

ÉTAT MICROBIOLOGIQUE DE L'EAU POTABLE

ÉTUDE PAR CYTOMÉTRIE EN FLUX DES EAUX ALIMENTANT LA RÉGION D'YVERDON-LES-BAINS – GRANDSON

La cytométrie en flux est une technique moderne et rapide permettant de définir l'état microbiologique d'un réseau d'alimentation en eau potable. L'étude détaillée des réseaux d'eau de la région d'Yverdon-les-Bains – Grandson a permis de déterminer les communautés microbiennes des principales ressources en eau et de suivre leur évolution spatio-temporelle dans le réseau d'adduction, de stockage et de distribution. Une telle caractérisation de l'état microbiologique à l'échelle du réseau d'eau constitue un outil de gestion supplémentaire pour les distributeurs d'eau.

Michiel Pronk*, fcm-lab Sàrl

Daniel Urfer, RWB Groupe SA; Christophe Bonnet, SAGENORD

ZUSAMMENFASSUNG

MIKROBIOLOGISCHER ZUSTAND DES TRINKWASSERS: RÄUMLICHE UND ZEITLICHE CHARAKTERISIERUNG DES TRINKWASSERS DER REGION YVERDON-LES-BAINS – GRANDSON MITTELS DURCHFLUSSZYTOMETRIE

Neben den physikalisch-chemischen Aspekten ist die biologische Stabilität des Trinkwassers in einem Versorgungsnetz ein wesentlicher Faktor zur Sicherung der hygienischen Qualität des Wassers. Mithilfe der Durchflusszytometrie, eines modernen Verfahrens zur Analyse mikrobieller Populationen in Wasserproben, kann der mikrobiologische Zustand eines Wasserverteilnetzes charakterisiert werden. In der vorliegenden Studie konnten durch eine detaillierte räumliche und zeitliche Überwachung der Trinkwassernetze der Region Yverdon-les-Bains – Grandson nicht nur die Mikroorganismengemeinschaften in den Wasserressourcen bestimmt, sondern auch die Entwicklung dieser Populationen im Netz (z. B. mikrobiologische Stabilität, erneutes mikrobiologisches Wachstum und Kontaminierung) verfolgt werden. Die Ergebnisse lieferten vertiefte Kenntnisse über den gesamten und aktuellen mikrobiologischen Zustand des Wassernetzes. Dadurch konnten die «kritischen» Elemente innerhalb dieses Netzes aufgezeigt werden. Eine solche Charakterisierung ist ausserdem ein zusätzliches Instrument für die Netzbetreiber, mit dem sie die Auswirkungen zukünftiger struktureller Veränderungen des Netzes auf den mikrobiologischen Zustand des Wassers ermitteln können.

INTRODUCTION

La gestion de l'eau potable tout au long de sa chaîne de production, de transport, de stockage et de distribution nécessite non seulement un suivi de nombreux paramètres physico-chimiques [1], mais également des connaissances étendues de son état microbiologique; la stabilité biologique au sein d'un réseau constituant un élément important pour garantir la qualité hygiénique de l'eau distribuée [2, 3]. Aujourd'hui encore, cette qualité hygiénique de l'eau est fondée sur les analyses bactériologiques par mise en culture dans des milieux spécifiques [4], notamment sur l'analyse des germes aérobies mésophiles et des indicateurs de contamination fécale (i. e. *E. coli* et entérocoques). Bien que ces paramètres soient essentiels pour un contrôle de la qualité microbiologique de l'eau distribuée selon les exigences définies par la législation (OPBD, RS 817.022.11, annexe 1), ils ne permettent pas – ou difficilement – d'inférer l'état microbiologique d'un réseau d'eau [5, 6].

Durant les deux dernières décennies, l'application de la cytométrie en flux (FCM, *flow cytometry*) s'est considérablement développée et répandue dans le domaine de l'eau potable [7–9] et plus récemment dans le domaine de la surveillance en continu de la qualité microbiologique de l'eau potable [10–13]. En effet,

* Contact: michiel.pronk@fcm-lab.ch

cette technique permet une détermination rapide du nombre total de cellules dans un échantillon d'eau et la caractérisation de l'empreinte de la communauté microbienne selon par exemple la teneur en acides nucléiques des cellules ou l'intégrité membranaire des cellules [14, 15]. Elle constitue donc un outil quantitatif idéal pour décrire la communauté bactérienne dans un échantillon d'eau à travers quelques paramètres globaux et à un instant donné.

Le présent article synthétise les principaux résultats obtenus dans le cadre d'une étude menée sur les réseaux d'eau potable principaux de la région d'Yverdon-les-Bains – Grandson, plus précisément le réseau régional de SAGENORD et le réseau communal d'Yverdon-les-Bains. Cette étude avait pour but de définir la situation actuelle de l'état microbiologique des réseaux d'eau potable par FCM, aussi bien d'un point de vue spatial que temporel, et de disposer ainsi d'une base de comparaison pour évaluer les impacts des modifications structurelles futures de ces réseaux sur cet état.

ALIMENTATION EN EAU

RESSOURCES EN EAU ET TRAITEMENT

Actuellement, la région d'Yverdon-les-Bains – Grandson est principalement approvisionnée en eau depuis les puits d'Onnens et la source du Cossaux. La redondance est assurée par l'ancienne station de Bellerive.

D'une part, les puits d'Onnens I et II – situés à moins de 100 m du Lac de Neuchâtel à Onnens et appartenant à l'ACRG (Association des Communes de la Région de Grandson) – captent l'eau souterraine (jusqu'à 840 m³/h) dans une nappe phréatique peu profonde. Au niveau de la station de pompage, une zone d'aération a été installée afin d'éliminer entre autres les traces de sulfure d'hydrogène géogène. Puis, à l'introduction dans le réseau régional de SAGENORD (à hauteur de la station de Bellerive), l'eau en provenance des puits d'Onnens est désinfectée à l'eau de Javel. Annuellement, les puits d'Onnens fournissent ~ 2,0 · 10⁶ m³ d'eau aux réseaux d'Yverdon-les-Bains – Grandson, couvrant 57% des besoins en eau. Lorsque la source du Cossaux est hors service, l'alimentation en eau potable dépend temporairement à plus de 90% des puits d'Onnens. D'autre part, la source du Cossaux (débit: 42 à 90 l/s)

émerge au pied nord-ouest du Mont de Chamblon des calcaires du Crétacé [16]. À la sortie du captage, l'eau brute est également désinfectée à l'eau de Javel. Sur un bilan annuel, la source du Cossaux contribue à 37% aux besoins actuels en eau, soit une production de ~ 1,3 · 10⁶ m³/an. Toutefois, épisodiquement, sa contribution peut être nulle. En effet, son caractère typiquement karstique implique des détériorations importantes, notamment dues à la turbidité, la matière organique et les indicateurs de contamination fécale [17–19]. Ainsi, suite aux événements de précipitations intenses, l'eau de la source est mise en décharge.

