

MAÎTRISE DE LA QUALITÉ DES EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE À BORD DES BATIMENTS DE LA MARINE : ENJEU DES PARAMÈTRES CHIMIQUES ET ORGANOLEPTIQUES

CONTROL OF THE QUALITY OF POTABLE WATER ONBOARD NAVY SHIPS : CHALLENGE OF CHEMICAL AND ORGANOLEPTIC PARAMETERS

Par Stéphane LEFEVRE¹, Sébastien GENIN-LOMIER², Philippe ORLANDINI³, Olivier CABRE⁴
(Communication présentée le 17 novembre 2019,
Manuscrit accepté le 25 janvier 2021)

RÉSUMÉ

La bonne connaissance et la maîtrise des paramètres chimiques et organoleptiques des eaux destinées à la consommation humaine produites à bord des bâtiments de la marine représentent un enjeu capital de maîtrise des risques sanitaires en permettant l'ajustement des mesures d'exploitation des matériels de production, stockage et distribution. L'interprétation des résultats des mesures de ces paramètres doit préférentiellement se faire de manière combinée, par groupes d'indicateurs, pour une meilleure compréhension d'une situation ou d'un problème rencontré. Ainsi, il sera notamment possible d'obtenir des informations déterminantes sur le fonctionnement des installations de production (post traitement inclus), sur la présence éventuelle de biofilm, ou encore de détecter très rapidement de potentielles contaminations par actions malveillantes. La bonne connaissance de la chimie de l'eau permet d'établir des mesures de maîtrise adaptées afin d'anticiper et de limiter au maximum l'apparition de non-conformités des eaux destinées à la consommation humaine. Ces mesures concernent les moyens techniques, le mode d'exploitation, la surveillance et doivent être associées à une formation adaptée et ciblée.

Mots-clés : Eaux destinées à la consommation humaine ; paramètres chimiques ; paramètres organoleptiques ; interprétation combinée.

ABSTRACT

A good knowledge of chemical and organoleptic parameters of potable water produced onboard military vessels is absolutely necessary to control the sanitary risks and to organize the control process. The interpretation of the analysis results of such parameters has to be done preferably in a combined way, considering groups of parameters, for a better understanding of a situation. In that way, it is possible to get information about the treatment plant, about biofilm presence, or about potential intentional contamination. The knowledge of water chemistry leads to determine specific means of controlling the risks. These means can involve technical solutions, the way to use the facilities, monitoring actions and education of the crew.

Key-Words: Potable water; chemical parameters; organoleptic parameters; combined interpretation.

(1) Vétérinaire en chef, praticien confirmé du Service de santé des armées, 1er GV Toulon - BP 95 - 83800 Toulon cedex 9, stephane1.lefevre@intradef.gouv.fr

(2) Vétérinaire en chef, praticien certifié du Service de santé des armées, CEPN - BP 40915 - 83050 Toulon cedex, sebastien.genin-lomier@intradef.gouv.fr

(3) Vétérinaire en chef, praticien confirmé du Service de santé des armées, 31e GV Brest - CC 05 - 29240 Brest cedex 9, philippe.orlandini@intradef.gouv.fr

(4) Vétérinaire en chef, professeur agrégé du Service de santé des armées, DCSSA/EMO Santé - CS 21623 - 75509 Paris cedex 15, olivier.cabre@intradef.gouv.fr

INTRODUCTION

Directement issue de la réglementation civile (code de santé publique, arrêtés et décrets afférents publiés au JORF), mais adaptée au contexte militaire naval pour une meilleure compréhension et mise en application, une circulaire ministérielle (publiée au BOA) définit les exigences à respecter afin d'obtenir la maîtrise de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) à bord des bâtiments de la marine. S'y trouvent, entre autres, des plans d'analyse types, adaptés à la situation du bâtiment (en activité ou en maintenance par exemple), et dans lesquels on retrouve les paramètres microbiologiques, chimiques et organoleptiques, et radiologiques à analyser. Les bâtiments de la marine sont, pour leur grande majorité, capables de produire une eau potable en mer et de satisfaire ainsi le principe d'autonomie. La production d'EDCH peut s'effectuer à partir d'eau de mer, ou à partir d'eaux brutes dans les ports d'escale (eau du quai dont le niveau de potabilité ne correspond pas forcément aux exigences françaises, ou dont le niveau de sécurisation contre les actes de malveillance n'est pas garanti). Les EDCH sont ensuite stockées dans des réservoirs structurellement intégrés au bâtiment puis distribuées aux différents points de mise en consommation. A noter que si l'ensemble des usages domestiques des EDCH est bien entendu recherché, la consommation de l'eau en tant qu'eau de boisson est également un objectif que tous les bâtiments récents se doivent d'atteindre. La notion de potabilité est généralement reliée chez l'équipage à l'absence d'agent biologique. Ce phénomène est sans doute lié au fait que la présence d'agents pathogènes biologiques a des conséquences la plupart du temps rapides sur les consommateurs, et marque de ce fait les esprits. Néanmoins, les paramètres chimiques et organoleptiques ne sont pas moins importants, et leur maîtrise participe grandement à la maîtrise globale de la qualité des EDCH. Connaître le rôle, l'importance et les conséquences d'une dérive des paramètres chimiques et organoleptiques est par conséquent riche d'enseignement. L'interprétation des résultats des mesures de ces paramètres est également très importante, et notamment lorsque cette interprétation est combinée. Enfin, la bonne connaissance de ces paramètres, permet de mettre en place les mesures de maîtrises nécessaires pour garantir que les EDCH mises à disposition des équipages sont de qualité maîtrisée en toutes circonstances.

PARTICULARITÉS DE LA PRODUCTION D'EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE À BORD ET BÂTIMENTS DE LA MARINE ET DE LA MAÎTRISE DE LA QUALITÉ DES EAUX

L'eau de mer est bien entendu la principale ressource des navires pour produire de l'eau potable. Depuis la démocratisation des systèmes de purification (dès le XIX^{ème} siècle), d'abord par la technologie de l'ébullition, puis plus récemment par la technologie de l'osmose inverse, l'autonomie en « eau douce » n'est plus un facteur limitant en période de navigation. Néanmoins,

il est indispensable de s'assurer que ces systèmes de purification fonctionnent correctement et fournissent une eau de qualité maîtrisée.

Particularités de la filière EDCH à bord des bâtiments de la marine

La filière de production est généralement conçue de la manière suivante :

- Un collecteur d'aspiration permettant l'entrée d'eau de mer au niveau de la coque immergée.
- Un module de préfiltration constitué d'une crépine pour stopper les potentiels mollusques, crustacés et macroparticules, d'un filtre à sable (seuil de coupure entre 50 et 100 µm) et de deux filtres micrométriques (seuil de coupure 20µm et 5 µm).
- Un module de purification, cœur du système : osmoseur inverse (très majoritairement) ou bouilleur.
- Un module de post-traitement constitué d'une reminéralisation de l'eau produite et d'une chloration.

