

Éliminer les agents de la menace NRBCe

Résumé Les eaux destinées à la consommation humaine (EDCH), communément appelées « eau potable », constituent une cible potentielle pour l'introduction d'agents de la menace NRBCe, qu'il s'agisse d'actes malveillants délibérés ou de contaminations accidentelles secondaires à un événement proche des ressources, des installations de traitement ou de distribution. Face à cette menace, il importe de disposer d'outils dédiés de surveillance et de détection mais également, si l'introduction n'a pas pu être évitée dans la ressource, de connaissances relatives au comportement de ces agents dans les filières de traitement, ultime étape de potabilisation avant la mise en distribution. Ces connaissances permettront, considérant les concentrations d'agents dans l'eau brute, d'autoriser une éventuelle consommation de l'eau malgré une contamination en amont des filières. Elles permettent également un choix raisonné de filière de traitement en fonction des types de menaces. Une description rapide des pratiques et connaissances dans ce domaine est proposée dans cet article, avec un focus particulier sur les filières de traitement utilisées par les armées dans le cadre de la potabilisation de l'eau sur le terrain.

Mots-clés **Traitement de l'eau potable, agents NRBCe, performances, évaluation des risques.**

Abstract **Water under threat: eliminate CBRNe agents**

Water intended for human consumption (commonly referred as "drinking water") is a potential target for the introduction of CBRNe threat agents, whether through deliberate malicious acts or accidental contamination following an event close to the resources, treatment or distribution facilities. To face this threat, it is important to have dedicated monitoring and control tools but also (if introduction into the resource could not be avoided) knowledge of the behavior of these agents in treatment processes, the last stage in the potabilization process before distribution. This knowledge will make it possible, considering the concentrations of agents in raw water, to authorize consumption of water despite contamination upstream of the treatment process. It also enables the right choice of treatment process, depending on the type of threat. A brief description of practices and knowledge in this field is proposed in this article, with a particular focus on the treatment processes used by the armed forces to treat drinking water in the field.

Keywords **Drinking water treatment, CBRNe agents, performance, risk assessment.**

Capacité des filières de traitement d'eau de terrain : référentiels

Tester l'efficacité de filières de traitement des EDCH pour les agents NRBCe nécessite, en phase de vérification des performances et d'acceptation des résultats, de disposer d'une liste de valeurs limites acceptables pour l'eau traitée et, donc, bue. Par définition, ces valeurs sont souvent absentes des réglementations civiles, à l'exception de certains agents industriels comme par exemple le cyanure, pour lequel la réglementation nationale fixe une limite de qualité à 50 µg/L. Il existe également des valeurs limites pour les paramètres radioactifs, mais basés sur une contamination « naturelle » des eaux [1].

Pour les agents de la menace, il convient d'utiliser des référentiels militaires, le plus connu d'entre eux étant l'AMedP-4.9 (couvert par le STANAG 2136) qui définit les standards minimaux de qualité de l'eau en opération, pour toute opération de l'OTAN, et notamment des standards en situation accidentelle de contamination par des agents NRBCe [2]. À titre d'exemple, les normes minimales en situation d'urgence pour la consommation d'eau à court terme (*tableau 1*) reprennent les valeurs limites pour certains agents de la menace chimique et radiologique, et pour une durée maximale de consommation de 7 jours.

Pour le cas particulier de la radioactivité, selon les radionucléides, ce standard précise que le principe ALARA (« as low as reasonably achievable ») devra être respecté, mais qu'une dose totale engagée jusqu'à 100 mSv pour des activités prioritaires, ou 250 mSv pour des activités vitales, pourrait

servir de guide. Il précise également les radionucléides type considérés pour le calcul.

La nécessaire utilisation de similis

La littérature militaire disposant de valeurs limites après traitement des EDCH, la qualification de certaines filières de traitement peut être requise, en particulier lors des tests de matériels destinés à être utilisés sur le terrain, en situation opérationnelle. En pratique, dans la littérature, on constate que la majorité des tests est réalisée en utilisant des similis, c'est-à-dire des substances biologiques ou chimiques dont la toxicité (ou la pathogénicité pour les agents biologiques) est modérée, qui sont manipulables par des industriels ou des laboratoires non spécialement autorisés, mais possédant des propriétés proches des agents de la menace, de telle sorte que les résultats obtenus avec ces similis peuvent raisonnablement être extrapolés aux agents réels [3,4].

Le choix des similis est habituellement basé sur une équivalence des paramètres influant l'efficacité de la filière de traitement : pour les agents biologiques et l'ultrafiltration, par exemple, un agent de même taille que l'agent de la menace sera utilisé, l'hypothèse étant que les agents biologiques sont retenus essentiellement par un processus de filtration, dépendant de la taille des micro-organismes.