Enfin, la ville d'Yverdon-les-Bains dispose encore d'une prise d'eau lacustre (Lac de Neuchâtel) en contrebas de Grandson (station de Bellerive). La filière de traitement comprend une chloration choc à la crépine, une filtration rapide sur lit de sable, puis une chloration finale à l'eau de Javel. Bien que la station soit obsolète, elle fonctionne actuellement

à capacité réduite (250 m³/h) et durant 2 h/jour, principalement dans le but de maintenir le fonctionnement des installations. Ainsi, un volume d'eau de ~ 0,2 · 10⁶ m³ est annuellement produit et injecté dans le réseau, soit 6% de la consommation annuelle.

ADDITION, STOCKAGE ET DISTRIBUTION

Le réseau de distribution d'Yverdon-les-Bains – réseau maillé d'env. 130 km – est alimenté par trois réservoirs d'altitudes différentes (fig. 1), soit les réservoirs de Chamblon (535,5 m), de Beauregard (525,5 m) et du Montélaz (629,5 m), et est composé de trois régimes hydrauliques différents (inférieur, intermédiaire – ou supérieur réduit – et supérieur). Le réservoir de Chamblon fixe le principal plan de charge du réseau (régime inférieur). Celui de Beauregard, équipé d'une station de pompage, sert essentiellement à remonter l'eau des plans de charge inférieur au supérieur et, en cas de besoin, remplace temporairement le réservoir de

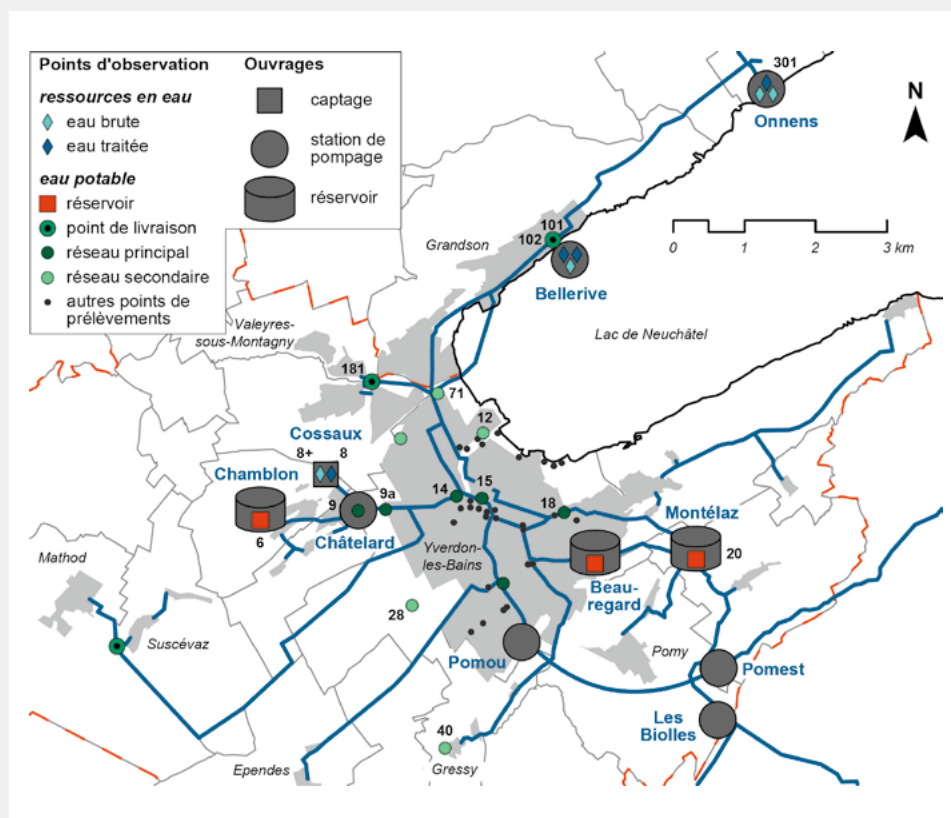


Fig.1 Schéma des réseaux d'eau potable de la région d'Yverdon-les-Bains – Grandson avec localisation des points de prélèvement. Le périmètre des communes membres de SAGENORD est délimité par la ligne rouge discontinue. Les limites communales sont illustrées en gris et leurs réseaux de distribution communaux sont symbolisés par le périmètre de leurs zones à bâtir (surfaces grises). Seules les communes membres de SAGENORD ayant actuellement une connexion physique avec le réseau d'Yverdon-les-Bains ont été représentées. Les principaux axes des réseaux de distribution sont symbolisés par un trait épais bleu. Les points de prélèvement discutés dans cet article sont identifiés au moyen de numéros.

Chamblon. Enfin, celui du Montélaz fixe les plans de charge des hauts quartiers de la ville, ainsi que de plusieurs villages limitrophes au sud (régimes intermédiaire et supérieur).

L'adduction des réservoirs de Chamblon et de Beauregard se fait principalement par pompage des eaux des puits d'Onnens (et de Bellerive) à travers des conduites de transport (sur le territoire de Grandson), puis à travers le réseau de distribution communal yverdonnois. L'adduction du réservoir du Montélaz se fait par relevage principalement depuis le réservoir de Beauregard et secondairement par les stations de pompage successives de Pomou et Pomest.

L'alimentation du réservoir de Chamblon par la source du Cossaux se fait par pompage depuis la station du Châtelard, située au pied de la colline de Chamblon. La station de pompage étant actuellement raccordée directement sur le réseau de distribution yverdonnois, les eaux produites peuvent donc être consommées sans passer par le réservoir de Chamblon.

MÉTHODOLOGIE

RÉSEAU D'OBSERVATION ET STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

Afin d'obtenir une image représentative de l'état microbiologique de l'eau dans les réseaux susmentionnés, une trentaine de points de prélèvement a été sélectionnée. Ces points comprennent les ressources en eau (eaux brutes, eaux traitées), les réservoirs, les points de livraisons et les réseaux de distribution principal et secondaire (fig. 1). Le suivi a été mené sur un cycle hydrologique annuel - de mars 2019 à mars 2020 - avec des campagnes mensuelles de prélèvements. De plus, quelques campagnes de prélèvements ponctuelles et thématiques ont été réalisées sur une trentaine de points supplémentaires. Au total, près de 400 échantillons d'eau ont été prélevés pour analyse par FCM.

