SYNTHÈSE DES ÉTUDES SUR LES EFFETS DU TRAITEMENT MAGNÉTIQUE DE L'EAU

---

1. Étude sur l'Impact du Traitement Magnétique sur les Communautés Microbiologiques de l'Eau Potable

> Nom de l'étude :

"Étude de l'effet d'un traitement magnétique durable sur les communautés microbiologiques de l'eau potable"

> Contexte et Objectifs

Depuis **1945**, le traitement magnétique est utilisé pour améliorer la qualité de l'eau, mais son impact sur les micro-organismes reste peu documenté. Cette étude vise à évaluer l'effet des champs magnétiques faibles (**<10 G**) sur les communautés microbiennes de l'eau potable.

> Méthodologie

- **Cytométrie en flux** : Analyse précise des populations microbiennes après traitement magnétique.

> Résultats Principaux

- **Impact différencié sur les types cellulaires :**
  - **Cellules LNA (faible teneur en acides nucléiques)** :
    - **Définition** : Ces cellules possèdent moins d'acides nucléiques (ADN et ARN) et sont souvent associées à des conditions environnementales favorables.
    - **Impact** : Croissance favorisée dans des environnements riches en nutriments, améliorant leur prolifération et leur capacité métabolique.
  - **Cellules HNA (forte teneur en acides nucléiques)** :

        - **Définition :** Ces cellules contiennent une quantité plus élevée d'ADN et d'ARN, ce qui indique souvent une activité métabolique intense.
        - **Impact** : Inhibition de la croissance, notamment pour des pathogènes tels que *Pseudomonas aeruginosa*.
- **Biostabilité de l'eau** :
    - **Augmentation de la croissance des cellules LNA :**
        - **Définition de la biostabilité** : Cela fait référence à la capacité de l'eau à maintenir une population microbienne stable sans prolifération excessive d'organismes indésirables, essentielle pour la qualité de l'eau potable.
        - **Lien avec les cellules LNA :** L'augmentation de la croissance des cellules LNA est un indicateur positif de biostabilité, indiquant un équilibre microbien sain dans l'eau. Cela signifie que les micro-organismes bénéfiques dominent, réduisant le risque de croissance de bactéries pathogènes.
    - **Effet du traitement magnétique sur les communautés microbiennes :**
        - **Gestion des communautés microbiennes** : Le traitement magnétique a montré un effet bénéfique en favorisant les cellules LNA, ce qui contribue à maintenir une biodiversité microbienne équilibrée.
        - **Conditions riches en nutriments** : Dans ces conditions, le traitement magnétique stimule spécifiquement la croissance des cellules LNA, facilitant ainsi le contrôle des populations de micro-organismes indésirables et promouvant des processus de dégradation naturelle des contaminants.
- **Amélioration de la capacité de charge des cellules microbiennes** :
    - **Amélioration de la capacité de charge des cellules LNA :**
        - **Définition** : La capacité de charge désigne le potentiel des cellules à absorber et traiter des nutriments et contaminants. Une augmentation indique une amélioration de leur efficacité métabolique.
        - **Impact du traitement magnétique :** Après traitement, la capacité de charge des cellules LNA a augmenté d'environ 22 %, ce qui signifie qu'elles sont plus efficaces dans l'utilisation des ressources, favorisant leur domination dans l'environnement aquatique.
    - **Capacité de charge des cellules HNA :**
        - **Comportement dans des conditions statiques** : La capacité de charge des cellules HNA a montré une augmentation d'environ 50 % dans des conditions statiques, indiquant qu'elles peuvent optimiser

leur capacité d'absorption lorsqu'elles ne sont pas soumises à des mouvements constants.

- **Absence d'effet significatif en conditions d'agitation** : En revanche, aucune augmentation significative n'a été observée en conditions d'agitation, suggérant que le mouvement constant perturbe leur fonctionnement.

> Implications Pratiques

- **Méthode durable et non chimique pour améliorer la qualité de l'eau :**
  - **Traitement magnétique** : Cette méthode innovante améliore la qualité de l'eau potable sans recourir à des produits chimiques, ce qui représente un avantage majeur pour la protection de l'environnement.
  - **Durabilité** : Étant donné qu'elle ne génère pas de sous-produits chimiques nocifs, le traitement magnétique pourrait contribuer à une gestion plus responsable et écologique des ressources en eau.
- **Potentiel de remplacement ou de complément aux méthodes de traitement actuelles :**
  - **Gestion des pathogènes** : En favorisant la croissance des cellules LNA et en inhibant les cellules HNA, le traitement magnétique peut réduire la prolifération de microorganismes pathogènes, diminuant ainsi le besoin d'interventions chimiques pour désinfecter l'eau.
  - **Contrôle des biofilms** : Les biofilms, qui posent des problèmes dans les systèmes d'eau potable, pourraient également être gérés grâce au traitement magnétique, contribuant à une gestion plus efficace des populations microbiennes.

