

Contamination intentionnelle des eaux par des toxines.

M. Boni ^a, P. Orlandini ^b, A. Karom ^c, O. Koehle ^d, G. Bornert ^e.

a Direction régionale du Service de santé des armées de Saint-Germain-en-Laye, base des Loges, BP 40202 – 78102 Saint-Germain-en-Laye Cedex.

b Direction régionale du Service de santé des armées de Bordeaux, 5 rue Saint Nicolas – 33000 Bordeaux.

c École royale de cavalerie des forces armées royales, 12000 Témara – Maroc.

d Direction régionale du Service de santé des armées de Metz, Caserne Ney, BP 90007 – 57044 Metz Cedex 1.

e Direction régionale du Service de santé des armées de Brest, BCRM Brest, CC5 – 29240 Brest Cedex 9.

Résumé

L'eau est un vecteur habituel de contaminants accidentels, en particulier d'agents biologiques ou de toxines. Ce risque biologique naturel s'est illustré dans l'histoire par des épidémies de choléra ou de fièvres typhoïdes, ou plus récemment par des morts d'animaux liées aux cyanotoxines produites par des cyanobactéries en grande quantité dans l'eau. L'utilisation potentielle des toxines dans le cadre du bioterrorisme ou de la réalisation de « biocrimes » a été évoquée. Il n'existe que peu de données dans ce domaine sensible. Malgré tout, la maîtrise de ce risque intentionnel nécessite de posséder des informations précises sur ces agents, pour envisager leur détection, leur destruction ou leur élimination en cas de contamination de l'eau, et de connaître l'efficacité des systèmes de traitement d'eau utilisés en métropole et en opération extérieure.

Mots-clés : Bioterrorisme. Eau. Ricine. Botulisme. Risque biologique. Toxine.

Abstract

INTENTIONAL CONTAMINATION OF WATER BY TOXINS.

Water is known as a usual vector for accidentally contaminating in particular biological agents and toxins. This natural biological risk has been historically exhibited in epidemics of cholera and typhoid fevers, or more recently in animals deaths caused by cyan toxins produced from a large amount of cyan bacteria in water. The possible use of toxins as a weapon for bioterrorism or bio crimes was suspected in the past. There only are few data about this sensitive topic. Nevertheless the control of this intentional risk requires precise data in order to detect, destroy or remove these agents when water is contaminated and to be aware of the efficiency of water treatment systems used in France and in foreign operations.

Keywords: Bioterrorism. Water. Ricin. Botulism. Biological risk. Toxin.

Introduction.

L'eau est identifiée de longue date comme un vecteur possible d'agents biologiques ou de toxines. Durant l'antiquité, Grecs, Romains et Perses polluaient les puits, et autres sources d'eau potable de leurs ennemis, avec des cadavres d'animaux. Cette méthode fut encore utilisée durant des siècles, par exemple en 1155 par Barberousse,

à la bataille de Tortona, ou en juillet 1863, pendant la guerre de Sécession, par le général Johnston. L'histoire des agents biologiques ou chimiques se confondait alors avec celle des conflits.

Plus récemment, des animaux en France sont morts à cause de cyanotoxines produites en grande quantité dans l'eau par des cyanobactéries. Cet épisode a rappelé toute l'actualité du risque naturel lié aux eaux.

Depuis les attentats du 11 septembre 2001, les actes de terrorisme peuvent s'apparenter à des actes de guerre, isolés ou au contraire coordonnés pour saturer les capacités de réaction des pays attaqués. L'usage des agents non conventionnels n'est plus réservé aux états et doit être étudié avec la plus grande attention pour mettre en place les contre-mesures nécessaires.

M. BONI, vétérinaire en chef, praticien certifié. P. ORLANDINI, vétérinaire principal. A. KAROM, vétérinaire commandant, praticien confirmé. O. KOEHLE, vétérinaire principal. G. BORNERT, vétérinaire en chef, professeur agrégé du Val-de-Grâce.

Correspondance : M. BONI, Direction régionale du Service de santé des armées de Saint-Germain-en-Laye, base des Loges, BP 40202 – 78102 Saint-Germain-en-Laye Cedex.