TCC, LNA/HNA ET ICC/DCC

La détermination par FCM du nombre total de cellules (TCC, *total cell count*), des nombres de cellules à faible (LNA, *low nucleic acid content bacteria*) et forte (HNA, *high nucleic acid content bacteria*) teneur en acides nucléiques, ainsi que des nombres de cellules intactes (ICC, *intact cell count*) et endommagées (DCC, *damaged cell count*), a été réalisée

au laboratoire selon la méthode décrite dans l'ancien MSDA [20, 21]. Le protocole d'analyse - comprenant le marquage et l'incubation des échantillons, le paramétrage du cytomètre (CyFlow Space, Sysmex Partec), ainsi que le traitement des résultats - a été appliqué de manière strictement identique à l'ensemble des échantillons, permettant une comparaison directe entre tous les résultats [22]. Enfin, tous les échantillons ont été analysés dans un délai d'au maximum 10 h après prélèvement.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

COMPOSANTE COSSAUX

Les résultats pour l'eau brute de la source du Cossaux montrent une importante variabilité temporelle (fig. 2), typique des sources karstiques dynamiques [23]. En effet, le TCC évolue entre 23 000 et 470 000 cellules/ml. Les TCC supérieurs à ~ 50 000 cellules/ml sont directement en lien avec des événements de précipitations intenses, entraînant de nombreux microorganismes du sol, ainsi que des particules minérales et de la matière organique, dans le sous-sol vers les eaux souterraines [18]. Les valeurs plus élevées de la turbidité et de la teneur en carbone organique total confirment ce constat. Alors que les taux LNA/TCC et ICC/TCC moyens ne diffèrent que de quelques pour-cent (jusqu'à 6%) entre les périodes sèches et celles des pluies intenses, un suivi à haute résolution temporelle de plusieurs crues indique toutefois des diminutions importantes et subites de ces taux en l'espace de quelques heures pour ensuite progressivement recouvrer les valeurs initiales, de manière tout à fait inverse à l'évolution de la turbidité (données non présentées).

Lors des campagnes de prélèvements où la source est exploitée pour l'alimentation en eau potable, le TCC de l'eau brute diminue graduellement de 45 000 cellules/ml au mois de mars 2019 à 23 000 cellules/ml au mois d'octobre 2019 (fig. 2), reflétant l'évolution de la situation de hautes eaux aux conditions d'étiage, alors que les taux LNA/TCC et ICC/TCC demeurent stables à 75% ($\pm 3\%$) et respectivement 88% ($\pm 2\%$). La membrane des cellules étant endommagée de manière irréversible par la chloration [24], l'eau chlorée présente un abattement important de l'ICC et dans une moindre mesure des TCC et LNA (fig. 2). Un rééquilibrage est ensuite rapi-

dement atteint au niveau de la station de pompage du Châtelard, située à proximité de la source et introduisant l'eau de celle-ci dans le réseau. Ainsi, la signature microbiologique de la composante Cossaux alimentant le réseau est caractérisée par un TCC relativement faible (< 50 000 cellules/ml), un taux LNA/TCC supérieur à 75% et un taux ICC/TCC inférieur à 20%. Comme mentionné auparavant, l'eau traitée de la source du Cossaux peut être introduite - via la station de pompage du Châtelard et selon la demande - soit directement dans le réseau de distribution, soit dans le réservoir de Chamblon. Dans le premier cas, les TCC, LNA et ICC de l'eau distribuée n'évoluent guère par rapport à la signature microbiologique de la composante Cossaux (fig. 3a). Le temps de séjour étant relativement court, une stabilité microbiologique est donc observée. Dans le deuxième cas, à l'inverse, une modification drastique de l'empreinte de la communauté microbienne survient dans le réservoir de Chamblon (fig. 3b). Alors que le TCC se maintient à ~ 50 000 cellules/ml, une brusque diminution du LNA (taux LNA/TCC: 23%) et une forte augmentation de l'ICC (taux ICC/TCC: 63%) sont observées. Le temps de résidence prolongé au sein du réservoir, dû au faible marnage et accentué par le volume important du réservoir (14 000 m³), la diminution du chlore résiduel libre et la présence de carbone organique assimilable (COA) - provenant de l'oxydation de la matière organique par le chlore - sont des facteurs propices au développement microbien [25, 26]. Enfin, à l'instar du premier cas, aucun changement notable n'est ensuite perçu dans la distribution de cette eau ayant transité par le réservoir.

COMPOSANTE ONNENS

Bien que les puits d'Onnens soient distants de ~ 4 km du point d'entrée du réseau régional SAGENORD (i.e. la chambre de livraison ACRG, avant chloration), les TCC, LNA et ICC sont strictement identiques à ces points (fig. 4). Temporellement, une très nette cyclicité annuelle est toutefois observée avec des valeurs minimales du TCC de ~ 150 000 cellules/ml lors du printemps et des valeurs maximales de ~ 220 000 cellules/ml au début de l'automne. Les LNA et ICC suivent proportionnellement la même cyclicité; les taux LNA/TCC et ICC/TCC, élevés et caractéristiques des eaux souterraines [23], sont dès lors constants à 74% ($\pm 2\%$)