> Conclusion

Le **traitement magnétique de l'eau** apparaît comme une solution **prometteuse** pour améliorer la **qualité** et la **biostabilité** de l'eau potable. Les résultats de cette étude soulignent son potentiel significatif pour **transformer** les **pratiques** de **gestion de l'eau**, contribuant ainsi à renforcer la **sécurité** et la **salubrité** des ressources en eau, tout en soutenant une **approche écologique** et **durable**. Cette méthode pourrait jouer un rôle clé dans la gestion des populations microbiennes, offrant une **alternative naturelle** et **efficace** aux méthodes de traitement conventionnelles.

> Références

Les auteurs de l'étude incluent Xiaoxia Liu, Bernhard Pollner, Astrid H Paulitsh-Fuchs, Elmar C. Fuchs, Nigel P. Dyer, Willibald Loiskand, Cosmelia Lass-Flörl.

2. Étude sur les Gradients Magnétiques et la Formation de DOLLOPs dans l'Eau

> Nom de l'étude :

"De forts gradients dans des champs magnétiques faibles induisent la formation de DOLLOP dans l'eau du robinet"

> Contexte et Théorie

En **2012**, Coey a introduit une théorie innovante sur le traitement magnétique de l'eau, suggérant que l'impact de l'aimantation dépend non pas de l'intensité absolue du champ magnétique, mais plutôt des gradients de champ magnétique présents. Ces gradients, définis comme des variations d'intensité du champ magnétique dans l'espace, sont cruciaux pour influencer la structure de l'eau à l'échelle moléculaire. Cette étude vise à tester cette théorie en examinant les effets de champs magnétiques faibles, mais fortement inhomogènes, sur les propriétés de l'eau du robinet.

> Méthodologie

- Les chercheurs ont réalisé une série d'expériences avec des échantillons d'eau du robinet en utilisant des aimants produisant des champs d'environ 10 Gauss. Deux configurations d'aimants ont été testées, présentant des inhomogénéités magnétiques de 770 Gauss par mètre et 740 Gauss par mètre. Les méthodes suivantes ont été employées pour évaluer les effets du traitement magnétique :
    - **Spectroscopie d'impédance électrique (EIS)** : Cette technique a été utilisée pour mesurer les propriétés électriques de l'eau, notamment la résistance et la capacité, qui sont sensibles aux changements dans la structure et la dynamique de l'eau.
    - **Diffusion laser** : Analyse de la taille des particules et des agrégats formés dans l'eau, fournissant des données sur la formation de DOLLOPs.

> Résultats

- **Formation de DOLLOPs (Dynamic Ordered Liquid-Like Oxyanion Polymer)** :
    - Les résultats ont montré une formation accrue de DOLLOPs dans l'eau du robinet exposée aux champs magnétiques. Un DOLLOP (Dynamic Ordered Liquid-Like Oxyanion Polymer) est un agrégat de taille nanométrique constitué de polymères d'oxyanions qui se forment sous l'influence de forts

gradients de champ magnétique. Ces structures jouent un rôle crucial dans le mécanisme de nucléation non classique, car elles facilitent la transition entre les ions dissous et la formation de cristaux.

    - **Mécanisme de Formation** : Les gradients de champ magnétique provoquent des interactions favorables entre les ions présents dans l'eau, menant à l'assemblage organisé des oxyanions. Ces interactions augmentent la probabilité de formation de clusters d'oxyanions, qui servent de noyaux pour la nucléation.

- **Impact sur la cristallisation du carbonate de calcium** :
    - Les DOLLOPs formés ont un impact significatif sur la cristallisation des minéraux, en particulier le carbonate de calcium :
    - **Cristallisation du Carbonate de Calcium** : Les études ont révélé que la présence de DOLLOPs modifie la morphologie et la taille des cristaux de carbonate de calcium. Cela se traduit par une préférence accrue pour la formation d'aragonite plutôt que de calcite. Cette distinction est importante, car l'aragonite est souvent plus stable et désirable dans des applications spécifiques telles que le traitement de l'eau et l'aquariophilie, où la qualité de l'eau est essentielle.
- **Effets sur la Dynamique de Croissance :**
    - Les gradients de champ magnétique influencent également la dynamique de croissance des DOLLOPs :
    - **Dynamique de Croissance** : Les gradients agissent non seulement sur la formation des DOLLOPs, mais également sur leur dynamique de croissance, ce qui signifie qu'ils peuvent évoluer au fil du temps. Cette dynamique pourrait expliquer le phénomène de "mémoire magnétique" de l'eau, où l'eau conserve des informations sur les champs magnétiques auxquels elle a été exposée.
- **Modification des propriétés électriques** :
    - Les effets des gradients de champ magnétique sur l'eau se manifestent aussi par des changements dans ses propriétés électriques :
    - **Mesures avec EIS** : Les variations mesurées dans la résistance et la capacité de l'eau indiquent des modifications dans la structure de l'eau, en lien avec les interactions entre les DOLLOPs et les ions dissous. Ces changements peuvent révéler des informations sur l'organisation moléculaire de l'eau et son comportement en présence de champs magnétiques.