E-mail : vbaboni@gmail.com

L'évolution de la menace terroriste a nécessité une refonte des dispositions du plan Vigipirate qui a été décliné pour l'eau potable en raison de son caractère vital et de l'impact psychologique qu'aurait une attaque sur cet élément ainsi que la mauvaise protection relative de ces installations par rapport à d'autres infrastructures stratégiques et sensibles (1, 2).

Cette étude sera ciblée sur les toxines utilisables et disponibles pour contaminer l'eau, depuis la production jusqu'à la distribution, ainsi que sur les possibilités de détection et d'élimination de ces agents. Les dangers seront décrits puis analysés, avant de donner les éléments essentiels pour les maîtriser en France mais aussi en opérations extérieures.

Description des dangers.

Accessibilité des agents biologiques et de leurs toxines.

La contamination intentionnelle de l'eau nécessite tout d'abord d'avoir accès aux toxines ou de pouvoir les fabriquer. Il est relativement facile de se procurer la plupart des agents infectieux naturels. La production d'agents biologiques ne requiert pas d'équipements spécifiques : le même type de matériel est utilisé pour la production de vaccins ou d'antibiotiques, ce qui rend les contrôles très difficiles. Des milieux de culture usuels peuvent être achetés ou préparés par n'importe quel laboratoire. Une production artisanale à petite échelle est possible pour certaines bactéries comme *Bacillus anthracis* ou certaines toxines comme la ricine. En janvier 2003, la police britannique a ainsi découvert de la ricine lors de l'interpellation de terroristes islamistes. L'Irak, au cours de la première guerre du Golfe, avait pu militariser près de 10 m³ de toxine botulique, 1 500 litres d'aflatoxine et 10 litres de ricine.

La sécurisation des lieux où l'on pourrait trouver des agents est primordiale, notamment dans les laboratoires privés ou universitaires dont le niveau de sécurisation est plus faible que celui des laboratoires sécurisés de niveau P3 ou P4. Le transfert de connaissances est bien plus difficile à détecter que les transferts de matériels ou d'agents biologiques. Le contrôle des stagiaires est difficile ; le savoir-faire et les connaissances sont accessibles en libre-service dans une communauté de la recherche mondialisée. Aux États-Unis, huit membres républicains du Congrès ont décrit un article sur le virus de la variole d'Ariella Rosengard (*Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002), de l'université de Pennsylvanie, comme étant « un document pouvant éventuellement permettre à des terroristes de produire à peu de frais des pathogènes humains ».

La quantité de toxine à produire pour commettre une action à grande échelle peut devenir un facteur limitant. C'est alors que la dose toxique doit être prise en considération. Par exemple, on estime à une cinquantaine de grammes la dose de toxine botulique nécessaire pour contaminer un réseau alimentant 50 000 personnes, alors que pour obtenir le même effet avec la ricine, il faudrait disposer de plusieurs tonnes de graines de ricin. La

militarisation des agents biologiques demeure une démarche scientifique difficile et complexe, que plusieurs états n'ont pas réussi à finaliser (3).

Toxines utilisables pour la contamination intentionnelle de l'eau.

Pour être « efficace » en tant que moyen pour un acte de sabotage d'une installation de distribution d'eau potable, une toxine doit répondre aux critères suivants. Elle doit être :

- facile à produire ;
- militarisable, c'est-à-dire produite en grande quantité et diffusable pour atteindre l'effet voulu ;
- capable de provoquer un effet néfaste chez le consommateur d'eau ;
- stable, c'est-à-dire conserver sa structure et sa toxicité dans l'eau ;
- résistante à l'oxydation par le chlore libre aux concentrations habituellement utilisées dans les réseaux d'eau potable ;
- indétectable en routine (4).

Au regard de ces critères, les toxines suivantes sont considérées comme les meilleurs candidats pour la contamination intentionnelle des réseaux ou réservoirs d'eaux destinées à la consommation humaine (5).

Toxine botulique.

La toxine botulique, produite par la bactérie anaérobie *Clostridium botulinum*, est une neurotoxine qui provoque une inhibition de la libération d'acétylcholine au niveau des jonctions neuromusculaires. Elle bloque la transmission du signal nerveux entre nerf et muscle, ce qui conduit à la paralysie respiratoire et locomotrice (botulisme). Après une étude portant sur 18 cas dont 16 mortels, la DL50 per os de la toxine botulique a été estimée à 0,4 µg par personne, soit 0,003 µg.kg⁻¹.