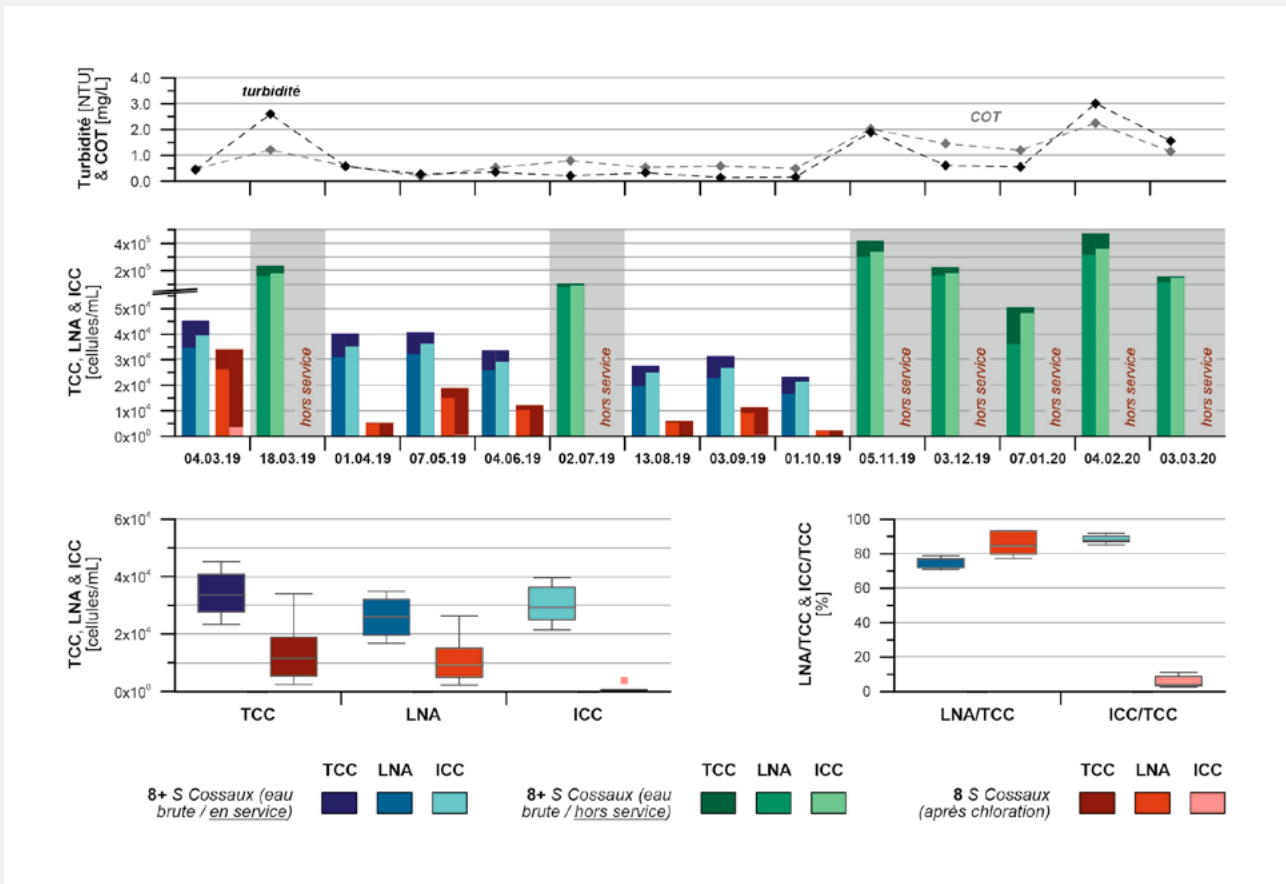


Fig. 2 (en haut) Evolution temporelle des TCC, LNA et ICC pour l'eau brute et l'eau chlorée de la source du Cossaux. Les zones grisées indiquent les campagnes de prélèvements durant lesquelles la source du Cossaux est mise en décharge. L'évolution temporelle du carbone organique total (COT), déduit de l'extinction à 254 nm, et de la turbidité de l'eau brute est également illustrée. (en bas) Diagrammes en boîte (de Tukey) des données de TCC, LNA et ICC, ainsi que des taux LNA/TCC et ICC/TCC, pour chaque point de prélèvement. Brièvement, la boîte, comprenant 50% des données, est délimitée par le 1^{er} quartile et le 3^e quartile. La médiane (2^e quartile) est indiquée par la ligne horizontale. Les moustaches comprennent toutes les valeurs inférieures au 1^{er} quartile et supérieures au 3^e quartile pour autant que la longueur des moustaches corresponde au maximum à 1,5 fois l'écart interquartile (i. e. 3^e quartile - 1^{er} quartile). Les valeurs situées au-delà, marquées par un carré, sont considérées comme étant aberrantes. S: source.

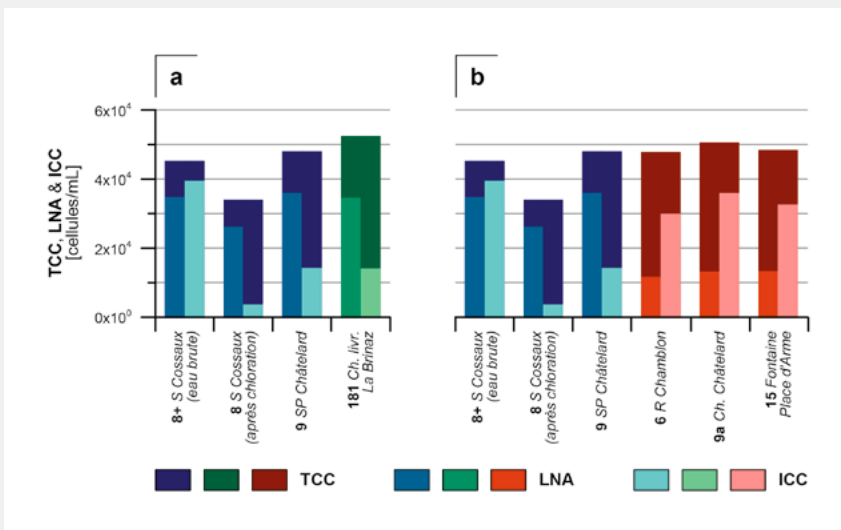


Fig. 3 Evolution spatiale des TCC, LNA et ICC lors de la campagne de prélèvements du 4 mars 2019. (a) L'eau de la source du Cossaux (éléments bleus) est directement introduit dans le réseau de distribution (éléments verts). (b) L'eau de la source du Cossaux (éléments bleus) alimente indirectement le réseau de distribution, c'est-à-dire en transitant par le réservoir de Chamblon (éléments rouges). S: source; SP: station de pompage; Ch. livr.: chambre de livraison; R: réservoir; Ch.: chambre.

et respectivement 90% (±2%). Au vu des évolutions synchrones de la température et de la conductivité électrique aux puits d'Onnens et, plus particulièrement, des températures anormalement élevées des eaux souterraines lors de l'été/automne (>16 °C), cette cyclicité est probablement en lien avec une contribution plus importante de l'eau du lac aux puits d'Onnens en période d'étiage (eau du lac: ~325µS/cm). Ces conditions en situation de basses eaux favorisent donc l'activité microbienne.

La chloration à la chambre de livraison ACRG diminue fortement les LNA et ICC, sans toutefois modifier de manière sensible le TCC et affecter la cyclicité (fig. 4). Ainsi, la signature microbiologique de la composante Onnens alimentant les réseaux régional et communal est caractérisée par un TCC évoluant entre 160 000 et 230 000 cellules/ml, un LNA moyen de 98 000 cellules/ml (± 11%) et un