L'eau ainsi produite est stockée dans des réservoirs (appelés « soutes ») en attente de consommation. Ces réservoirs sont structurels (ils sont intégrés dans la coque) et leurs parois sont recouvertes d'un revêtement disposant d'une attestation de conformité sanitaire autorisant le contact des EDCH. Lors de la mise en distribution, un module hydrophore constitué de pompes et ballons surpresseurs permet d'envoyer les EDCH sous pression dans le réseau de distribution du bord. Le réseau de distribution doit alimenter tous les locaux du bâtiment, générant ainsi une cartographie parfois complexe (prise en compte de l'architecture navale d'un bâtiment, conçu en ponts et tranches).

Principales modalités de surveillance et contrôle de la filière EDCH

Les modalités de surveillance et contrôle sont bien entendu fondées sur les particularités de la filière EDCH. La surveillance est destinée à affiner et potentiellement à corriger le pilotage des installations. Elle est effectuée par le personnel mécanicien du bord et comporte une surveillance technique (vérification périodique du bon état et du bon fonctionnement technique des installations) et une surveillance analytique (mesure très régulière de certains paramètres physicochimiques, considérés comme clés). Il s'agit principalement du chlore libre, du pH, de la conductivité de la turbidité et de la dureté. D'autres paramètres (métaux notamment) peuvent être intégrés dans la surveillance en fonction de l'analyse des risques propres au bâtiment. Le contrôle sanitaire est quant à lui réalisé par les vétérinaires des armées, ponctuellement lorsque le bâtiment est à quai. Il permet de vérifier que les procédures mises en place sont correctement appliquées par l'équipage et que le niveau de maîtrise des risques est satisfaisant.

RÔLE ET IMPORTANCE DES PRINCIPAUX PARAMÈTRES CHIMIQUES ET ORGANOLEPTIQUES, CONSÉQUENCES DE LEUR DÉRIVE

Les notions de limites de qualité et de référence de qualité issues du Code de santé publique sont reprises dans la circulaire Marine (Circulaire n° 2093/ARM/EMM/MDR - n° 515069/ARM/DCSSA/ESSD du 22 novembre 2019). Pour mémoire, le dépassement d'une limite de qualité entraîne de facto et immédiatement une déclaration de non potabilité et donc une interdiction des usages domestiques. Le dépassement d'une référence de qualité n'entraîne quant à lui pas d'interdiction d'usage, mais oblige également à la mise en place d'actions correctives efficaces et rapides afin que le paramètre revienne dans les valeurs autorisées au plus vite. En période de navigation, situation opérationnelle par excellence, l'analyse des risques du moment orientera le commandant du bâtiment sur les décisions à prendre.

Paramètres classés en limites de qualité

Bore

Le bore, dont la valeur limite est de 1 mg/L, est un élément chimique de petite taille présent sous forme d'acide borique dans l'eau de mer (ayant pour origine le lessivage des continents). Le taux naturellement présent dans l'eau de mer varie entre 5 et 20 mg/L, en fonction de la salinité de l'eau de mer. La présence en excès de bore peut entraîner des troubles gastro-intestinaux ou neurologiques, voire des érythèmes, en cas d'intoxication aigüe. Une exposition à long terme peut éventuellement provoquer une atrophie testiculaire (Bornert *et al.* 2013 ; avis ANSES, 2016).

Chlore libre et chlore total (figure 1)

Le chlore libre est utilisé en temps normal en tant qu'agent de conservation des EDCH (action préventive), et potentiellement en cas de besoin comme agent de désinfection (action curative). Il est demandé par la réglementation que le taux soit maintenu entre 0,3 et 0,5 mg/L lors du stockage, et au minimum de 0,1 mg/L au point de mise en consommation. Lorsqu'ils sont dilués dans l'eau, les produits chlorés se dissocient en ions hypochlorites (ClO⁻) et en acide hypochloreux (HClO). Seul ce dernier possède de réelles capacités désinfectantes et peut être nommé chlore libre actif. Le chlore total représente quant à lui la somme des chlore libre (disponible) et chlore combiné (non disponible, sous forme de chloramines par exemple). Des valeurs de chlore libre insuffisantes vont permettre le développement d'agents biologiques potentiellement pathogènes. Des valeurs trop élevées vont générer la formation de sous-produits chlorés, et avoir un impact sur le confort d'utilisation de l'eau par l'utilisateur (goût, odeur, irritations cutanées). Les valeurs définies réglementairement sont un excellent compromis entre efficacité et absence de désagrément.

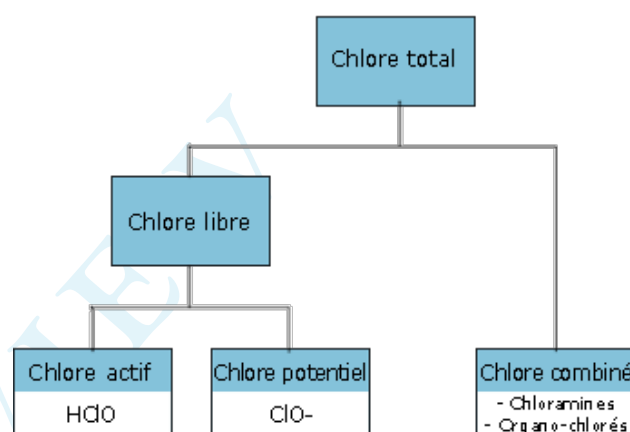


Figure 1 : le chlore sous toutes ses formes dans les EDCH ([ENSEEIH], 2004).

Nickel

La valeur limite réglementaire du nickel est de 20 µg/L. Dans les EDCH produites à bord des bâtiments de la marine, il est principalement retrouvé lorsque les eaux sont produites par ébullition (bouilleurs), mais aussi potentiellement lors de corrosion du réseau d'adduction. Des valeurs excessives peuvent provoquer des dermatites ou allergies cutanées. Une exposition des voies respiratoire (dans les douches) est susceptible d'augmenter le risque de cancer. Enfin, un effet systémique rénal a été constaté ainsi qu'une génotoxicité (Bornert *et al.* 2013).

Trihalométhanes

Les trihalométhanes (THM) représentent la somme du chloroforme, du bromo-dichlorométhane, du dibromo-chlorométhane et du bromoforme. Ils sont formés lors de l'interaction du chlore et du brome avec les matières organiques contenues dans l'eau. Le seuil réglementaire est fixé à 100 µg/L. Les voies d'absorption peuvent être digestive, cutanée ou respiratoire, et une valeur supérieure à 50 µg/L est déjà considérée comme significative (ANSES, 2010). Ces composés sont considérés comme étant potentiellement cancérigènes, mutagènes, hépatotoxiques et génotoxiques (Evlampidou *et al.* 2020). Leur stabilité dans l'eau étant relativement élevée, une accumulation au fil du temps est à redouter et à prendre en compte (Mouly *et al.*, 2008).

Turbidité

La turbidité représente la présence de matières en suspension dans les eaux, qu'elle soit d'origine minérale ou organique. Sa valeur maximale est fixée à 1 NFU en sortie de production et pendant le stockage. Une valeur de 2 NFU est admise aux points de mise en consommation. Compte tenu de la variabilité des origines d'une augmentation de turbidité, toute valeur excessive est considérée comme devant alerter sur la présence potentielle d'un polluant ou autre toxique.