La toxine A est la plus toxique : 4 fois plus toxique que la toxine tétanique, 300 fois plus que la toxine diphtérique, 30 000 fois plus que la ricine et 10¹¹ fois plus que le cyanure de sodium. Des valeurs différentes ont été extrapolées à partir de modèles animaux :

- dose létale minimale chez l'homme par inhalation : 3 ng.kg⁻¹ ;
- dose létale minimale chez l'homme par injection IV : 1 ng.kg⁻¹ ;
- dose létale minimale chez l'homme par voie orale : 1 µg.kg⁻¹.

Du fait de la grande toxicité des toxines botuliques, leur utilisation serait possible selon deux modalités, la dispersion sous forme d'aérosols et la contamination volontaire d'un réseau d'eau potable. La contamination hydrique n'a cependant jamais été décrite.

Ricine.

La ricine est une toxine extraite de la graine de ricin, potentiellement utilisable dans un but de malveillance en raison de son caractère hydrosoluble. Elle ne modifie pas le goût de l'eau. La DL50 souris est de 20 mg.kg⁻¹ et serait de 1 mg.kg⁻¹ chez l'homme (5, 6). Elle peut être administrée par voie orale ou par aérosolisation : la voie digestive est environ 1 000 fois moins efficace que

l'inhalation, car la ricine est peu absorbée et/ou inactivée par les enzymes digestives. Du fait de cette toxicité modérée par voie digestive, l'usage de la ricine dans l'eau potable semble donc peu probable.

La ricine agit en inhibant la synthèse protéique. Les premiers symptômes apparaissent le plus souvent dans un délai de 3 à 6 heures après l'ingestion. Le tableau clinique associe habituellement des vomissements, des gastralgies intenses et des crampes abdominales, une diarrhée profuse parfois sanglante. Une nécrose hépatique et une insuffisance rénale peuvent apparaître 2 à 5 jours après l'exposition. La ricine dispersée sous forme de poudre ou d'aérosol peut entraîner dans un délai variant de quelques minutes à plusieurs heures des signes d'irritation oculaire et pharyngée ainsi qu'une irritation respiratoire associant toux, dyspnée, œdème pulmonaire et pouvant conduire à un syndrome de détresse respiratoire aiguë.

Entérotoxine B staphylococcique.

L'entérotoxine B staphylococcique (SEB) est l'une des entérotoxines produites par le staphylocoque doré (*Staphylococcus aureus*). Dans le cadre d'actions de malveillance, l'entérotoxine B pourrait être dispersée par aérosolisation, ou être utilisée pour contaminer des aliments ou un réservoir d'eau de distribution de faible volume.

Après ingestion, la durée d'incubation est courte (2 à 4 heures en moyenne). La maladie débute par l'apparition brutale de symptômes digestifs hauts prédominants (nausées, vomissements et douleurs abdominales). La température est habituellement normale ou peu élevée. Les décès sont rares ; la maladie dure rarement plus d'un ou deux jours mais l'intensité des symptômes peut entraîner une hospitalisation. Au final, cette toxine constitue une « arme » de peu d'intérêt pour un acte terroriste en relation avec les eaux, du fait de son impact médical très limité.

Saxitoxines.

Ces toxines sont synthétisées par des cyanobactéries du genre *Gonyaulax*, de la famille des dinoflagellées. Elles sont de type alcaloïde et se caractérisent par des effets neurotoxiques : les saxitoxines sont responsables de l'intoxication paralysante par les fruits de mer ou PSP (*paralytic shellfish poisoning*). La DL50 de la saxitoxine est estimée entre 0,3 et 1 mg par personne. De nombreux cas d'intoxication d'origine naturelle sont régulièrement décrits dans le monde. Par contre, la production de ces toxines s'avère difficile au laboratoire.

Aflatoxines.

Il s'agit de métabolites d'un micromycète, *Aspergillus flavus*. La dose toxique est comprise entre 10 et 100 mg par individu. L'intoxication aiguë par les aflatoxines se traduit par la mort, en général, avec parfois des symptômes de dépression, anorexie, diarrhée, ictère ou anémie.

