grandes superficies et d'une pollution peu profonde (de 50 cm à 3 m) ;
- Application pour des contaminations modérées pour que la plante survive.

Conclusion

Traiter une zone polluée par des munitions explosives faisant suite à un accident au sein d'un dépôt de munitions, un Reste explosif de guerre (REG) dans une zone dangereuse confirmée (ZDC) ou un engin explosif improvisé (EEI), est une activité NEDEX spécifique. Effectivement, les munitions qui sont initialement stockées en position de sécurité, ne sont pas armées même si les systèmes d'amorçage sont « à poste » car, dans ce cas, la présence d'une sécurité empêche un fonction « normal » et intentionnel. Par contre, un REG et/ou un EEI sont généralement amorcés et parfois armés (exceptés les munitions abandonnées qui ne seront qu'amorcées).

L'explosion engendre un effet de chaleur, de souffle, de surpression et de projection d'éclats primaires et secondaires, mais aussi de munitions qui n'ont pas explosées immédiatement sous l'effet de l'explosion. Les munitions stockées qui subissent ces effets seront projetées à l'intérieur, et/ou à l'extérieur, du magasin de stockage. En fin de projection, la munition rencontre le sol, ou une surface plus ou moins dure, provoquant des ruptures partielles ou totales des enveloppes externes, comme des constituants internes, en sensibilisant les matières actives non explosées ainsi que les mécanismes de sécurité. Dans le cas de REG, ce sont des munitions qui ont été posées, lancées ou jetées voir tirées et qui auraient dû fonctionner selon un processus initialement prévu par le concepteur et l'utilisateur. En ce qui concerne les EEI, généralement, les munitions sont issues des stocks ou des REG.

Comme expliqué dans le dossier, les munitions sont des ensembles de composés chimiques et de métaux lourds. Les effets de l'explosion, et/ou l'action de l'environnement sur les REG et EEI, vont accélérer leur dégradation. Cela produira des éléments microscopiques qui seront soumis aux conditions météorologiques du site. Le soleil et le vent, les projections de sables (zones désertiques) vont altérer les métaux et, la pluie comme les inondations, vont faire pénétrer dans les sols ces polluants chimiques.

Avec le temps, les polluants vont rendre les sols stériles, et vont se concentrer sur les végétaux au travers des systèmes racinaires et/ou des feuilles et systèmes aériens des plantes. Cette pollution génère un cycle de contamination : les animaux se nourrissent de plantes et d'eaux contaminées, et les êtres humains consomment la viande des animaux eux aussi contaminés, y compris les poissons vivant dans des eaux polluées ; cela aboutit à terme à la contamination de tout l'environnement. Les impacts sanitaires sont évoqués dans ce dossier.

Tous ces éléments militent pour que toute pollution pyrotechnique par munitions explosives, quel qu'en soit la cause, soit traitée le plus rapidement possible pour réduire les impacts pyrotechniques comme environnementaux.

La dépollution doit viser la disparition du risque lié à une explosion inattendue, fatale aux êtres vivants comme aux installations, mais ne doit pas occulter le risque environnemental. La réduction de ce dernier doit passer par un retrait complet des polluants soit physiquement soit avec des méthodes de phytodépollution.

Une autre problématique est identifiable lors des destructions sur place des munitions. Effectivement, outre le coût financier lié à l'achat de matière explosive de destruction, les critères de sécurité liés au transport et au stockage mais aussi lors de leur utilisation, les destructions sur place doivent être limitées aux munitions dangereuses non-déplaçables. Dans la majorité des situations, les organisations d'action contre les mines devraient favoriser les destructions « en fourneau », sur des sites dédiés qui pourraient être remédiés à la fin de leur utilisation, ou après un délai fixé par contrat par l'autorité nationale.

Enfin, des équipements technologiques permettent de détecter la présence ou non des métaux lourds ou des molécules explosives dans le sol, l'air et l'eau. Ils devraient être inclus dans les appels à projet accompagnés d'une Procédure Opérationnelle Permanente pour expliquer leur usage dans le cadre d'une remédiation de l'environnement dépollué pyrotechniquement.

Mais il serait aussi souhaitable de prendre en considération le brûlage des cartouches pour armes légères et portatives, comme celui des armes à feu. Les cartouches sont aussi des générateurs de pollution chimique des sols, comme le brûlage des armes à feu. La combustion ne détruit que peu les polluants qui sont diffusés dans l'air, le sol et l'eau avec tous les impacts environnementaux en rapport.