Il existe également quelques laboratoires dans le monde à même d'effectuer les tests sur des agents réels : cette pratique a notamment été rapportée pour les agents chimiques,

Composé	Unité	Valeur limite pour une consommation de 5 L/j	Valeur limite pour une consommation de 15 L/j
Ypérite au soufre	mg/L	0,140	0,047
Lewisite (exprimé en arsenic)	mg/L	0,080	0,027
Agents neurotoxiques	mg/L	0,012	0,004
Toxines T2 (tricothécènes)	mg/L	0,026	0,008 7
Alpha total	Bq/L	28 500	9 500
Bêta total	Bq/L	255 000	85 000
Gamma	Bq/L	300 000	100 000

Tableau I - Valeurs limites pour certains agents de la menace NRBCE [2].

Substance	Type de matrice	Concentration dans l'eau brute (mg/L)	Concentration dans l'eau traitée (mg/L)	Réduction moyenne (%)
BZ	Eau salée	11,0	0,023	99,8
BZ	Eau douce	16,5	0,036	99,8
VX	Eau douce	16,4	1,25	92,4
VX	Eau salée	19,3	1,34	92,9
GB	Eau douce	15,8	0,24	98,5
GB	Eau salée	5,9	0,04	99,4
GA	Eau douce	5,8	1,69	71,0
GA	Eau salée	7,5	0,03	99,6
HD	Eau douce	3,4	0,0	100,0

Tableau II - Résumé de certains résultats d'épuration de toxiques de guerre par distillation/compression [6].

avec le VX ou le sarin, mais ces tests sont beaucoup moins nombreux et accessibles [5,6].

- Pour les agents biologiques, une bactérie ubiquitaire (*Escherichia coli*) et un bactériophage (MS-2) pour simuler les virus sont souvent proposés. Il s'agit également des conditions de test de performances d'épuration microbiologique requises par l'OMS pour la validation de matériels destinés à la production d'eau en situation d'urgence, l'OMS n'ayant pas de requis chimiques [7]. Le protocole OMS prévoit également l'ajout d'un protozoaire (oocystes de *Cryptosporidium parvum*), dont l'équivalent en agent de la menace militaire n'existe pas réellement.

Enfin, il n'est pas proposé de simili des toxines.

- Pour les agents radiologiques, les simili les plus fréquemment rencontrés, et les plus adaptés, sont les isotopes non radioactifs des radionucléides d'intérêt. On trouvera donc habituellement l'iode et le césium pour tester les performances de filières de traitement de l'eau à visée opérationnelle. Signalons que le radium, qui n'a pas d'isotope stable, peut également être utilisé.

- Pour les agents chimiques, le simili le plus classique de l'ypérite au soufre est le thiodiglycol, composé par ailleurs pertinent puisqu'étant le produit d'hydrolyse de l'ypérite, sa présence dans une ressource d'eau brute est possible (l'ypérite au soufre est peu soluble dans l'eau). Pour les neurotoxiques organophosphorés, notamment pour le VX et le soman, la littérature décrit l'utilisation respectivement de malathion et de diphenylchlorophosphate [3]. D'autres esters de l'acide phosphorique, solubles, modérément toxiques et commercialement accessibles peuvent être utilisés. Enfin, bien qu'il ne s'agisse pas *stricto sensu* d'un agent de la menace militaire, il peut être pertinent d'ajouter le cyanure aux protocoles de tests.

Principaux résultats par type de filière de traitement

La pré-chloration n'étant pas une technique habituelle de traitement sur le terrain, l'efficacité de concentrations importantes de chlore (notion de C.t: concentration et temps de contact) sur les agents de la menace ne sera pas décrite. Les lecteurs pourront trouver de nombreux résultats expérimentaux, principalement contre des agents microbiologiques et les toxines, dans la littérature scientifique [8,9]. À l'inverse, peu de résultats contre des agents chimiques sont accessibles en littérature ouverte.

L'efficacité sur les agents de la menace des systèmes de bouilleurs à basse pression a été peu documentée également, même si la nature du procédé laisse peu de doute sur les agents biologiques et les sels non volatils. Une publication nord-américaine de 1963 concernant une installation de distillation/compression [6] rapporte certains résultats (tableau II). On notera que la distillation/compression seule est insuffisante pour assurer la potabilisation de beaucoup de toxiques organophosphorés. Cette publication rapporte également les résultats d'efficacité d'un traitement de l'eau par charbon actif ou résine échangeuse d'ions, le charbon actif étant efficace contre les neurotoxiques organophosphorés.

Concernant l'ultrafiltration, l'OMS décrit de nombreux dispositifs à même d'atteindre le niveau le plus élevé d'épuration microbiologique, à savoir 4 log de réduction pour les bactéries, 5 log pour les virus et 4 log pour les protozoaires [10]. Les auteurs ont également testé récemment un matériel d'ultrafiltration confirmant les excellentes performances pour l'épuration microbiologique (et la turbidité).