La solubilité des aflatoxines est faible et leur utilisation pour contaminer un réseau d'eau potable peu probable.

Microcystines.

Les microcystines sont des hépatotoxines produites par les cyanobactéries du genre *Microcystis*.

Des patients dialysés sont morts à cause de sa présence dans l'eau. La dose mortelle est estimée entre 1 et 10 mg par personne. Le critère retenu par l'OMS est une concentration inférieure ou égale à 1 µg.L⁻¹ pour une consommation durant la vie entière.

Il existe de nombreuses microcystines, qui présentent des caractères différents de solubilité et donc des différences d'action (organes cibles, bioaccumulation, toxicité). La microcystine LR est la plus étudiée, car la plus toxique chez la souris et la plus souvent retrouvée dans les écosystèmes. L'intoxication aiguë conduit à la destruction de la structure hépatique des mammifères et à la mort par hémorragie en quelques heures (7).

Anatoxine A.

L'anatoxine A est un alcaloïde neurotoxique synthétisé par une cyanobactérie, *Anabaena flos-aquae*. Elle provoque une paralysie des muscles striés, dont les muscles respiratoires, en agissant sur la jonction neuromusculaire. La mort par arrêt respiratoire est très rapide, en quelques minutes. La DL50 souris par voie intrapéritonéale est de 200 µg.kg⁻¹, avec une mort en 4 à 7 minutes ; cette dose est d'environ 0,5 mg per os (7).

Vulnérabilité de la chaîne de l'eau.

L'utilisation de toxines comme agents B, en particulier la toxine botulique, la ricine, les saxitoxines et les microcystines, pour la contamination de l'eau potable peut constituer une éventualité vraisemblable. L'effet susceptible d'être obtenu par un acte de sabotage dépend non seulement de la toxicité intrinsèque de l'agent utilisé, mais aussi des caractéristiques de la filière d'approvisionnement en eau dont certaines représentent des éléments de vulnérabilité.

Depuis la ressource jusqu'au consommateur, la « chaîne de l'eau » peut être divisée comme suit :

- ressource : eau de surface ou eau profonde ;
- transport de l'eau brute ;
- traitement ; stockage de l'eau traitée ;
- distribution et/ou conditionnement.

Ressource.

La vulnérabilité d'une ressource est l'ensemble des caractères qui déterminent la plus ou moins grande facilité d'accès à un réservoir aquifère naturel et de propagation dans celui-ci d'une substance considérée comme indésirable. En règle générale, on peut classer les ressources par ordre de vulnérabilité décroissante de la manière suivante : ressource de surface (rivière, lac) > eau souterraine en terrain karstique > aquifère continu.

Les périmètres de protection définis en métropole tiennent compte de la vulnérabilité des ressources. La structure de l'ouvrage de captage joue également un rôle majeur. Il faut enfin prendre en compte les forages abandonnés, qui peuvent communiquer avec les ouvrages utilisés et offrir ainsi un point d'accès facile à l'eau brute.

Transport de l'eau brute.

Entre le point de prélèvement et le point de traitement, l'eau peut être transportée sur plusieurs kilomètres par

aqueduc, parfois à l'air libre. L'eau brute est alors extrêmement vulnérable à toute contamination, à l'image d'une rivière.

Traitement de l'eau.

Les stations de potabilisation des eaux constituent la clé de voûte de la sécurité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine : au-delà, l'eau ne subira généralement plus aucun traitement jusqu'au robinet de l'utilisateur. Tous les types de pollutions peuvent être éliminés, à condition que le danger soit clairement identifié et pris en compte lors de la conception de la filière de traitement. Les processus mis en œuvre sont variés et font intervenir le plus souvent les procédés suivants, plus ou moins efficaces pour éliminer ou inactiver les toxines : clarification, ozonation et oxydation, filtration, charbon actif et chloration.

Les points suivants peuvent être pris pour cible dans le cadre d'actions malveillantes :

- les réactifs de traitement chimiques, qui peuvent faire l'objet d'une substitution ;
- l'introduction de produits nuisibles lors du traitement de l'eau ;
- la gestion du traitement de l'eau, souvent informatisée donc susceptible d'être piratée.