> Implications Pratiques

- **Traitement de l'eau** : La compréhension de la manière dont les gradients de champ magnétique influencent la cristallisation peut être exploitée pour améliorer les techniques de traitement de l'eau, notamment dans la réduction des dépôts minéraux et le contrôle de l'entartrage.
- **Industrie des matériaux** : Utilisation des propriétés des DOLLOPs pour développer de nouveaux matériaux.
- **Gestion durable des ressources en eau** : Une meilleure connaissance des effets du magnétisme sur l'eau peut contribuer à des stratégies de gestion durable des ressources en eau.

> Conclusion

Ce résumé met en lumière les résultats et les implications de l'étude sur les gradients de champ magnétique et leur impact sur la formation de DOLLOPs dans l'eau, tout en offrant un aperçu des méthodologies et des découvertes clés. Les résultats de cette étude fournissent des preuves solides en faveur de la théorie de Coey, démontrant que même des champs magnétiques faibles, mais présentant de forts gradients, peuvent induire des changements significatifs dans la structure et les propriétés de l'eau.

> Références

Les auteurs de l'étude incluent Martina Sammer, Cees Kamp, Astrid H. Paulitsch-Fuchs, Adam D. Wexler, Cees J. N. Buisman, et Elmar C. Fuchs, publiés dans une revue académique le 3 mars 2016.

Résumé Comparatif des Études

Aspect	**Étude 1 : Communautés Microbiennes**	**Étude 2 : Gradients Magnétiques et DOLLOPs**
Objectif	Évaluer l'impact des champs magnétiques sur les micro-organismes	Explorer l'effet des gradients magnétiques sur la structure de l'eau
Méthodologie	Cytométrie en flux	EIS, diffusion laser
Résultats clés	> Favorise les cellules LNA > Inhibe les pathogènes	> Formation de DOLLOPs

		> Cristallisation préférentielle en aragonite
Applications	Biostabilité accrue, gestion durable de l'eau	Réduction des dépôts, gestion améliorée des ressources

Conclusion Générale

Les deux études démontrent le potentiel du traitement magnétique, non seulement pour améliorer la qualité microbiologique de l'eau, mais aussi pour influencer sa structure moléculaire et réduire l'entartrage. Ces découvertes ouvrent la voie à des approches innovantes et écologiques dans le traitement et la gestion des ressources en eau.

l'eau

MDPI

Article

De forts gradients dans des champs magnétiques faibles induisent la formation de DOLLOP dans l'eau du robinet

Martina Sammer [1], Cees Kamp [2], Astrid H. Paulitsch-Fuchs [1], Adam D. Wexler [1], Cees J. N. Buisman [1] et Elmar C. Fuchs [1,*]

[1] Wetsus, Centre européen d'excellence pour les technologies durables de l'eau, Oostergoweg 9, 8911 MA Leeuwarden, Pays-Bas ; martina.sammer@wetsus.nl (M.S.) ; astrid.paulitsch-fuchs@wetsus.nl (A.H.P.-F.) ; adam.wexler@wetsus.nl (A.D.W.) ; cees.buisman@wetsus.nl (C.J.N.B.)

[2] Kamp Consult, Deventerweg 81, 7203 AD Zutphen, Pays-Bas ; ceeskamp@xs4all.nl

* Correspondance : elmar.fuchs@wetsus.nl ; Tél : +31-58-284-3162

Éditeur académique : Wilhelm Püttmann

Reçu : 21 janvier 2016 ; Accepté : 23 février 2016 ; Publié : 3 mars 2016

Résumé : En 2012, Coey a proposé une théorie sur le mécanisme de traitement magnétique de l'eau basée sur le gradient du champ appliqué plutôt que sur sa force absolue. Nous avons testé cette théorie en mesurant l'effet d'aimants à très faible champ (d' 10 G) contenant de fortes inhomogénéités magnétiques (ΔB = 770 G¨m'1 (WCM 62081992) et 740 G¨m'1 (WCM 62083545)) sur des échantillons d'eau du robinet en utilisant la spectroscopie d'impédance électrique (EIS) et la diffusion laser. Nos résultats montrent une formation accrue d'amas de prénucléation de la taille d'un nm (polymères d'oxyanions liquides ordonnés dynamiquement ou "DOLLOPs") en raison de l'exposition au champ magnétique et sont donc cohérents avec la théorie de Coey qui est donc également applicable à des champs magnétiques très faibles à condition qu'ils contiennent de forts gradients.