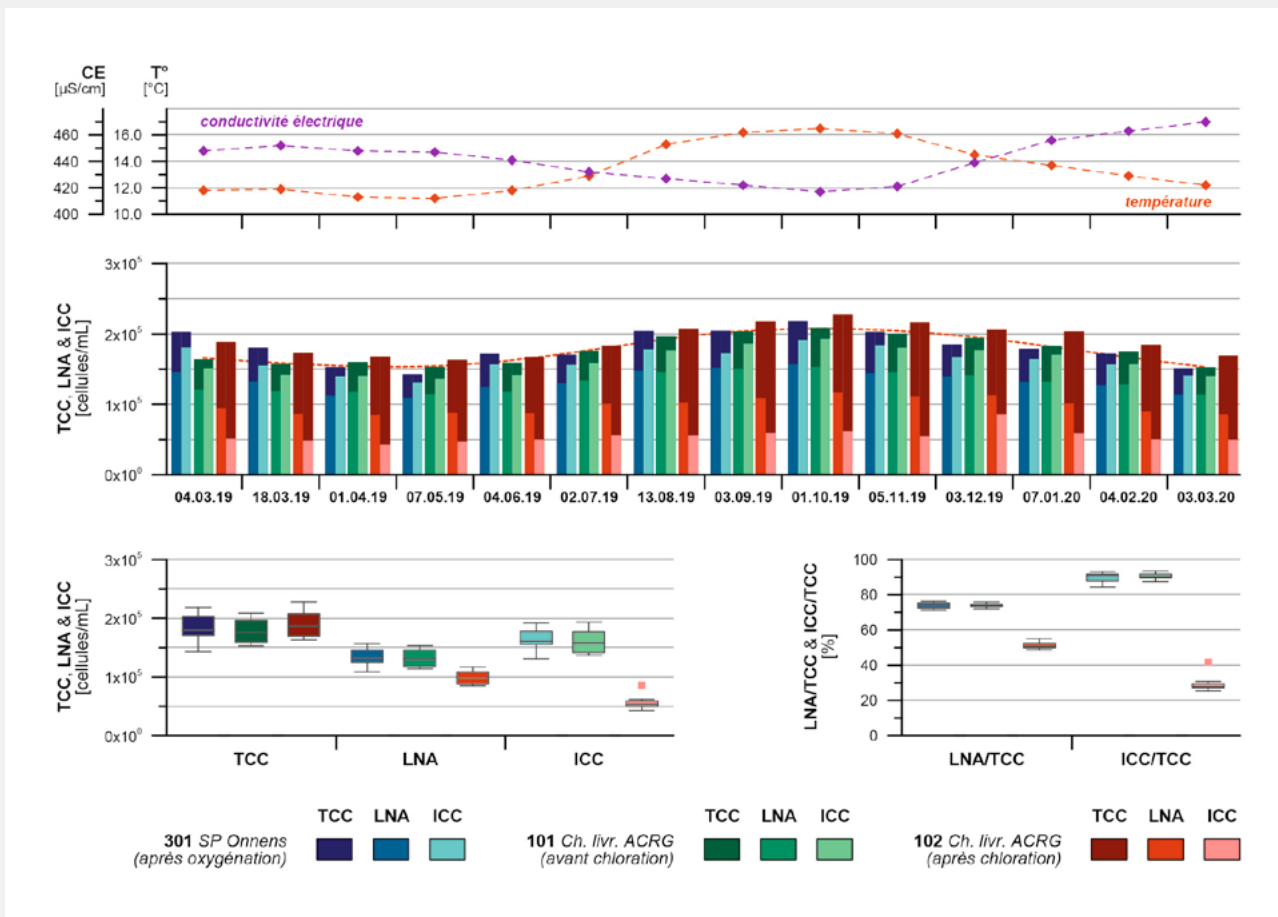


Fig. 4 (en haut) Evolution temporelle des TCC, LNA et ICC de l'eau des puits d'Onnens à la station de pompage (après oxygénation) et à la chambre de livraison ACRG (avant et après chloration). La ligne discontinue rouge souligne la cyclicité observée. L'évolution temporelle de la température (T°) et de la conductivité électrique (CE) de l'eau des puits d'Onnens est également illustrée. (en bas) Diagrammes en boîte (de Tukey) des données de TCC, LNA et ICC, ainsi que des taux LNA/TCC et ICC/TCC, pour chaque point de prélèvement (voir légende fig. 2 pour plus de détails sur les diagrammes en boîte). SP: station de pompage; Ch. livr.: chambre de livraison.

ICC moyen de 53 000 cellules/ml ($\pm 9\%$). À l'instar de la composante Cossaux, la composante Onnens évolue différemment, du point de vue de ses caractéristiques microbiologiques, selon le cheminement dans le réseau. La campagne de prélèvements du 2 juillet 2019, lorsque la source du Cossaux était hors service, illustre parfaitement ce constat (fig. 5). Alors qu'une stabilité microbiologique est observée lorsque l'eau en provenance des puits d'Onnens est directement distribuée, une modification du TCC et de l'empreinte de la population bactérienne se manifeste au niveau des réservoirs. Cette modification est marquée par un accroissement notable du TCC à $\sim 270\,000$ cellules/ml et de plus faibles augmentations des LNA et ICC (à $\sim 125\,000$ et respectivement $\sim 60\,000$ cellules/ml), résultant en des taux LNA/TCC et ICC/TCC plus faibles que ceux de la composante Onnens. Cette évolution découle d'un temps de séjour prolongé dans les réservoirs, favorisant la recrudescence

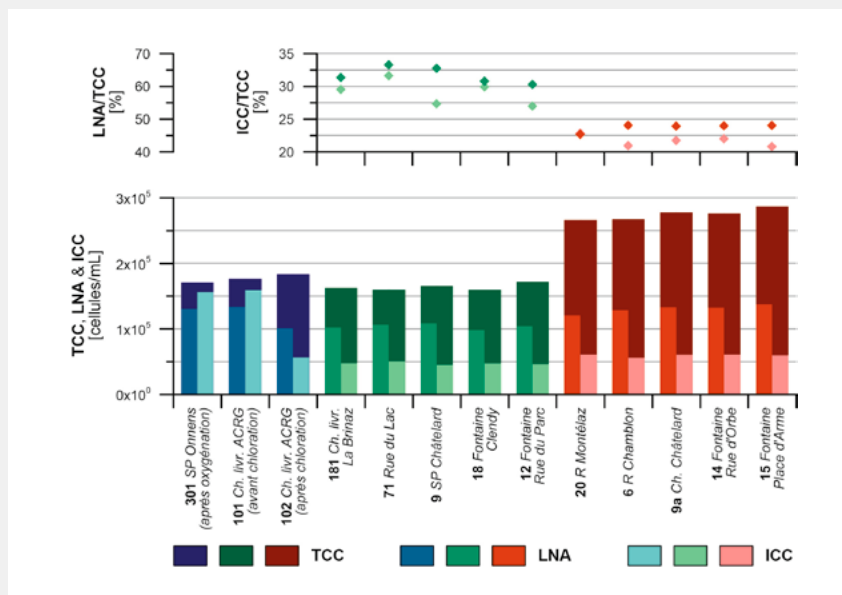


Fig. 5 Evolution spatiale des TCC, LNA et ICC, ainsi que des taux LNA/TCC et ICC/TCC, lors de la campagne de prélèvements du 2 juillet 2019. La source du Cossaux étant mise en décharge lors de cette campagne, seuls les puits d'Onnens alimentent le réseau. La composante Onnens (éléments bleus) alimente soit directement le réseau de distribution (éléments verts), soit indirectement en transitant par les réservoirs (éléments rouges). SP: station de pompage; Ch. livr.: chambre de livraison; R: réservoir; Ch.: chambre.

microbienne [25]. Enfin, contrairement à la source du Cossaux qui, quand elle est exploitée, alimente continuellement le réseau ou le réservoir de Chamblon, les puits d'Onnens livrent uniquement à la demande. Ce changement de la signature microbiologique de la composante Onnens au niveau des réservoirs ne survient donc pas en tout temps.

EXTRÉMITÉS DU RÉSEAU

Les échantillons prélevés à Gressy (régime intermédiaire) et à la Graveline (régime inférieur), lieux-dits situés aux extrémités du réseau communal yverdonnois, présentent des signatures atypiques par rapport aux autres points de prélèvements (fig. 6). En effet, bien que les TCC et LNA à Gressy soient globalement du même ordre de grandeur que ceux de la composante Onnens, l'ICC moyen est env. deux fois plus élevé (94 000 contre 53 000 cellules/ml), résultant en un taux ICC/TCC moyen de 45% ($\pm 7\%$). Ce contraste est par ailleurs accentué durant la période estivale, lorsque la température de l'eau distribuée excède 18 °C. En ce qui concerne la Graveline, le même constat peut être évoqué, aussi bien lorsque ce lieu est alimenté par les puits d'Onnens que lorsqu'il est approvisionné par la source du Cossaux, atteignant même des taux ICC/TCC de plus de 90%.