Paramètres classés en références de qualité

Aspect, couleur, odeur, saveur

Les paramètres dits organoleptiques sont au nombre de quatre. Sans pouvoir définir précisément la présence d'un élément particulier, ces paramètres illustrent la palatabilité des EDCH et par conséquent la bonne volonté de l'équipage à la consommer. L'effet psychologique est ici une composante déterminante sur la décision de consommation de l'utilisateur ou non.

Carbone organique total (figure 2)

Le carbone organique total (COT) est la somme du carbone organique contenu dans les matières dissoutes (COD, environ 90%) et de celui contenu dans les particules en suspension dans l'eau (COP, environ 10%). Le COT est un indicateur direct et fiable de la charge organique de l'eau liée aux activités naturelles et humaines. C'est un bon indicateur de l'état intérieur d'un réseau de distribution (biofilm), et une caractéristique représentative de la qualité de l'eau en un point donné de celui-ci. La valeur limite est de 2 mg/L. Néanmoins, toute variation brutale de la valeur de COT est à considérer comme une anomalie (pollution organique accidentelle ou intentionnelle).

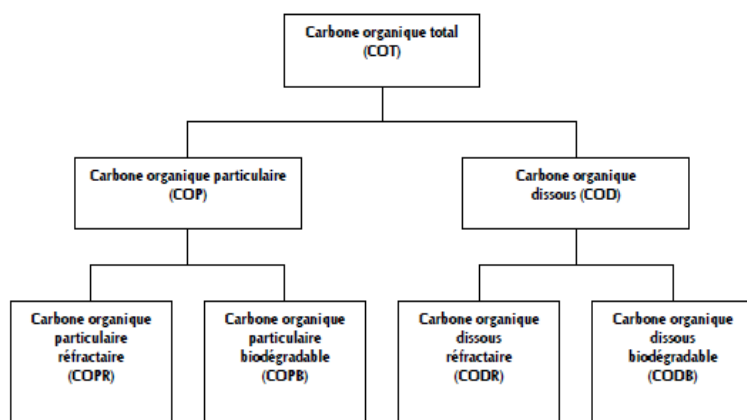


Figure 2 : classification de la matière organique adapté de Crittenden et al., 2005.

Chlorures et sodium

La valeur maximale des chlorures est fixée à 250 mg/L, et celle du sodium à 200 mg/L. Ces deux paramètres sont intéressants puisqu'ils sont abondamment présents dans l'eau de mer. Les chlorures peuvent générer un goût, et présentent une propriété corrosive sur les matériaux métalliques. La présence simultanée de chlorures et de sodium génère un goût salé, et peut éventuellement générer des troubles cardiovasculaires et des désordres électrolytiques en cas de forte concentration et ingestion importante.

Conductivité

La conductivité caractérise la résistance au passage dans l'eau d'un courant électrique. Elle dépend de la nature et de la concentration des ions dissous dans l'eau, augmente avec le degré de

minéralisation de l'eau et varie en fonction de la température. Ses valeurs de référence sont : > 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et < 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C, ou > 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et < 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C. La mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution. Une eau déminéralisée aura une conductivité très faible voire proche de zéro. Une eau très minéralisée aura une conductivité élevée, pouvant éventuellement générer un goût, lié à la nature des ions présents.

Équilibre calcocarbonique

L'équilibre calcocarbonique est un état d'équilibre chimique dans lequel les concentrations en dioxyde de carbone, hydrogénocarbonate et carbonate ne varient pas en présence de carbonate de calcium. Il ne se mesure pas directement, il doit être calculé. Ce calcul permet de classer les eaux dans les catégories « eau douce », « eau équilibrée » ou « eau dure », transcrites dans la réglementation par « eau agressive », « eau à l'équilibre », « eau légèrement incrustante », ou « eau incrustante ». Le niveau réglementaire recherché est « eau légèrement incrustante ». Une eau souterraine acide (potentiellement riche en CO₂) mise au contact de carbonate de calcium (roche) va dissoudre celui-ci jusqu'à atteindre un état d'équilibre chimique dit équilibre calcocarbonique. Le

calcul et l'étude de cet équilibre permet de prévoir le comportement de l'eau sur son environnement (Hissel et Salengros, 2002). Si l'eau est agressive, elle va capter les ions présents dans son environnement (y compris lorsqu'elle est dans une canalisation). Si l'eau est incrustante, elle aura tendance précipiter des ions sur les matériaux avec lesquels elle est en contact. De nombreux cations et anions participent à cet équilibre. Les principaux cations sont : hydronium, calcium, magnésium, sodium, potassium. Les principaux anions sont : hydroxyle, carbonate, hydrogénocarbonate, sulfates, chlorures, nitrates. Le calcul de l'équilibre calcocarbonique peut notamment s'effectuer par la méthode Legrand-Poirier ou la méthode Hallopeau-Dubin.

pH

Le potentiel hydrogène (pH), reflète le caractère acide ou basique d'une eau. La fourchette des valeurs usuelles s'étend de 0 à 14, avec une valeur de neutralité fixée à 7. C'est une mesure de l'activité chimique des protons en solution aqueuse (alors sous forme hydronium). La réglementation fixe la valeur de pH désirée entre 6,5 et 9. En effet, si le pH est inférieur à 6,5, le caractère acide de l'eau risque de générer de la corrosion des matériaux en contact, avec pour conséquence une charge de l'eau en ions. Si le pH est supérieur à 9, la configuration chimique de certains éléments peut être modifiée (produits de désinfection chlorée notamment).

Titre hydrotimétrique

Le titre hydrotimétrique (TH) est communément appelé « dureté » de l'eau. C'est un indicateur de la minéralisation

de l'eau, notamment en ions calcium et magnésium. Il peut s'exprimer en mg/L ou en degré français (°f), un degré français correspondant à 10 mg/L de calcium. Entre 0 et 7°f, l'eau est considérée comme « très douce ». Entre 7 et 15°f, elle est « douce ». Entre 15 et 30°f, l'eau est « plutôt dure ». Entre 30 et 40°f, elle est « dure ». Et au-delà de 40°f, elle est considérée comme « très dure ». Une comparaison pourrait être effectuée avec l'équilibre calcocarbonique, mais les informations fournies par l'un et l'autre de ces paramètres sont néanmoins différentes.

Titre alcalin complet

Le titre alcalin complet (TAC) est utilisé pour mesurer les taux d'hydroxyde, de carbonate et de bicarbonate de l'eau. Son unité est également le degré français (°f). Ce paramètre donne des informations sur l'alcalinité de l'eau.