Mots clés : traitement magnétique de l'eau ; EIS ; DOLLOPs

---

1. Introduction

1.1. Traitement magnétique de l'eau

Pendant longtemps, les affirmations selon lesquelles l'influence d'un champ magnétique sur l'eau dure influence la structure et la morphologie de la cristallisation du carbonate de calcium ont été accueillies avec scepticisme par la communauté scientifique. Cela était principalement dû à l'absence de tout mécanisme plausible pouvant expliquer l'effet durable des champs magnétiques, même après la fin de l'exposition elle-même. Au cours des 40 dernières années, de nombreuses recherches ont été menées sur les effets des traitements magnétiques ou électromagnétiques sur l'eau, et plus d'une centaine d'articles et de rapports sont disponibles dans la littérature [1-20]. La plupart de ces articles traitent de la précipitation du carbonate de calcium, quelques-uns font état d'effets biologiques. Des recherches ont montré de manière convaincante [4,13,15,16] que le traitement magnétique peut influencer la taille et la morphologie des cristaux de carbonate de calcium, faisant passer l'habitus préféré de la calcite à l'aragonite. Une explication probable a été proposée par Coey [21] sur la base des travaux de Gebauer *et al* [22] et Pouget *et al* [23]. Ils décrivent un mécanisme de nucléation non classique par l'existence d'amas de prénucléation stables dans des solutions de carbonate de calcium sous-saturées. Ces amas sont examinés par Raiteri et Gale [24], Gebauer et Cölfen [25], et ont été vérifiés expérimentalement par des expériences d'ultracentrifugation, de cryo-TEM et de spectrométrie de masse [23-26]. On a constaté qu'ils restent hydratés [24]. Ils peuvent représenter jusqu'à 50 % du calcium présent en solution [23]. Bien que leur structure n'ait pas encore été déterminée, les simulations de dynamique moléculaire [27] les décrivent comme des polymères ioniques flexibles désordonnés et hydratés ou des DOLLOP

(dynamically ordered liquid like oxyanion polymers). Ils sont

peuvent s'agréger en particules plus grosses (jusqu'à environ 100 nm) et former une émulsion liquide [26]. Coey [21] décrit comment un gradient de champ magnétique peut agir sur les DOLLOPs, ce qui pourrait expliquer la "mémoire magnétique" de l'eau. Il montre que contrairement à la contrainte mécanique pure, qui est incapable d'induire directement des changements dans la structure des DOLLOPs, un gradient de champ magnétique peut agir sur la surface des DOLLOPs et affecter sa dynamique de croissance. On considère que les ions bicarbonate, l'espèce carbonate prédominante en solution à pH neutre, se trouvent côte à côte d'un côté d'un amas de nucléation polaire et forment la surface chargée négativement. L'autre face, positive, est occupée par des ions Ca^{2+}. Pour que l'amas se développe sur le côté chargé négativement, les protons des ions HCO_3^- doivent être remplacés par des ions Ca^{2+}. C'est sur ces protons que le champ magnétique agit : Un champ magnétique inhomogène, c'est-à-dire des gradients dans le champ magnétique, peut forcer l'échange d'états singlet et triplet des dimères de spin de protons présents dans la couche HCO_3^-, facilitant ainsi leur remplacement par des ions Ca^{2+}. Cette facilitation est obtenue par déphasage du spin d'un dimère de protons induit par le gradient de champ magnétique, car les spins de protons précèdent à des vitesses différentes à des intensités de champ différentes. Plus précisément, les spins de protons précessent dans un champ donné B à la fréquence de Larmor f_p B (f_p = 42,6 $MHzT^{-1}$). Pour déphaser les spins d'un dimère de protons, ils doivent précesser à des fréquences différentes de sorte que la différence de phase accumulée
$\Delta\varphi$ remplit la condition

$$\Delta\varphi \geq \pi \tag{1}$$

Sur la base de cette inégalité, Coey [21] a dérivé une condition pour un effet de champ magnétique appréciable, à l'aide de laquelle l'efficacité des champs magnétiques dans ce travail sera analysée,

$$C = 2\frac{L}{v} f_p\, a\, \nabla B \geq 1 \tag{2}$$

où C est le critère de Coey, L la longueur du dispositif magnétique, v la vitesse des DOLLOPs, f_P la fréquence de Larmor d'un proton, a la séparation des spins (0,25 nm) et ∇B le gradient du champ magnétique. Si $C \geq 1$, le dispositif magnétique peut influencer efficacement la cristallisation du carbonate de calcium.