Une contamination de la ressource ou au niveau d'une étape de traitement paraît toutefois peu vraisemblable en raison des quantités de toxines (notamment pour la ricine) qu'il serait nécessaire d'utiliser.

Stockage de l'eau traitée et distribution.

L'étape de stockage de l'eau traitée constitue en réalité le point le plus vulnérable de la chaîne. Les risques majeurs concernent :

- la contamination des réservoirs ;
- les retours d'eau malveillants ;
- la prise de contrôle du système informatique de télégestion.

Dans le cas du réseau d'eau potable, le scénario de contamination pouvant se révéler le plus critique serait donc l'injection d'une toxine au niveau du stockage ou du réseau de distribution. Dans ce type de scénario, le pourcentage de population affectée dépendrait nécessairement de la configuration du réseau d'eau visé, du point d'introduction de l'agent ainsi que du moment et de la durée de l'injection. Par ailleurs, l'impact, en termes de personnes atteintes et de mortalité, serait fonction de nombreux paramètres : quantité de toxines inoculée, site d'inoculation dans le réseau, complexité ou maillage du réseau.

Pour autant, le « vecteur » que représente ici l'eau est difficilement maîtrisable : les modalités de diffusion d'une toxine dans un réseau sont difficilement prévisibles ; par ailleurs, seule une faible proportion de l'eau distribuée est ingérée, soit 1 à 2 litres effectivement consommés pour la boisson sur une utilisation journalière de 150 litres par personne et par jour en France. Cependant, la répercussion médiatique, avec affolement prévisible de la population, la nécessité d'une mise en place d'une infrastructure de substitution d'approvisionnement en eau (interdiction d'utilisation de l'eau du robinet,

distribution d'eau en bouteille ou par citerne...) et les difficultés de la décontamination du réseau entraîneraient de très lourdes perturbations.

Conditionnement.

Les eaux de source ou minérales peuvent être la cible de contaminations volontaires, dès la production ou au cours de la phase de commercialisation. Même si l'impact peut être limité, il convient de ne pas oublier la sécurisation des sites industriels d'embouteillage.

Maîtrise du risque lié aux toxines.

Cadre général.

La menace terroriste est dite asymétrique, c'est-à-dire que sa nature n'est pas connue à l'avance et qu'elle est inattendue. Les terroristes étudient et exploitent les points faibles des systèmes. La réponse en termes de prévention ne peut venir que d'une étude systématique des actions terroristes passées et de la création de programmes de simulation, dans le but d'améliorer la sécurité des infrastructures et des processus (8).

En cas de menace avérée ou d'attentat biologique, le gouvernement met en œuvre le plan gouvernemental d'intervention face aux menaces et actes de terrorisme nucléaire, radiologique, biologique et chimique (NRBC) avec son volet BIOTOX et ses trois annexes opérationnelles pour les différents agents (peste-charbon-tularémie, variole et toxines). Ce plan résulte d'un travail interministériel impliquant principalement les ministères chargés de la Défense, de l'Intérieur et de la Santé (1).

L'étude des scénarios possibles permet de dégager des points-clés pour préparer les autorités sanitaires à gérer un événement terroriste mettant en œuvre des toxines. Cela amène à intégrer plusieurs facteurs :

- la revendication ou non de l'attentat ;
- la réalité ou non de la contamination ;
- la cible visée par le terroriste.

En fonction des critères, les actions prévues à l'avance par le plan peuvent être variées et plus ou moins nombreuses, comme par exemple : traiter les cas cliniques, gérer les inquiets, détecter l'éventuelle supercherie ou le chantage, organiser la communication et envisager les mesures correctives (traitement des réseaux, destruction des bouteilles suspectes...).

Sans détailler avec précision l'intégralité des stratégies de réponse, la gestion de crise peut être résumée en cinq grandes étapes :

- des signaux, indicateurs d'un fonctionnement anormal, sont détectés. Dès lors, la menace est considérée comme possible ;
- des actions de protection du consommateur sont aussitôt mises en place, et dans le même temps la menace est évaluée plus finement ; le site est caractérisé : une enquête judiciaire débute à ce moment, des échantillons sont prélevés, les antécédents d'incidents comparables sur ce site ou ailleurs sont recherchés. De « possible », la menace devient « crédible » ou non.