Sans surprise cependant, en raison de la technologie utilisée, aucun abattement n'est attendu pour les ions et/ou les petites molécules chimiques [11].

Substance	% d'élimination
T-2	100
Microcystine	100
Ricine	100
Saxitoxine	100
GB	> 99
VX	> 99
BZ	> 99
Iode 131	> 95
Strontium 85	> 99
Césium 134	> 98

Tableau III - Résumé des performances d'élimination d'agents de la menace NRBCe par osmose inverse [5].

Concernant l'osmose inverse enfin, dont les performances d'efficacité sont globalement parmi les plus élevées, le document américain TBMed577 rapporte les résultats réunis dans le tableau (tableau III). En cohérence avec ces résultats, les auteurs de cet article ont mesuré un abattement de 98,6 % en passage simple sur membrane d'osmose inverse, et de 99,9 % en passage double (l'eau repasse une seconde fois dans les membranes), pour les similis de moutarde au soufre et d'organophosphorés au moyen d'une installation de production d'EDCH mobile projetable [12].

Des solutions opérationnelles

Les résultats présentés ici, bien que partiels, suggèrent que l'élimination des agents biologiques de la menace (hors toxines) dans les EDCH est un enjeu plus limité : la chloration et les procédés membranaires sont très majoritairement efficaces pour ce type d'agents, y compris l'ultrafiltration. Pour les agents chimiques (dont les toxines), l'ultrafiltration n'est pas efficace, le charbon actif peut présenter une efficacité relative, la compression/distillation également, mais les meilleures performances sont obtenues avec l'osmose inverse. Pour les radionucléides enfin, en raison de leur caractère souvent ionisé, parmi les filières présentées ci-avant, seule l'osmose inverse est efficace : l'échange d'ions s'est également avéré efficace à la suite d'accidents technologiques impliquant des radionucléides, mais il ne s'agit pas d'une filière classique de traitement des EDCH sur le terrain. Notons enfin que l'efficacité des procédés de pré-traitement seuls (filtration, coagulation) est peu décrite pour les agents de la menace.

[1] Arrêté du 30/12/22 modifiant l'arrêté du 11/01/07 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du Code de la Santé publique.

[2] Nato Standard AMedP-4.9 (STANAG 2136), *Requirements for water quality during operations*, 2022, ed. B(v1).

[3] J.A. Brame, V.F. Medina, I. Smith, L. Procell, Composition of CBRN decontamination effluent and development of surrogate mixtures for testing effluent treatment technologies, *Report ERDC/EL SR-16-2*, 2016.

[4] B. Singh *et al.*, Active carbon for removal of toxic chemicals from contaminated water, *Carbon*, 1996, 34(3), p. 327-330.

[5] Headquarters, Departments of the army, navy and air force, Sanitary control and surveillance of field water supplies, *Techn. Bul. Med.*, 2010, 577.

[6] Department of the army, US Army mobility command, Removal of chemical warfare agents from water by vapor compression distillation, *Research Report*, 1963, 1749.

[7] World health organization, WHO international scheme to evaluate household water treatment technologies. Harmonized testing protocol: technology non-specific, 2018, v2.1.

[8] W. Burrows, S. Renner, Biological warfare agents as threats to potable water, *Env. health persp.*, 1999, 107(12), p. 14-21.

[9] M. Boni, P. Orlandini, A. Karom, O. Koehle, G. Bornert, Contamination intentionnelle des eaux par des toxines, *Médecine et Armées*, 2010, 38(3), p. 221-228.

[10] www.who.int/tools/international-scheme-to-evaluate-household-water-treatment-technologies/products-evaluated (consulté le 8/02/24).

[11] P. Couvreur, P. Orlandini, L. Stybel, J.-U. Mullot, Performance test of the mobile filtration device ORISA, communication affichée à l'occasion du 3^e symposium « Mobile Water Supply on Operations », 2023.

[12] S. Lefèvre, Maîtrise des risques chimiques, nucléaires et radiologiques lors de production d'eaux destinées à la consommation humaine à bord des bâtiments de la marine nationale : essais de qualification du nouveau système de production mobile, *Mémoire M2 « Sciences et technologies, santé publique et sciences sociales, risques sanitaires RBCE*, 2022.

Stéphane LEFEVRE^{1*}, vétérinaire en chef,
Jean-Ulrich MULLOT², pharmacien en chef,
et **Mickaël BONI**³, vétérinaire en chef.

¹ Direction centrale du service de santé des armées, Paris.

² Direction centrale du service de santé des armées, Paris.

³ Institut de recherche biomédicale des armées, Brétigny-sur-Orge.

*stephane1.lefevre@intradef.gouv.fr