INTERPRÉTATION COMBINÉE DES PARAMÈTRES CHIMIQUES ET ORGANOLEPTIQUES

La lecture d'un rapport d'essai doit être effectuée en deux étapes. Le premier niveau de lecture de résultats d'analyse d'eau consiste à identifier un par un les paramètres dont les valeurs sont en dehors des exigences réglementaires, et estimer les conséquences de ces non conformités prises individuellement. Le second niveau de lecture consiste en la mise en corrélation des paramètres non conformes entre eux, ou avec d'autres paramètres conformes pour leur part, afin d'avoir une analyse globale de la situation rencontrée. En effet, un certain nombre de paramètres sont liés, et une interprétation combinée apportera des informations cruciales complétant une interprétation individualisée des paramètres non conformes. Des groupes de paramètres ayant un rôle d'indicateur peuvent ainsi être identifiées.

Indicateurs de confort

Le biofilm est un ensemble de micro colonies, entouré d'une matrice hautement hydratée, anionique et constituée d'exopolysaccharides. La formation d'un biofilm est un phénomène commun à la majorité des matériaux mis en présence d'eau, et sont généralement contaminés par des microorganismes. Les réservoirs de stockage et les réseaux de distribution d'eau potable sont colonisables par les biofilms du fait de la simple adhésion initiale de microorganismes, ce qui constitue pour eux une forme de résistance contre les agressions physiques (forces de cisaillements dues aux grandes vitesses d'écoulements, absence de lumière) ou chimiques (présence d'un agent biocide circulant, faible concentration en éléments nutritifs ...). La présence d'agents biologiques au sein des biofilms peut être variée : bactéries, champignons, algues, protozoaires, notamment (Boutaleb, 2007). Un biofilm est considéré comme étant un écosystème évolutif, relarguant notamment et régulièrement des morceaux d'exopolysaccharides contenant des microorganismes. Ces particules sont alors directement au contact du chlore libre contenu dans l'eau, lequel se transforme pour partie en sous-pro-

duits chlorés : les trihalométhanes (Bernier, 2015). Plusieurs paramètres vont donc évoluer dès lors que le biofilm présent est important. Le taux de chlore libre va diminuer rapidement, générant un écart avec le taux de chlore total de plus en plus important au fur et à mesure que le biofilm se développe. Le taux de THM va augmenter également en parallèle, preuve de dégradation du chlore par de la matière organique (Marchand, 1989). Ces paramètres sont intéressants à suivre dans le temps. En effet, la réglementation impose que les réservoirs de stockage des EDCH à bord des bâtiments soient nettoyés et désinfectés tous les 12 à 15 mois. Cet état zéro permet de garantir l'absence de biofilm lors de la remise en service des installations. Des mesures régulières du chlore libre, du chlore total, et des THM permettront de suivre leur évolution et d'estimer la vitesse de développement du biofilm. De nouvelles opérations de nettoyage désinfection pourront alors être déclenchées plus tôt si besoin. De même, une dérogation de report de l'échéance à respecter pourrait être accordée si les valeurs permettent de juger que le développement du biofilm est encore acceptable. Dans le cas où la présence de THM est en excès (par effet cumulatif) mais que le bâtiment ne peut effectuer les opérations de nettoyage et désinfection pour raison opérationnelle, il est alors demandé que les réservoirs de stockage soient vidés à 50% et renouvelés par des eaux destinées à la consommation humaine (produites à bord ou approvisionnées au port base) dépourvues de sous-produits chlorés. Ce phénomène est principalement constaté lorsque l'eau est stockée de manière prolongée dans les réservoirs.

Indicateurs d'une désinfection efficace

Comme évoqué dans le point précédent, la désinfection des eaux à bord des bâtiments repose sur la présence de chlore libre. Plus précisément, le rôle attendu du chlore libre est de maintenir la qualité des eaux produites et stockées (c'est-à-dire éviter une prolifération microbienne potentielle), et non de procéder à la destruction d'une flore non éliminée par les étapes technologiques appliquées lors de la production d'eau (par osmose inverse dans la majorité des cas, par évaporation sinon). La présence du chlore libre est donc indispensable, et de préférence sous sa forme active. Plusieurs paramètres influent sur la présence, la stabilité et l'efficacité du chlore libre actif. Les principaux sont la turbidité, la température et le pH. La turbidité reflète la présence particulaire. Lorsque ces particules sont de nature organique, le chlore interagit et le taux de chlore libre actif diminue d'autant. C'est notamment ce qu'il se passe en présence d'agents biologiques, leur neutralisation s'effectue par le chlore libre, dont le taux chute alors en conséquence. Le taux de chlore combiné est alors amené à augmenter, le taux de chlore total restant relativement stable. La température a également un effet sur le taux de chlore libre. Au-delà de +25°C, la stabilité du chlore est nettement réduite, provoquant une diminution prématurée du taux de chlore libre actif dans l'eau. La valeur de pH est très importante dans la répartition entre chlore libre actif et chlore libre potentiel. Pour mémoire, dans l'eau, le chlore libre se trouve sous trois formes d'état en équilibre : l'acide hypochloreux HOCl, l'ion hypochlorite ClO⁻ et l'ion chlorure

Cl⁻ (ENSEEIH, 2004). L'acide hypochloreux possède les propriétés désinfectantes les plus importantes, l'ion hypochlorite étant peu oxydant et peu bactéricide. Pour autant, les solutions industrielles chlorées utilisées le plus souvent dans le traitement des EDCH (et notamment conformes à la norme EN 901) sont sous forme d'hypochlorite de sodium. De ce fait, et selon les courbes de modélisation ci-dessous, il est préférable d'avoir un pH de l'eau entre 7 et 8 afin que le pouvoir désinfectant du chlore soit suffisant (**figure 3**). En synthèse, et en rapportant ces éléments aux conditions rencontrées à bord des bâtiments, il faut retenir que le chlore introduit dans les EDCH sera efficace de manière optimale lorsque l'eau présente une turbidité faible, une température modérée (idéalement entre 15 et 20°C), et un pH situé dans une fourchette de 7 à 8. Un point important reste néanmoins à souligner. Lorsque les mesures de taux de chlore sont effectuées, tant à bord par les analyseurs portatifs qu'en laboratoire, seuls le chlore libre ou le chlore total sont mesurés. La distinction entre le chlore libre actif et le chlore libre potentiel ne ressort pas. C'est donc à la lecture conjointe de la température et du pH que les parts de chlores libres actif et potentiel seront estimées, et par conséquent que le pouvoir désinfectant réel du chlore introduit dans l'eau sera évalué.

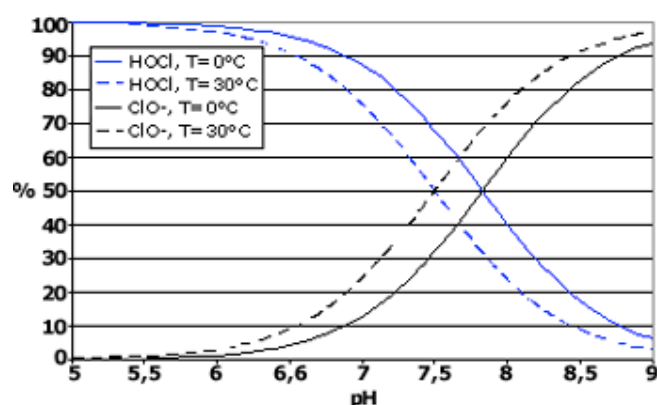


Figure 3 : influence du pH sur l'équilibre entre l'acide hypochloreux et l'ion hypochlorite dans les EDCH.