Références

- ¹ <http://www.smallarmssurvey.org/fileadmin/docs/V-Fact-sheets/SAS-Fact-Sheet-UEMS-FR.pdf>
- ² <http://www.smallarmssurvey.org/weapons-and-markets/stockpiles/unplanned-explosions-at-munitions-sites.html>
- ³ Remediation of Explosives Contaminated Soils at Joliet Army Ammunition Plant via Windrow Composting. <https://www.researchgate.net/publication/265623100>
- ⁴ <https://www.un.org/press/fr/2015/ag11688.doc.htm>
- ⁵ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/>
- ⁶ https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/fr/theiso14000family_2009.pdf
- ⁷ IMAS 07.13. <https://www.mineactionstandards.org>
- ⁸ IMAS 04.10. <https://www.mineactionstandards.org>
- ⁹ IMAS 07.13. <https://www.mineactionstandards.org>
- ¹⁰ IATG 11.30. <https://www.un.org/disarmament/un-safeguard/guide-lines/>
- ¹¹ TN 09.30.02. <https://www.mineactionstandards.org>
- ¹² http://www.ilocis.org/fr/documents/ILO104_32.htm
- ¹³ <https://www.atsdr.cdc.gov> - <https://doi.org/10.1080/23779497.2017.1369358>
- ¹⁴ <https://www.senat.fr/rap/l00-261/l00-26150.html#fn25>
- ¹⁵ <https://sites.google.com/site/tpeexplosifsmilitaires/>
- ¹⁶ Phillips, L., & Perry, B. (2002). Assessment of potential environmental health risks of residues of high-explosive munitions on military test ranges – Comparison in a humid and arid climate. *Fed Fac Env J Spring*, 7–25. doi:10.1002/ffej.10021
- ¹⁷ IATG 07.20 – Surveillance et épreuve des munitions en service. https://s3.amazonaws.com/unoda-web/wp-content/uploads/2017/01/07_20-française.pdf
- ¹⁸ <https://www.who.int/features/qa/one-health/fr/>
- ¹⁹ https://documentation.ehesp.fr/memoires/2004/jgs_ase/05-tungstene.pdf
- ²⁰ https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/sujet_2016_t3s_partie_2.pdf
- ²¹ <http://www.journaldelenvironnement.net/article/les-ions-perchlorate-un-danger-pour-les-enfants,50637>
- ²² http://next.owlapps.net/owlapps_apps/articles?id=1080352
- ²³ http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestiseng
- ²⁴ https://www.who.int/ionizing_radiation/pub_meet/en/DU_French.pdf?ua=1
- ²⁵ Sanderson, H., Fauser, P., Stauber, R., Christensen, J., Løfstrøm, P., & Becker, T. (2017). Civilian exposure to munitions-specific carcinogens and resulting cancer risks for civilians on the Puerto Rican island of Vieques following military exercises from 1947 to 1998. *Global Security: Health, Science And Policy*, 2(1), 39-60. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23779497.2017.1369358>
- ²⁶ IMAS 09.10 et 09.11. <https://www.mineactionstandards.org>
- ²⁷ United States Environmental Protection Agency. www.epa.gov. Hazardous Substance Superfund avec un budget de 1,074 million de US\$ en 2019. Soit 17,5% du budget annuel de protection de l'environnement.
- ²⁸ Nitro-based explosive remediation. Propriété intellectuelle 20110052537 - A. Morrie Craig (Corvallis, OR, US) Karen Walker (Philomath, OR, US) Sudeep Perumbakkam (Corvallis, OR, US) Jennifer Duringer (Brownsville, OR, US) Marthah Delorme (Corvallis, OR, US) – 2011
- ²⁹ Mireille VILA - Utilisation de plantes agronomiques et lacustres dans la dépollution des sols contaminés par le RDX et le TNT : approches en laboratoire – Thèse soutenue le 15 décembre 2006
- ³⁰ https://www.researchgate.net/publication/314087981_Les_techniques_de_depollution_des_sols_contamines_par_les_métaux_lourds
- ³¹ https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Dossiers/INERIS_Dossier%20Phyto_BDder.pdf
- ³² S.P.McGrath. In: R.R. Brooks (Eds.). CABI Publishing, Wallingford (1998)
- ³³ <https://www.doctissimo.fr/sante/dictionnaire-medical/agent-chelateur>
- ³⁴ <http://www.phytotechno.com/wp-content/uploads/2018/04/fiches-Phytoremediation.pdf>
- ³⁵ M. Leblanc, D. Petit, A. Deram, B.H. Robinson, R.R. Brooks. *Economic Geology*, 94, 109-114 (1999)