Ces résultats témoignent d'une importante recroissance bactérienne pour ces points d'observation, due au long temps de résidence dans ces secteurs du réseau et certainement amplifiée par les températures élevées durant la période estivale [25, 27]. D'ailleurs, en considérant les périodes de mise en/hors service de la source du Cossaux, les résultats obtenus

ont permis d'indiquer que le temps de renouvellement de l'eau dans le secteur de la Graveline peut dépasser 7 jours.

CARACTÉRISATION MICROBIOLOGIQUE DU RÉSEAU

Les signatures microbiologiques contrastées des principales ressources en eau alimentant la région d'Yverdon-les-Bains – Grandson, ainsi que leur évolution selon le cheminement dans les réseaux, permettent de classer l'ensemble des résultats obtenus (fig. 7). Ainsi, ~ 20% des échantillons prélevés au sein des réseaux régional et communal présentent une signature microbiologique originaire de la source du Cossaux (TCC: < 50 000 cellules/ml), dont un peu plus de la moitié indique un transit via le réservoir de Chamblon où un temps de séjour prolongé affecte l'empreinte de la population bactérienne. En effet, la signature de l'eau du Cossaux ayant transité par ce réservoir se démarque par une nette réduction du taux LNA/TCC et une forte augmentation du taux ICC/TCC.

La signature microbiologique de la composante Onnens alimentant directement les réseaux a été mise en évidence dans ~ 50% des prélèvements. Ces échantillons sont caractérisés par un TCC de 150 000 à 240 000 cellules/ml, un LNA moyen de 103 000 cellules/ml ($\pm 14\%$) et un ICC moyen de 52 000 cellules/ml ($\pm 13\%$). Seuls ~ 10% des échantillons indiquent une origine d'une eau d'Onnens ayant stagné dans les réservoirs. Cette signature se distingue de celle d'Onnens par un TCC moyen de 270 000 cellules/ml ($\pm 5\%$) et des LNA et ICC moyens supérieurs, soit 139 000 ($\pm 11\%$) et respectivement 63 000 cellules/ml ($\pm 10\%$).

Approximativement 10% des prélèvements démontrent un important mélange des composantes Cossaux et Onnens. Ces échantillons présentent des valeurs intermédiaires à ces composantes, aussi bien pour les TCC, LNA et ICC que pour les taux LNA/TCC et ICC/TCC.

Les échantillons indiquant une influence partielle de l'eau de la station de Belle-rive sont au nombre de cinq (~ 2%). La signature microbiologique de la composante Belle-rive se différencie de celles des eaux souterraines par des TCC et LNA supérieurs en tout temps à 800 000 et respectivement 500 000 cellules/ml. Ainsi, les échantillons affectés par cette composante se démarquent par un TCC relativement élevé et un LNA supérieur à 180 000 cellules/ml.

Globalement, ces résultats témoignent d'une importante stabilité biologique dans les réseaux régional de SAGENORD et communal d'Yverdon-les-Bains. En effet, ~ 70% des échantillons récoltés au sein de ces réseaux présentent des signatures microbiologiques identiques à celles des principales ressources en eau ou d'un mélange de celles-ci. La structure particulière et actuelle des réseaux implique des temps de résidence fréquemment prolongés dans les réservoirs. Ceci a pour effet de favoriser une recrudescence microbienne au niveau des réservoirs, se traduisant, dans le cas présent, essentiellement par une modification de l'empreinte des communautés bactériennes. Env. 20% des échantillons mettent en évidence une telle signature microbiologique. Enfin, comme évoqué dans la section précédente, ~ 10% des échantillons – tous prélevés aux extrémités du réseau communal yverdonnois –

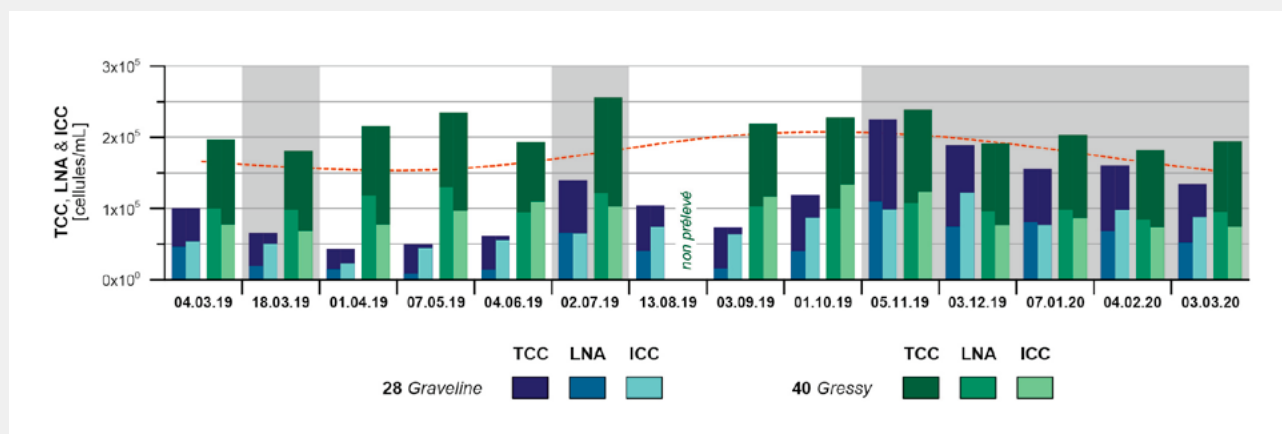


Fig. 6 Evolution temporelle des TCC, LNA et ICC aux points d'observation situés aux extrémités du réseau communal yverdonnois. La ligne discontinue rouge correspond à la cyclicité observée aux puits d'Onnens et à la chambre de livraison ACRG (voir fig. 4). Les zones grisées indiquent les campagnes de prélèvements durant lesquelles la source du Cossaux est mise en décharge.