Indicateurs de l'équilibre calcocarbonique (figure 4)

Il a été décrit précédemment que le calcul de l'équilibre calcocarbonique s'effectuait à partir de la mesure d'un certain nombre de composés. Ce calcul complexe ne pouvant être effectué qu'en laboratoire, il peut être utile d'avoir une estimation de cet équilibre à partir de valeurs clés disponibles par mesures simples effectuées à bord. Quatre paramètres clés sont alors intéressants à connaître : la conductivité, le pH, le TH et le TAC. La conductivité informe sur la présence globale de cations et d'anions, le pH influe sur la conformation d'une molécule, le TH indique la présence de cations et le TAC informe sur l'alcalinité de l'eau (Chhun, 2007).

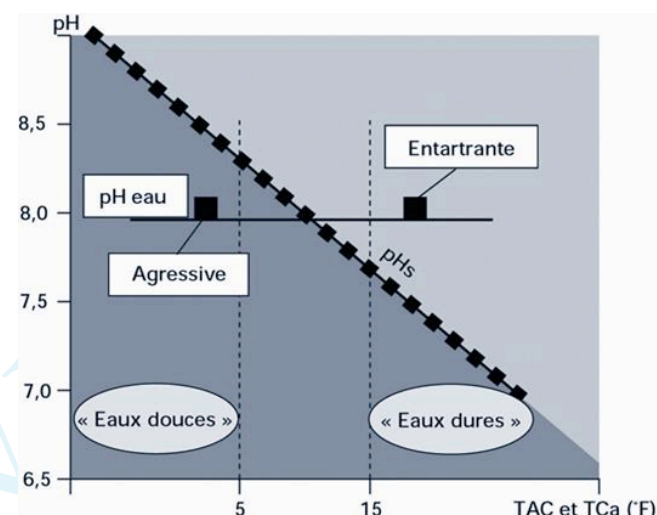


Figure 4 : illustration de l'équilibre calcocarbonique en fonction du pH et du TAC

Si Langelier a été le premier à définir l'indice auquel l'eau peut être considérée comme équilibrée, la balance de Taylor (**figure 5**) illustre les interactions entre le pH, le TH et le TAC. La production d'eau par osmose inverse fournit en sortie de membrane une eau très peu minéralisée. Celle-ci est donc reminéralisée afin d'atteindre des valeurs de TH et TAC acceptables. Pour autant, une « surminéralisation » n'est pas souhaitable, et les valeurs minimales de TH et TAC seront retenues comme valeurs cibles. A savoir entre 8 et 10°f pour chacune des valeurs. En consultant la balance de Taylor, nous constatons que la valeur de pH idéale pour atteindre un équilibre calcocarbonique est dans ces conditions autour de 8. Afin de simplifier les calculs pour les opérateurs, la règle des trois 8 peut être évoquée : si lors des mesures à bord lors de la production les valeurs de pH, TH et TAC sont très proches de 8, alors il peut être considéré que l'eau est équilibrée. Les informations évoquées à propos de l'efficacité de la désinfection chlorée doivent également être prises en considération : un pH inférieur à 8 serait bénéfique pour l'efficacité du chlore libre actif mais il serait générateur d'une eau agressive.

Indicateurs de bon fonctionnement des appareils de production

La production d'EDCH à partir d'eau de mer s'effectue majoritairement de nos jours par recours à la technologie d'osmose inverse (Maurel, 2001). Cette technologie de filtration apporte une réduction drastique des composants de l'eau de mer, mais ne permet pas d'obtenir de l'eau autant déminéralisée que lors d'évaporation par ébullition (les « bouilleurs » dont certains bâtiments sont encore équipés). L'osmose inverse est une technologie relativement simple consistant en la mise sous haute pression de l'eau de mer contre des membranes au seuil de coupure très faible (environ 0,1 µm). Seules les molécules les plus petites passent au travers des membranes (H₂O en majorité) (Aimar et al. 2016). La connaissance de la technologie appliquée permet de définir des paramètres clés permettant de suivre le bon fonction-

nement des membranes et la bonne réalisation de la filtration (Danis, 2003). Quatre paramètres intéressants sont à retenir.

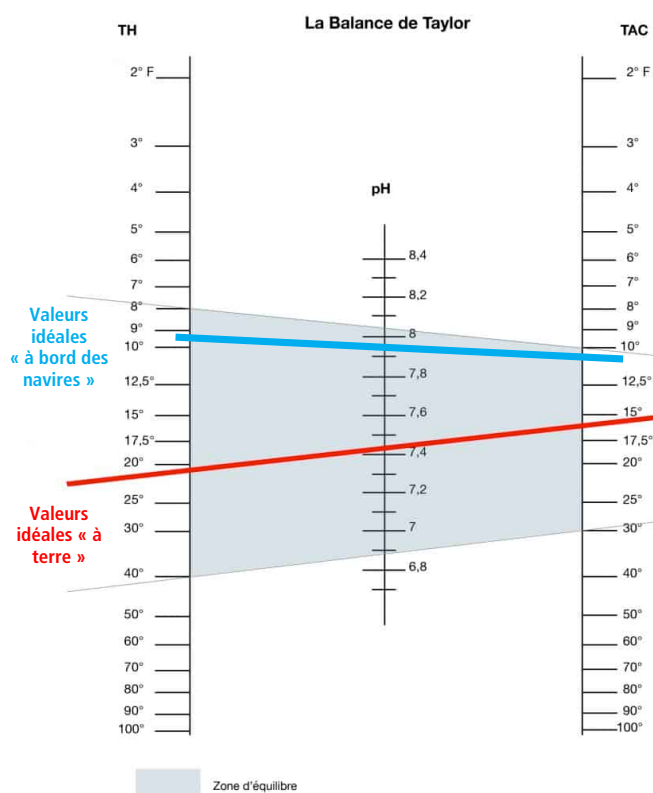


Figure 5 : balance de Taylor illustrant la zone d'équilibre calcocarbonique des EDCH en fonction du pH, du TH et du TAC.

La conductivité

La conductivité est un paramètre indicateur général du fonctionnement. Les valeurs de conductivité attendues en sortie de membrane avoisinent 150 à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lors du traitement d'eau de mer, et sont généralement entre 10 et 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lors du traitement d'eaux brutes non salées. Au fur et à mesure que la membrane vieillit, ou lors d'incident, la conductivité augmente. Néanmoins, ce seul paramètre ne suffit pas à statuer sur les performances de la membrane. En effet, la conductivité varie également en fonction de la température de l'eau de mer : en eaux froides, une conductivité habituellement autour de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour une eau à 20°C peut tomber à moins de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les chlorures et le sodium

Les chlorures et le sodium sont très abondants dans l'eau de mer. Les membranes assurant un abattement de chaque composant, une augmentation de la présence des ions chlorures et sodium dans l'eau produite peut être un signe de mauvais fonctionnement. Néanmoins, ces valeurs sont appelées à varier en fonction de la salinité initiale de l'eau de mer filtrée. En effet, s'il est admis que la salinité moyenne des océans est de 35 g/L, elle se situe à 30 g/L en océan Atlantique Nord, et plutôt à 40 g/L en Mer

Rouge. Ces deux seuls paramètres ne suffisent donc pas pour identifier de façon certaine une baisse de performance des membranes.