- les échantillons sont analysés au laboratoire afin de confirmer la contamination. Il faut garder à l'esprit que tous les contaminants possibles ne peuvent être recherchés;
- des actions correctives sont conduites sur les installations;
- un fonctionnement normal est retrouvé.

Même si la communication est essentielle dans ce genre de crise, il est crucial d'étudier ici la détection et les mesures correctives possibles en cas de contamination. C'est finalement cela qui permettra la maîtrise du risque et le retour à la situation normale. Ces mesures dépendent des propriétés particulières des toxines. Nous les envisagerons du point de vue du traitement de l'eau et de façon synthétique sous forme de tableaux pour les principales toxines d'intérêt.

Détection des toxines.

L'essentiel de la détection rapide sur le terrain est réalisé par des méthodes essentiellement immunologiques (tab. I). Elles sont commercialisées par diverses sociétés comme Abraxis®, Tetracore®, Advnt Biotechnologies® ou Pharmaleads®.

Tableau I. Principales méthodes de détection des toxines dans l'eau.

Toxine	Méthodes de référence	Méthodes immunologiques	Test rapide de terrain	Seuil de détection
Toxine botulique	Test de létalité sur souris	oui	oui	5 à 300 ng.mL ⁻¹
Ricine	ELISA	oui	oui	1 à 500 ng.mL ⁻¹
Entérotoxine B staphylococcique	ELISA	oui	oui	1 ng.mL ⁻¹
Saxitoxine	Test biologique	oui	non	< 2,5 mg.L ⁻¹

La sensibilité des méthodes est une donnée essentielle, notamment en regard de la dose toxique, l'important étant de détecter une quantité très inférieure à la dose toxique (9). Il est important de vérifier le seuil de détection annoncé par le fabricant dans des conditions de terrain.

Les tests biologiques de toxicité globale type Microtox peuvent aussi être utilisés mais sont moins spécifiques et de moindre intérêt.

Il est aussi possible, de manière indirecte, de détecter une contamination par le suivi de certains paramètres de qualité de l'eau comme le carbone organique total et la demande en chlore. Il s'agit alors d'éléments non spécifiques qui permettent seulement de suspecter une éventuelle contamination par des composés organiques tels que les toxines (tab. II).

Il importe enfin d'être vigilant quant au fait que la détection de la toxine par la plupart des tests présentés ici, hormis les tests biologiques et essais chez l'animal, n'apporte pas la preuve que la toxine se trouve dans l'eau

Tableau II. Indicateurs indirects d'une contamination des eaux par des toxines.

Toxine	Carbone organique total	Demande en chlore
Toxine botulique	Augmenté	oui
Ricine	Augmenté si grande quantité de toxine	oui
Saxitoxines	-	oui

sous sa forme active. L'idéal serait donc de prévoir de confirmer un résultat positif d'un test immunologique par un test biologique.

Destruction et inactivation des toxines.

La destruction des toxines peut constituer un élément clé de la stratégie de prévention. Dans ce domaine, les données bibliographiques sont assez rares et souvent incomplètes.

Effets de la chaleur et du chlore.

Les effets de la chaleur et du chlore (acide hypochloreux) sont précisés dans le tableau III. L'augmentation de la chloration du réseau à 0,3 mg.L⁻¹ imposée par le plan Vigipirate à la sortie des usines de

Tableau III: Effets de la chloration et d'un traitement par la chaleur sur les principales toxines d'intérêt.

Toxine	Chloration	Température
Toxine botulique	+++ (3 mg.L ⁻¹ , 20 min)	+ (30 minutes à +80 °C)
Ricine	+/- (100 mg.L ⁻¹ , 20 min)	+ (+80 °C, 10 minutes)
Entérotoxine B staphylococcique	+/- (500 mg.L ⁻¹)	Thermostable
Saxitoxines	+/- (100 mg.L ⁻¹)	Thermostable

production permet de maîtriser le risque « toxine botulique ». La réalisation de chocs thermiques ou chlorés dans les réseaux d'eau peut permettre la destruction des principales toxines. Cependant, certaines toxines comme la mycotoxine T2 et la brevetoxine ne sont détruites qu'à des températures supérieures à + 815 °C. La mycotoxine T2 n'est détruite qu'en utilisant un mélange de soude (0,25 mol.L⁻¹) et d'hypochlorite de sodium à 25 g.L⁻¹ (10).