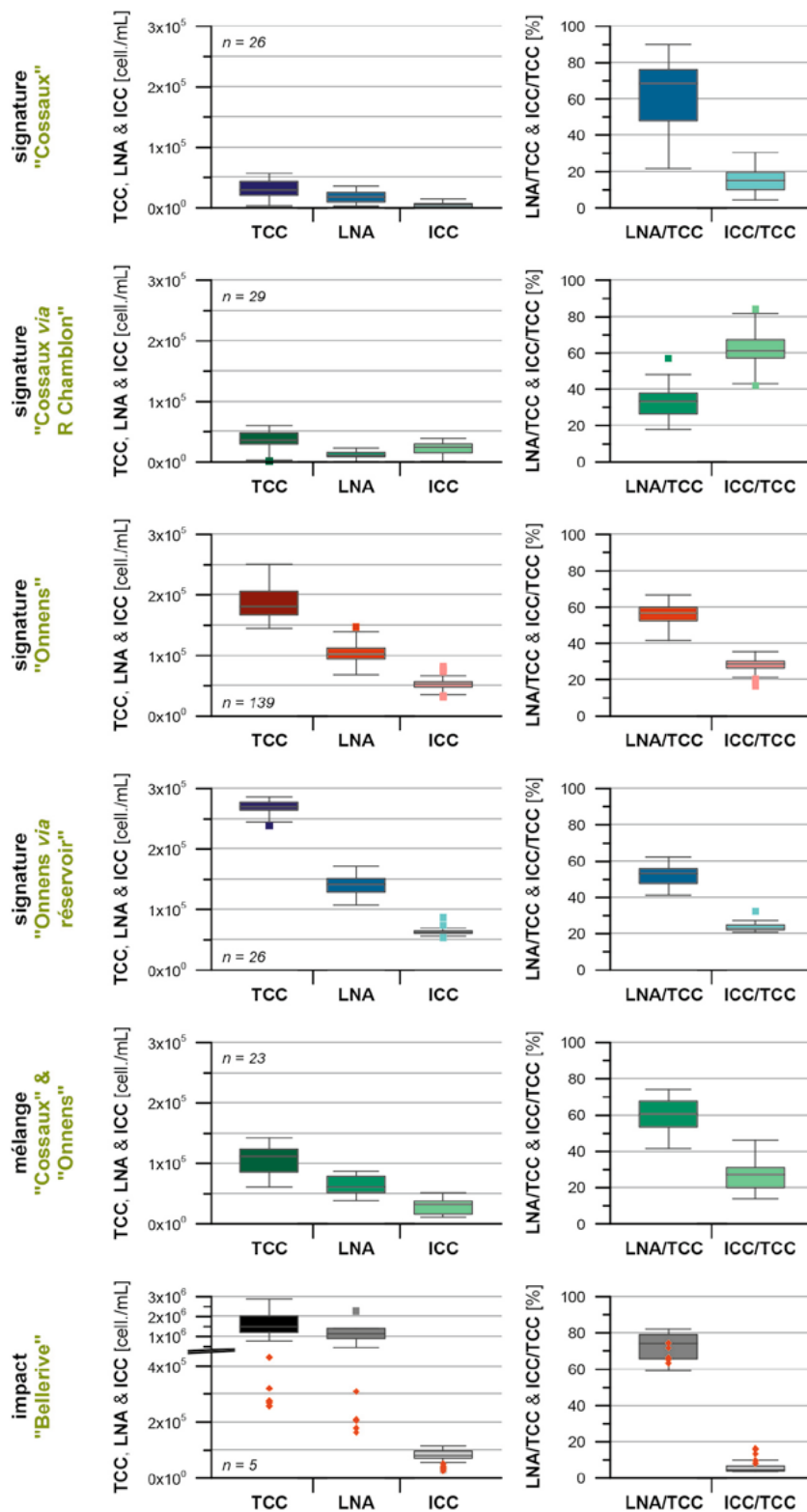


Fig. 7 Diagrammes en boîte (de Tukey) des données de TCC, LNA et ICC, ainsi que des taux LNA/TCC et ICC/TCC, de l'ensemble des échantillons prélevés dans les réseaux de distribution d'Yverdon-les-Bains - Grandson et classifiés selon leurs signatures microbiologiques (voir légende fig. 2 pour plus de détails sur les diagrammes en boîte). Pour l'impact de la station de Bellerive, les diagrammes en boîte représentent les données de l'eau filtrée et chlorée de la station (i. e. composante Bellerive). Les échantillons prélevés dans le réseau de distribution et témoignant d'une influence de la composante Bellerive sont indiqués par un losange rouge. n: nombre d'échantillons.

présentent une importante recroissance bactérienne.

CONCLUSION

La FCM est une technique moderne, rapide et précise permettant de quantifier les cellules microbiennes dans une eau et de qualifier leur empreinte au travers de quelques paramètres globaux. Outre le fait que la FCM - notamment lorsqu'elle est appliquée en continu - est présentée comme un outil de surveillance de la qualité microbiologique de l'eau [10-13], elle constitue également un outil pour la gestion à large échelle des réseaux d'alimentation en eau potable à court et long terme. Appliquée sur les réseaux d'eau principaux de la région d'Yverdon-les-Bains - Grandson, cette technique a permis d'approfondir les connaissances de leur état microbiologique global et actuel. D'une part, les communautés microbiennes des ressources en eau alimentant ces réseaux ont pu être caractérisées de manière détaillée. D'autre part, leur évolution spatio-temporelle (e.g. stabilité microbiologique, recroissance microbiologique, contamination microbiologique) dans le réseau d'adduction, de stockage et de distribution a pu être déterminée, soulignant quelques éléments «critiques» dans le fonctionnement de la structure actuelle du réseau. Une telle caractérisation de l'état microbiologique du réseau d'alimentation en eau potable constitue une étape importante dans la perspective de la planification et de la réalisation des mesures de développement du réseau. Couplée à une mise en place d'un suivi spatio-temporel à long terme, elle permettra aussi d'évaluer l'impact de ces mesures sur l'état microbiologique du réseau d'eau, aussi bien pour les projets majeurs (e.g. rénovation d'une station de traitement de l'eau, raccordements, interconnexions régionales, etc.) que pour les interventions mineures (e.g. mise en service de nouvelles conduites).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Storey, M. V. et al. (2011): *Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems*. *Water Research* 45: 741-747
- [2] WHO (2017): *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. World Health Organization, Geneva
- [3] Prest, E. I. et al. (2016): *Biological stability of drinking water: controlling factors, methods, and challenges*. *Frontiers in Microbiology* 7: 45

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement *Antoine Sordi*, *Dylan Fivat* (Yverdon Energies, exploitation), *Marc Broadhurst*, *Romuald Curdy* (RWB Hydroconcept Sàrl) et *Olga Kocob* (SAGENORD) pour leurs contributions à l'étude. Les auteurs expriment également leur gratitude envers Yverdon Energies, l'ACRG (Association des Communes de la Région de Grandson), l'AIAE La Menthue (Association Intercommunale d'amenée d'eau La Menthue) et l'AIVB (Association Intercommunale du Vallon de la Baumine) pour leur soutien logistique.