Le bore

Le bore (sous forme d'acide borique aux pH rencontrés) est une molécule très petite et présente dans l'eau de mer. Lorsque les membranes perdent en performance, le bore est parmi les premières molécules à être moins retenues, ce qui constitue un signe d'alerte précoce.

Le nickel

Ce paramètre peut être considéré lorsque la production d'eau est effectuée par évaporation et non par filtration. En effet, les bouilleurs sont notamment constitués d'éléments métalliques au contact desquels l'eau peut se charger. Dans cette configuration, la présence de nickel en excès n'est alors pas un signe de vieillissement de l'installation, car on la retrouve lors de la remise en service des installations. Un lessivage des composants métalliques de quelques heures, voire quelques jours, est nécessaire avant que les taux de nickel redescendent dans les normes réglementaires. Il est par conséquent utile de le mesurer dans le cadre du pilotage des installations.

Indicateurs de potentiels actes de malveillance

Si la maîtrise des risques sanitaires est un objectif depuis de nombreuses années, la maîtrise des risques liés à un acte de malveillance est également devenue incontournable. Les mesures préventives à mettre en place sont de plusieurs natures (analyse des risques, barrières physiques, gestion du personnel, etc...) et incluent notamment une surveillance analytique du fonctionnement des installations. Lorsque qu'une substance toxique est introduite dans les EDCH, elle provoque de facto une variation de certains paramètres (figure 6).

Ainsi, les paramètres intéressants à surveiller dans cette optique sont principalement la conductivité, le chlore, la turbidité et le carbone organique total (COT). En fonction de leur nature cationique ou anionique, les ions introduits potentiellement dissous dans l'eau font varier la conductivité. L'introduction d'un polluant étant généralement soudaine et massive, la variation de la conductivité peut être importante et facilement détectée. Le chlore libre peut interagir avec le polluant introduit et chuter brutalement. Sa mesure régulière permet alors de repérer cette chute soudaine non justifiée. La turbidité peut être amenée à augmenter de manière significative sans raison apparente, le polluant introduit pouvant être grossier. Le COT est quant à lui un peu plus spécifique de l'introduction malveillante de polluants de nature organique (lors du remplissage des réservoirs de stockage en escale, par exemple). Ces derniers représentent une large part des polluants susceptibles d'être introduits, par leur facilité de synthèse et d'obtention, les pesticides et les hydrocarbures étant les meilleurs exemples. Une surveillance simultanée de ces paramètres représente une aide à la détection de variations simultanées inexplicables, alertant l'opérateur sur un potentiel acte de malveillance.

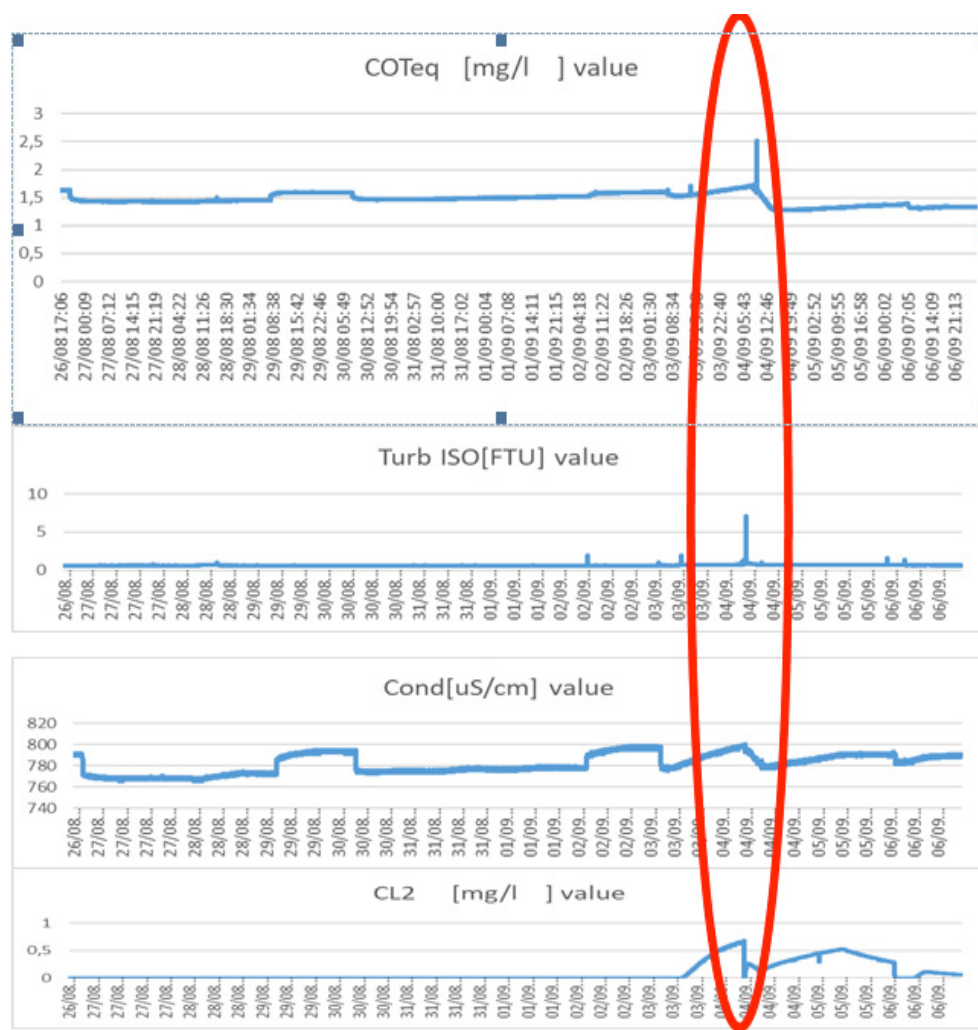


Figure 6 : illustration d'une augmentation simultanée de plusieurs paramètres, dans le cas d'une contamination d'origine malveillante.

MISE EN PLACE DES MESURES DE MAÎTRISE DES PARAMÈTRES CHIMIQUES ET ORGANOLEPTIQUES

Mise en place de moyens techniques

La chimie des EDCH est relativement complexe, et la bonne connaissance des paramètres et de leurs variations est indispensable pour définir une filière adaptée et performante. Les équipements des installations de production d'eau ont ainsi été optimisés afin que l'ensemble des paramètres réglementaires puisse être satisfait. Si l'osmose inverse est désormais la règle sur les bâtiments neufs et récents, elle est complétée d'une reminéralisation par solutés (plus performante que par neutralité), d'une chloration automatique additionnée d'une production de chlore sur site par électrolyse d'eau salée et d'une injection d'acide lorsque cela est nécessaire. Dans les réservoirs de stockage, l'eau est au contact de matériaux autorisés, en bon état, et régulièrement entretenus. Afin de compenser la chute du taux de chlore libre, une recirculation de l'eau des réservoirs passant par une chambre d'analyse et une pompe de rechloration permet de lisser et de maintenir le taux de chlore libre dans les valeurs autorisées.