Efficacité des étapes de traitement d'eau.

La clarification (coagulation et floculation avec du chlorure ferrique et/ou du sulfate d'alumine), qui vise à abattre la matière organique, est assez peu efficace sur les toxines. La filtration n'est efficace que si l'on a recours à la nanofiltration (porosité 0,1 à 1 nm) ou à l'osmose inverse. Le charbon actif semble efficace sur la saxitoxine (tab. IV). En situation d'utilisation d'une ressource

Tableau IV. Efficacité sur quelques toxines des principales technologies de potabilisation des eaux.

Toxine	Clarification	Ozonation	Nanofiltration	Osmose inverse	Charbon actif
Toxine botulique	Peu efficace	+/-	+	++	+/-
Ricine	+/- (nécessite du chlorure ferrique)	+/-	+	++	+/-
Saxitoxine	+/-	+/-	+	++	++

contaminée ou inconnue, la maîtrise du risque passe donc obligatoirement par l'utilisation de l'osmose inverse.

Suivant le site où se produit la contamination, essentiellement selon qu'elle a lieu avant ou après traitement, les mesures de maîtrise sont différentes. La sécurisation des sites en amont est donc d'autant plus nécessaire que l'étape de traitement n'est pas conçue pour éliminer les toxines (tab. V). Elle devient cruciale après traitement. Pour les sites « sensibles », par exemple les ambassades, il apparaît incontournable de retraiter l'eau au plus près du consommateur final, avec recours à de l'osmose inverse par exemple.

Tableau V. Principes de maîtrise du risque lié aux toxines.

	Méthodes de maîtrise
Injection dans la ressource	Sécurisation du site, suivi en ligne des paramètres (chlore libre, carbone organique total, demande en chlore). En cas de contamination, les mesures à prendre dépendent du traitement mis en œuvre (charbon actif, nanofiltration...).
Injection en réseau de distribution	Sécurisation des réservoirs, mise en place de clapets anti-retour pour éviter la contamination du réseau public par les réseaux privés mis en surpression. En cas de contamination, vidange et chasse après choc chloré ou thermique si possible (sauf pour la saxitoxine et l'entérotoxine staphylococcique B).
Injection dans un réseau privé	La contamination étant très proche, seule l'osmose inverse peut permettre d'éliminer les toxines avant consommation.

Bilan.

La clé de voûte de la prévention du risque biologique, non spécifique des toxines, est la sécurisation des filières et l'application de contre-mesures efficaces. Les efforts de sécurisation devront concerner autant la mise en place de mesures de sécurité passive (infrastructures et équipements) que de mesures de sécurité active (organisation, mobilisation du personnel, réalisation d'exercices d'entraînement à la sécurité). C'est pourquoi des efforts importants de sensibilisation, de formation et d'information des responsables et des acteurs techniques ont été entrepris et doivent être poursuivis. L'étude de la

vulnérabilité des systèmes d'alimentation en eau potable vis-à-vis d'actes de malveillance, consiste en l'examen structurel et fonctionnel de la chaîne d'alimentation, du point de captage à la production et à la distribution d'eau, pour permettre aux responsables civils et militaires, sur la base des résultats de cette étude, d'identifier les risques que présentent les installations et de bâtir et mettre en œuvre un plan de réduction de ces derniers (11-12). Cependant, tous les actes terroristes ne pourront être évités par ces mesures préventives, notamment en bout de chaîne, dans les restaurants ou les centres commerciaux par exemple. Il faut donc assumer que la maîtrise complète de la chaîne eau n'est pas possible et que la détection précoce des attaques revêt une importance majeure en vue de sauver des vies ou de réduire les conséquences d'une attaque. Il faut, pour cela, renforcer les systèmes de surveillance épidémiologique et former la population à réagir en cas d'alerte.