- [4] Baumgartner, A. (2013): *Bakteriologische Trinkwasserkontrolle. Ein historischer Rückblick. Aqua & Gas 11/2013: 28–34*
- [5] Hoefel, D. et al. (2003): *Enumeration of water-borne bacteria using viability assays and flow cytometry: a comparison to culture-based techniques. Journal of Microbiological Methods 55: 585–597*
- [6] Van Nevel, S. et al. (2017): *Flow cytometric bacterial cell counts challenge conventional heterotrophic plate counts for routine microbiological drinking water monitoring. Water Research 113: 191–206*
- [7] Hammes, F. et al. (2008): *Flow-cytometric total bacterial counts as a descriptive microbiological parameter for drinking water treatment processes. Water Research 42: 269–277*
- [8] Wang, Y. (2010): *Past, present and future applications of flow cytometry in aquatic microbiology. Trends in Biotechnology 28: 416–424*
- [9] Egli, T. (2012): *Mikrobiologische Trinkwasseranalyse. Entwicklungen, Stand, Ausblick. Aqua & Gas 5/2012: 14–22*
- [10] Besmer, M. D. et al. (2016): *Online-Durchflusszytometrie in der Praxis. Fenster in die Welt mikrobiologischer Dynamiken in Wasser – von der Quelle bis zum Wasserhahn. Aqua & Gas 7-8/2016: 73–77*
- [11] Besmer, M. D. et al. (2017): *Online flow cytometry reveals microbial dynamics influenced by concurrent natural and operational events in groundwater used for drinking water treatment. Scientific Reports 6: 38462*
- [12] Egli, T. et al. (2017): *Automatische Online-Überwachung. Bestimmung der Bakterienzahl im Roh- und Trinkwasser: Resultate aus der Praxis. Aqua & Gas 10/2017: 52–59*
- [13] Montandon, P.-E. et al. (2019): *Cytométrie de flux. Réseaux de La Chaux-de-Fonds et du Locle: analyse de la qualité microbiologique de l'eau potable. Aqua & Gas 6/2019: 26–34*
- [14] Wang, Y. et al. (2009): *Isolation and characterization of low nucleic acid (LNA)-content bacteria. The ISME Journal 3: 889–902*
- [15] Berney, M. et al. (2008): *Rapid, cultivation-independent assessment of microbial viability in drinking water. Water Research 42: 4010–4018*
- [16] Schardt, H. (1898): *Notice sur l'origine des sources vaclusiennes du Mont-de-Chamblon. Bulletin de la Société neuchâteloise des Sciences Naturelles 26: 211–229*
- [17] Pronk, M. et al. (2006): *Dynamics and interaction of organic carbon, turbidity and bacteria in a karst aquifer system. Hydrogeology Journal 14: 473–484*
- [18] Pronk, M. et al. (2007): *Particle-size distribution as indicator for fecal bacteria contamination of drinking water from karst springs. Environmental Science & Technology 41: 8400–8405*
- [19] Pronk, M. et al. (2009): *Microbial communities in karst groundwater and their potential use for biomonitoring. Hydrogeology Journal 17: 37–48*
- [20] Swiss Food Book (2012): *Determining the total cell count and ratios of high and low nucleic acid cells in fresh water using flow cytometry. Analysis method 333.1. Federal Office of Public Health, Bern*
- [21] Kötzsch, S. et al. (2012): *Durchflusszytometrische Analyse von Wasserproben. Bundesamt für Gesundheit, Bern*
- [22] Prest, E. I. et al. (2013): *Monitoring microbiological changes in drinking water systems using a fast and reproducible flow cytometric method. Water Research 47: 7131–7142*
- [23] Kötzsch, S.; Sinreich, M. (2014): *Zellzahlen zum Grundwasser. Bestimmung mittels Durchflusszytometrie. Aqua & Gas 3/2014: 14–21*
- [24] Ramseier, M. et al. (2011): *Kinetics of membrane damage to high (HNA) and low (LNA) nucleic acid bacterial clusters in drinking water by ozone, chlorine, chlorine dioxide, monochloramine, ferrate (VI) and permanganate. Water Research 45: 1490–1500*
- [25] Kerneis, A. et al. (1995): *The effects of water residence time on the biological quality in a distribution network. Water Research 29: 1719–1727*
- [26] van der Kooij, D. (1992): *Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth. Journal American Water Works Association 84: 57–65*
- [27] Servais, P. et al. (1992): *Studies of BDOC and bacterial dynamics in the drinking water distribution system of the Northern Parisian suburbs. Revue des Sciences de l'Eau 5: 69–89*

GYBA – Regelventile und Armaturen für höchste Ansprüche.

Seit 40 Jahren Ihr zuverlässiger Partner für die Wasserversorgung, Gebäudetechnik, Kläranlage, Industrie, Lebensmittelbranche, Medizintechnik, Tankanlage und Petrochemie.



GYBA AG · Schickmattweg 11 · 8332 Russikon · Telefon 044 954 04 77 · info@gyba.ch · www.gyba.ch



LED-Scheinwerfer HR

Wartungsfreundliche Beleuchtungslösung für Wasserreservoirs

Unser LED-Scheinwerfer HR ist dank dem Netzteil das sich ausserhalb des Wasserreservoirs montieren lässt, eine wartungsfreundliche Beleuchtungslösung für nicht alltägliche Einsatzgebiete. Ein PUR-PUR-Kabel in individueller Länge ist direkt am Scheinwerfer angebracht. Zur einfachen Montage vor Ort fertigen wir auf Wunsch eine vorkonfektionierte Dibondplatte (s. kleines Bild Mitte) mit abgesetzten Netzteilen und Abzweigdosen an. Zusätzlich ist eine Aluminiumabdeckung (s. kleines Bild unten) zum Verdecken des Netzteiles erhältlich.

Die Serie der energieeffizienten und robusten LED-Scheinwerfer HR bietet für jedes Einsatzgebiet das passende Produkt. Das starke Lumenpaket von 17 000 Lumen in Kombination mit dem passenden Abstrahlwinkel von symmetrisch 60° oder 120°, sowie dem asymmetrischen 30°/60° Abstrahlwinkel beispielsweise für Hochregalgänge, macht diese Leuchte zur universell einsetzbaren Lösung. Durch die LED-Lebensdauer von über 70 000 Stunden reduziert sich der Wartungsaufwand auf ein Minimum.



TECHNISCHE DATEN

Lichtfarbe	Tageslichtweiss
Farbtemperatur (Kelvin)	5000K (andere Farbtemperaturen auf Anfrage)
Abstrahlwinkel (Grad)	30° / 60°, 60°, 120°
Farbwiedergabeindex (Ra / CRI)	> 80
Betriebsspannung (Volt)	230 VAC
Betriebstemperaturbereich (°Celsius)	-30 bis +50°
Schutzart	IP66
Material	Aluminiumdruckguss
Frontabdeckung	stossfestes Polycarbonat
Gehäusefarbe	Aluminium
Lebensdauer (LED)	> 70000h (L70/B10)
Dimmbar	auf Anfrage
Abmessung (LxBxH)	325 x 220 x 175 mm

LED-SCHEINWERFER HR

	Symmetrisch		Lichtstrom Output (Lumen)	Systemleistung (Watt)	Asymmetrisch		Lichtstrom Output (Lumen)	Systemleistung (Watt)	Montagebügel
	120°	60°			30°/60°				
3000K	HS41.1300.00	HS41.1300.10	15 600lm	118W	HS41.1100.50		12 000lm	120W	HS90.1210.01
4000K	HS41.1300.01	HS41.1300.11	17 000lm	118W	HS41.1100.51		12 000lm	120W	
5000K	HS41.1300.02	HS41.1300.12	17 000lm	118W	HS41.1100.52		12 000lm	120W	



Ihr kompetenter und verlässlicher Partner für
Elektroinstallationen und LED-Technik

www.hsag.ch