Enfin, les réseaux de distribution sont également configurés et installés de manière à ce que la qualité de l'eau ne soit pas altérée lors de l'acheminement vers les points d'utilisation.

Actions de surveillance

Les moyens techniques adaptés étant définis et installés, il faut s'assurer de leur bon fonctionnement. L'opérateur doit donc réaliser des actions de surveillance afin de détecter tout dysfonctionnement, toute anomalie. La surveillance s'effectue à deux niveaux. Le premier niveau est la surveillance technique. Il s'agit de s'assurer que les équipements fonctionnent de manière nominale et selon les prescriptions du fabricant. Par exemple, ceci consiste en la surveillance de pressions délivrées par des pompes, en la recherche de fuites, de vibrations ou bruits anormaux, etc... Le second niveau est la surveillance analytique (Rodier et al. 2016). Afin de s'assurer que les performances des équipements installés sont conformes aux attendus, certains paramètres clés peuvent être régulièrement et facilement mesurés par l'opérateur. Ainsi, il a été déterminé que la mesure quotidienne, ou hebdomadaire au minimum, du chlore libre, de la turbidité, de la conductivité, du pH et de la dureté (à laquelle on peut ajouter le TAC) permettaient de garantir que les per-

performances attendues étaient présentes. Afin que l'opérateur de l'équipage (qui n'est pas chimiste) puisse réaliser ces mesures, des équipements portatifs ont été mis à disposition des bords depuis 2012 (**figure 7**). Faciles d'utilisation et fiables, ces équipements permettent une surveillance rapprochée des installations de production, stockage et distribution des EDCH à bord des bâtiments de la marine.



Figure 7 : appareils de mesure portatifs utilisés à bord des bâtiments de la marine nationale.

La réalisation de ces mesures par l'opérateur étant discontinuée bien que fréquente, il est actuellement envisagé d'équiper les bâtiments d'analyseurs en ligne (**figure 8**).



Figure 8 : appareil de mesure en continu installé sur le PHA Tonnerre.

Trois avantages majeurs à l'adoption de ces nouveaux équipements de mesure : la mesure en continu (permettant une alerte précoce en cas d'écart - notion d'« early warning system »), la mesure du COT (important dans la détection des actes de malveillance, et non réalisable avec les appareils portatifs), et l'allègement des tâches de surveillance par l'opérateur (l'utilisation des appareils portatifs étant relativement chronophage) (Cabre, 2017).

Contrôle sanitaire

Des actions de contrôle sanitaire sont nécessaires pour compléter les actions de surveillance. Les modalités précises sont fixées dans une circulaire dédiée à la maîtrise de la qualité des EDCH à bord des bâtiments de la marine. Ces modalités ont pour objectif d'adapter la réalisation du contrôle au milieu naval, tout en permettant d'atteindre les exigences de résultats fixées par le code de santé publique. Le contrôle sanitaire est réalisé par les vétérinaires des armées et les techniciens vétérinaires. Il est constitué d'une inspection, incluant un audit technique et l'évaluation du registre sanitaire tenu à jour par l'équipage, et d'analyses de laboratoire complètes, reprenant les exigences du code de santé publique.

Formation du personnel embarqué

Deux catégories de personnel embarqué sont impliquées dans la maîtrise de la qualité des EDCH : le personnel du service de santé des armées (médecin, infirmier), et le personnel mécanicien (quartiers-maîtres de la flotte, officiers mariniers, officiers). Le personnel du service de santé est le conseiller dans les domaines sanitaires du commandant du bâtiment. Ni le médecin ni l'infirmier ne sont en charge de l'exploitation des installations ou de la réalisation de la surveillance, mais ils doivent avoir les informations suffisantes leur permettant d'interpréter les résultats afin d'émettre un avis éclairé sur l'autorisation de mise en consommation des EDCH, donnée par le commandant et lui seul. Les médecins et les infirmiers embarqués sont notamment formés à la maîtrise de la qualité des EDCH à bord des bâtiments par le centre de formation de médecine navale de Toulon, grâce à certains cours délivrés par des vétérinaires des armées. Le personnel mécanicien du bord est chargé de l'exploitation et de la maintenance de toutes les installations de production, stockage et distribution des EDCH du bâtiment. S'il est formé et diplômé en mécanique, ses connaissances sanitaires dans le domaine des eaux et les compétences en analyse des risques doivent être développées. Une formation initiale dispensée par la marine existe, et il pourrait être envisagé de développer encore cette dernière afin de permettre au personnel mécanicien de mieux appréhender les enjeux et l'importance de la chimie de l'eau, la réalisation d'une analyse des risques et la mise en œuvre d'actions correctives rapides et adaptées.

CONCLUSION

Si les valeurs réglementaires des paramètres chimiques et organoleptiques des EDCH sont indispensables à connaître et respecter, l'interprétation et l'exploitation des résultats d'analyse d'eau sont fondamentales. Cet outil, complémentaire de l'analyse des risques et des procédures de pilotage et de surveillance des installations, est source de nombreuses informations et doit être utilisé en tant que tel. Quels que soient les paramètres concernés, limite ou références de qualité, la lecture des valeurs hors norme doit être effectuée à deux niveaux : la lecture des paramètres pris individuellement, donnant déjà un certain nombre d'informations sur les propriétés chimiques intrinsèques de l'eau analysée ; et la lecture combinée de certains paramètres, qui permet de mieux cerner les propriétés globales de l'eau et d'identifier les raisons techniques ou autres ayant pu conduire à ces valeurs. L'interprétation combinée de certains paramètres peut ainsi donner des informations précieuses sur :

1. l'envie et le plaisir que les consommateurs auront à utiliser l'eau. En effet, utiliser l'eau ne doit pas générer de réticence du consommateur. La douche ne doit pas provoquer de sensation désagréable ou provoquer de gêne ou pathologie cutanée. La consommation de l'eau doit être agréable, sans goût ou odeur particulière.
2. la présence éventuelle de biofilm au contact des eaux. Celui-ci étant potentiellement générateur de contaminants microbiologiques (bactéries contenues dans le biofilm) ou macroscopiques (morceaux d'exo-polysaccharides se détachant régulièrement du biofilm), le suivi de son développement est important afin de décider d'opérations de nettoyage et désinfection au moment opportun.
3. l'efficacité de la désinfection mise en œuvre. Si l'ajout de chlore dans les eaux est systématique, encore faut-il que l'action désinfectante soit garantie. En effet, seul le chlore libre actif (l'acide hypochloreux) est réellement efficace, et sa présence n'est pas garantie en toutes circonstances.
4. l'équilibre calcocarbonique de l'eau. Une eau agressive sera délétère pour les matériaux avec lesquelles elle est en contact, se chargeant de ce fait en polluants. Une eau incrustante provoquera un dépôt minéral excessif sur les équipements et canalisations. Il est donc important de s'assurer que l'eau est équilibrée et stable chimiquement pendant son stockage.
5. le bon fonctionnement des équipements de production d'eau. Le pilotage des installations par l'opérateur, tant au quotidien que sur le long terme, nécessite de suivre des indicateurs chimiques afin d'évaluer le bon fonctionnement et anticiper les opérations de maintenance des installations de production.
6. une potentielle contamination malveillante de l'eau. En complément de la maîtrise des risques sanitaires, la maîtrise des risques liés à une contamination ou pollution intentionnelle est devenue incontournable. Seul le suivi de certains paramètres révélateurs d'une modification soudaine de la composition de l'eau peut permettre de repérer un acte de malveillance et éviter ainsi une mise en danger de l'équipage.