La préparation des structures sanitaires locales (commune, département, emprises militaires en France ou à l'étranger) est cruciale, notamment pour la détection des contaminants et des malades (possibilité de disposer de tests de diagnostic médical et environnemental) pour ne pas retarder la mise en place des mesures adaptées sans attendre les consignes nationales ou internationales. L'interopérabilité et la communication de tous les acteurs dans ce domaine technique est donc essentielle.

Conclusion.

L'éventualité d'une utilisation de toxines comme arme par des terroristes ne doit pas être sous-estimée. Bien que d'exécution relativement ardue, cette option représente une menace pour la population comme pour une armée en opération. Les acteurs de la santé publique, et le service de santé des armées pour ce qui le concerne, doivent se tenir prêts à répondre à une attaque et maîtriser ce risque.

Malgré un certain manque de données scientifiques exploitables dans ce domaine, il apparaît peu probable que des concentrations importantes de toxines puissent traverser l'étape de traitement et atteindre le consommateur à l'étape de distribution. L'effet de dilution et l'inactivation possible par les facteurs physiques et chimiques constituent autant de facteurs limitant l'efficacité d'un sabotage. Il semble par contre que la cible privilégiée pour ce type d'attaque soit représentée par des eaux conditionnées, destinées à la boisson, ce qui doit conduire les armées à plus de vigilance au quotidien en ce qui concerne la sécurisation des filières d'approvisionnement en eaux conditionnées.

En opérations extérieures, lorsque les armées réalisent une activité de production d'eaux, les efforts ou réflexions doivent porter sur l'étude de la vulnérabilité de la chaîne eau, la sécurisation des réservoirs d'eau et des ressources, la mise en œuvre de matériels performants utilisant l'osmose inverse et sur l'emploi raisonné de la main d'œuvre locale. Le déploiement de moyens d'analyse adaptés revêt aussi une grande importance, afin de disposer de la capacité de réaliser la détection d'une éventuelle attaque.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Plan gouvernemental d'intervention face aux menaces et actes de terrorisme nucléaire, radiologique, biologique et chimique, 2003.
2. Circulaire DGS/SD7A N° 2003-524/DE/19-03 du 7 novembre 2003 relative aux mesures à mettre en œuvre en matière de protection des systèmes d'alimentation en eau destinée à la consommation humaine, y compris les eaux conditionnées, dans le cadre de l'application du plan Vigipirate.
3. Lepicq O. Problématique du terrorisme biologique. *Forme et santé*, 2001;19:1-4.
4. Hickman D. A chemical and biological warfare threat: USAF water systems at risk. Rapport de l'USAF Counterproliferation Center, 1999 : 50p.
5. Burrows W, Renner S. Biological warfare agents as threats to potable water. *Environmental health perspectives*, 1999;107(12):14-21.
6. Ricine. Fiche de la Direction générale de la santé et de l'Institut de veille sanitaire, 2007.
7. Évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et autres activités récréatives. Rapport de l'Agence française pour la sécurité sanitaire des aliments, 2006 : 70p.
8. Skolicki Z, Arciszewski T, Houck MH, De Jong K. Co-evolution of terrorist and security scenarios for water distribution systems. *Advances in Engineering Software* 2008; 39:801-11.
9. Peruski AH, Peruski LF. Immunological methods for detection and identification of infectious disease and biological warfare agents. *Clin. Diagn. Lab. Immunol.* 2003;10(4):506-13.
10. Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories. <http://www.cdc.gov/od/ohs/biosfty/bmb15/bmb15toc.htm>
11. Les systèmes d'alimentation en eau potable, évaluer leur vulnérabilité. Guide du ministère de la santé, 2007 : 89p.
12. Khan AS, Swerdlow DL, Juranek DD. Precautions against biological and chemical terrorism directed at food and water supplies. *Public Health Rep.* 2001;116(1):3-14.



Contrôle microbiologique de surface sur un ETRAC R. © B. Davoust.

Enquête « Fièvre » dans la vallée du Rift au Tchad.
© Groupe de travail d'épidémiologie animale 2008-2009.



Contrôle d'une chambre froide de campagne de 5 m³ sur un plateau.
© B. Davoust.

Opération de vermifugation
de bétail en Afghanistan. © O. Terrier.