- ³⁶ [I. Kuiper, E.L. Lagendijk, G.V. Bloemberg, B.J.J. Lugtenberg. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 17, 6-15 \(2004\)](#)
- ³⁷ Newman, L. A.; Strand, S. E.; Choe, N.; Duffy, J.; Ekuan, G.; Ruszaj, M.; Shurtleff, B. B.; Wilmoth, J.; Heilman, P.; Gordon, M. P., Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars. *Environmental Science & Technology* 1997
- ³⁸ R. Boopathy. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, 29-36 (2000)
- ³⁹ M. Vidali. *Pure and Applied Chemistry*, 73, 1163-1172 (2001).
- ⁴⁰ http://www.pierre-armand-roger.fr/publications/pdf/198_bioremed.pdf
- ⁴¹ <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2009026184>
- ⁴² <https://academic.oup.com/jxb/article/52/365/2291/543836>
- ⁴³ <https://sites.google.com/site/tpesurlaphy-toremediation/La-depollution-des-metaux-lourds>
- ⁴⁴ Nitroaromatic Munition Compounds: Environmental Effects and Screening Values. Sylvia S. Talmage, Dennis M. Opresko, Christopher J. Maxwell, Christopher J. E. Welsh, F. Michael Cretella, Patricia H. Reno, F. Bernard Daniel, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4757-6427-7_1
- ⁴⁵ Projet BIOFILTREE de l'ADEME. Site INERIS.fr
- ⁴⁶ <http://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/posters/defis-du-CEA-infographie-phytoremediation.pdf>

Légendes images/schémas

Pages 12 et 25 – BRGM -

[http://infoterre.brgm.fr/rapports//https://www.researchgate.net/publication/265623100 - D. Hude](http://infoterre.brgm.fr/rapports//https://www.researchgate.net/publication/265623100-D.-Hude)

Autres Références

- ADEME – Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués - <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/phytotechnologies-ademe-2013-1463054029.pdf>
- Biological remediation of explosive residues - <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-01083-0>
- Bioremediation of explosives – Contaminated soils : a status review - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830500000512>
- Biodegradation of nitroaromatic compounds. <https://pdfs.semanticscholar.org/01f9/7f4e5a99b91667d5385ba96edb193f1e5e24.pdf>
- Defense Explosives Safety Regulation 6055.09 Edition 1 ~ DESR 6055.09, Edition 1 ~ January 13, 2019. <https://www.denix.osd.mil/ddes/home/home-documents/desr-6055-09-edition-1/>
- Defense R&D Canada – Evaluation of heavy metals contamination at CFAD Dundum resulting from SALW incineration - <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a396586.pdf>
- Environment handbook for Defence materiel - https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/DEFSTAN-00-035-PT4-5-2018-2018-369772_SAIG_DEFSTAN_DEFSTAN_842340/
- EPA – Phytoremediation resource guide - <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/phytoresguide.pdf>
- Estimates for explosives residue from the detonation of army munitions – <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a417513.pdf>
- FRTR - Remediation technologies screening matrix and reference guide, V4.0 - https://frtr.gov/matrix2/section2/2_10_2.html
- Handbook on the Management of Munitions Response Actions – EPA-505-B-01-001 – 2005. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/9530610.pdf>

- Handbook on the management of ordnance and explosives at closed, transferring, and transferred ranges and other sites - <https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/ifuxoctthandbook.pdf>
- Journal of environment management – Phytoremediation of explosives (TNT, RDX, HMX) by wild-type and transgenic plants - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479712004240?via%3Dihub>
- Phytoremediation of Lead contaminated soils using vetiver grass - <https://jels.ub.ac.id/index.php/jels/article/view/260/296>
- Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil - <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-003-1425-1>
- Remediation of explosives contaminated soils at Joliet Army Ammunition Plant via windrow composting - <https://pdfs.semanticscholar.org/f03d/7eacc11c92e776f27bb899ce777c668e4fbe.pdf>
- SW-846 Method 8330B – Nitroaromatics, Nitramines, and Nitrate Esters by high performance liquid chromatography (HPLC) - <https://www.epa.gov/esam/epa-method-8330b-sw-846-nitroaromatics-nitramines-and-nitrate-esters-high-performance-liquid>
- Technical guidance for military munitions response actions – EM 200.1.15 – 2015. https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_200-1-15.pdf
- Weathering of Lead bullets and their environmental effects at outdoor shooting ranges - <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12708676>
- 2,4,6-Trinitrotoluene transformation using *Spinacia aleracea*. C.P. Richardson and E. Bonnati.