En plus de permettre un pilotage fin des installations au quotidien, l'interprétation combinée des paramètres permet également de définir des actions plus larges, au titre notamment du retour d'expérience, et à des fins d'amélioration du système initialement défini. En effet, les connaissances accumulées ces dernières années ont permis :

1. d'apporter un certain nombre de modifications significatives de la filière de production des EDCH, que ce soit à partir d'eau de mer ou d'eaux brutes approvisionnées au quai dans les ports d'escale à l'étranger ;
2. la mise en œuvre par les opérateurs d'opérations de surveillance techniques et analytiques des installations ;
3. d'adapter les modalités du contrôle sanitaire à l'environnement naval des bâtiments et de mieux former les membres d'équipage, acteurs de la chaîne des EDCH.

La chimie des eaux destinées à la consommation humaine est complexe. Il est nécessaire de la connaître et de la comprendre afin de pouvoir anticiper d'éventuels dérives ou incidents, et parvenir ainsi à un niveau de maîtrise des risques satisfaisant. Le retour d'expérience accumulé ces dernières années à bord des bâtiments de la marine a déjà permis la mise en œuvre de nombreuses améliorations par la marine et le service de santé des armées. En complément, d'autres projets et expérimentations sont encore à mener à terme.

BIBLIOGRAPHIE

- Aimar P, Bacchin P, Maurel A. Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT) – Aspects théoriques : mécanismes de transfert. Techniques de l'ingénieur. 2016 ; J 2789, p. 1-14.
- ANSES. Evaluation des risques sanitaires du bore dans les eaux destinées à la consommation humaine, du 25 juillet 2016. Disponible à : <https://www.anses.fr/fr/content/avis-de-lanses-relatif-%C3%A0-l%E2%80%99%C3%A9valuation-des-risques-sanitaires-du-bore-dans-les-eaux-destin%C3%A9es> (consulté le 23.09.2019)
- ANSES. Evaluation des risques sanitaires liés aux situations de dépassement de la limite de qualité du paramètre « trihalométhanes totaux » dans les eaux destinées à la consommation humaine, du 15 avril 2010. Disponible à : <https://www.anses.fr/fr/content/avis-de-l%E2%80%99agence-fran%C3%A7aise-de-s%C3%A9curit%C3%A9-sanitaire-des-aliments-relatif-%C3%A0-l%E2%80%99%C3%A9valuation-des-62> (consulté le 23.09.2019)
- Bernier A. Caractérisation de la matière organique des eaux naturelles et traitées par spectroscopie de fluorescence 3D. Mémoire de l'université de Laval Québec. 2015.
- BOA (Bulletin officiel des armées). Instruction n° 3252/DEF/DCSSA/PC/VET du 9 juillet 2014. Mise en œuvre de la surveillance de la qualité et du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine, pour les forces en opérations et à l'entraînement. Édition Chronologique n° 41 du 21 août 2014.
- BOA (Bulletin officiel des armées). Circulaire n° 2093/ARM/EMM/MDR - n° 515069/ARM/DCSSA/ESSD du 22 novembre 2019. Maîtrise de la qualité des eaux à bord des bâtiments de la marine nationale et modalités de la surveillance et du contrôle sanitaire. Édition Chronologique n° 181 du 4 décembre 2019.
- Bornert G, Boni M, Chicot JP, Deniau JM, Dulieu F, Hadengue B et al. Guide pratique pour l'interprétation et l'exploitation des résultats des analyses d'eau. 2ème ed. 2013.
- Boutaleb N. Etude de la formation de biofilms sur les surfaces de matériaux couramment utilisés dans les canalisations d'eau potable. Thèse Univ Bretagne-sud, 2007.
- Cabre O. Sûreté de la chaîne de l'eau dans les armées. Mémoire Master 2 « sciences et technologies santé publique et sciences sociales – risques sanitaires radionucléaires, biologiques, chimiques et explosifs ». École du Val-de-Grâce, Paris. 2017.
- Chhun S. Neutralisation et reminéralisation de l'eau potable avant distribution. Synthèse technique. Office International de l'Eau. Février 2007.
- Danis P. Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'ingénieur. 2003 ; J 2700.
- ENSEEIHT (École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications). Implantation d'un réseau d'eau potable : de la rivière au robinet. Disponible sur : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0304/optsee/bei/5/binome5/genechlo.htm#gene4> (consulté le 28.04.2020).
- Evlampidou I, Font-Ribera L, Rojas-Rueda D, Gracia-Laveda E, Costet N, Pearce N et al. Trihalomethanes in drinking water and bladder cancer burden in the European Union. Environ Health Perspect. 2020; 128: 017001.
- Gutierrez-Capitan M, Brull-Fontserne M, Jimenez-Jorquera C. Organoleptic analysis of drinking water using an electronic tongue based on electrochemical microsensors. Sensors (Basel). 2019; 19: 1435.
- Hissel J, Salengros P. Nouveau mode de représentation graphique de l'équilibre calco-carbonique. Application au traitement des eaux. Revue des sciences de l'eau. 2002 ; 15 : 435-458.
- JORF (Journal officiel de la république française). Code de la santé publique. Nouvelle partie réglementaire, eaux potables. Articles R. 1321-1 à R. 1321-105. Disponible à : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006072665/ (consulté le 23.09.2019)
- JORF (journal officiel de la république française). Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine. 2007. Disponible à : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT00000465574/2021-01-27/> (consulté le 23.09.2019)
- Marchand M. La contamination des eaux continentales par les micropolluants organiques. Revue des sciences de l'eau. 1989 ; 2 : 229-264.
- Maurel A. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Lavoisier Tec et Doc. 2001.
- Mouly D, Joulin E, Rosin C, Beaudeau P, Zeghnoun A, Olszewski-Ortar A, Munoz JF. Les sous-produits de chloration dans l'eau destinée à la consommation humaine en France. Institut de veille sanitaire, 2008, 73 p. Disponible à <https://www.santepublique-france.fr/content/download/146183/2133448> (consulté le 23.09.2019)
- Proulx F, Rodriguez M, Sérodes J-B. Les goûts et les odeurs dans l'eau potable : revue des composés responsables et des techniques de mesure. Revue des sciences de l'eau. 2010 ; 23 : 303-323.
- Rodier J, Legube B, Merlet N. L'analyse de l'eau. Editions Dunod. 10ème édition. 2016.