1.2. Aimants à noyau d'eau (WCM)

Avant même qu'une théorie raisonnable sur leur mécanisme n'ait été élaborée, de nombreuses entreprises ont commercialisé divers types de dispositifs magnétiques de traitement de l'eau (28,29). Les WCM, un type de dispositifs disponibles dans le commerce, sont utilisés pour traiter différents types d'eau, comme par exemple l'eau potable du robinet ou l'eau des circuits de refroidissement [30]. Un WCM se compose de deux cylindres parallèles en acier inoxydable, soudés l'un à l'autre. Chaque cylindre est faiblement magnétisé et rempli d'eau. Le WCM est placé dans l'eau à traiter. Il existe des preuves expérimentales [2] que les dispositifs de traitement peuvent laisser échapper de petites quantités de fer de leur boîtier, ce qui modifie les propriétés chimiques et physiques du fluide à traiter et peut donc influencer l'entartrage d'une manière purement chimique [31]. Afin d'éviter de telles fuites, nous avons choisi d'exposer nos échantillons d'eau au WCM sans contact avec le dispositif lui-même. Ainsi, tout effet mesuré proviendrait uniquement de l'exposition au champ magnétique. Le champ absolu moyen des WCM utilisés dans cette étude est très faible, < 10 G à une distance de 5 mm de la surface, soit seulement un ordre de grandeur au-dessus du champ terrestre et 2 à 3 ordres de grandeur plus bas que celui d'un aimant en ferrite dur [32]. Cependant, son champ contient une structure fine remarquable de forts gradients (~770 $G \cdot m^{-1}$ (WCM 62081992) et 740 $G \cdot m^{-1}$ (WCM 62083545), voir la section des résultats). Des gradients aussi forts sont, comme décrit ci-dessus, une condition préalable à la théorie de Coey. Par conséquent, les WCM constituent une excellente base pour tester cette théorie.

1.3. Spectroscopie d'impédance électrique (EIS)

L'EIS permet de représenter et de simuler un liquide comme un simple circuit électrique. Une solution aqueuse se comporte comme une résistance et un condensateur en parallèle : À des

fréquences inférieures à $^{105\text{-}106}$ Hz, les ions peuvent se déplacer avec le champ (comportement résistif), et à des fréquences supérieures, les propriétés diélectriques de la solution commencent à se manifester (comportement capacitif). Aux basses fréquences ($^{<104}$ Hz), les ions se déplacent rapidement.

suffisamment pour former des couches au niveau des électrodes, ce qui provoque ce que l'on appelle la polarisation des électrodes (également appelée polarisation de Maxwell-Wagner). Les objets à méso-échelle comme les DOLLOPs sont beaucoup plus lourds que les ions. Ils ne peuvent pas suivre le champ aussi rapidement et ne présentent pas le même comportement de polarisation. La polarisation des électrodes n'a pas d'équivalent direct dans le circuit électrique, mais peut être simulée en combinant certains éléments [33] : Un élément à phase constante (*CPE*) [34] avec une impédance de Warburg (*W*) en parallèle pour tenir compte de la migration des ions ; les impédances *R* et *W* représentent les propriétés globales de la solution électrolytique et les caractéristiques de diffusion de la sonde dans la solution [35]. La formation de DOLLOPs devrait donc être détectable par EIS d'une triple manière : l'augmentation de R_{aq} due au nombre plus faible d'ions disponibles, la diminution de la polarisation de l'électrode pour la même raison, et l'incapacité des DOLLOPs (beaucoup plus lourds) à suivre le champ électrique et à former des couches, ce qui devrait apparaître comme un changement des paramètres *CPE* et *W*, respectivement. La figure 1 illustre le spectre mesuré d'un échantillon d'eau du robinet (points) et le spectre calculé (ligne). La contribution de la polarisation de l'électrode est montrée en simulant des courbes à l'aide du circuit équivalent (figure 1a) sans impédance de Warburg ni *CPE*. Ces simulations sont représentées par des courbes en pointillés dans la figure 1a,b. Les contributions de la polarisation des électrodes sont mises en évidence par des zones bleues.

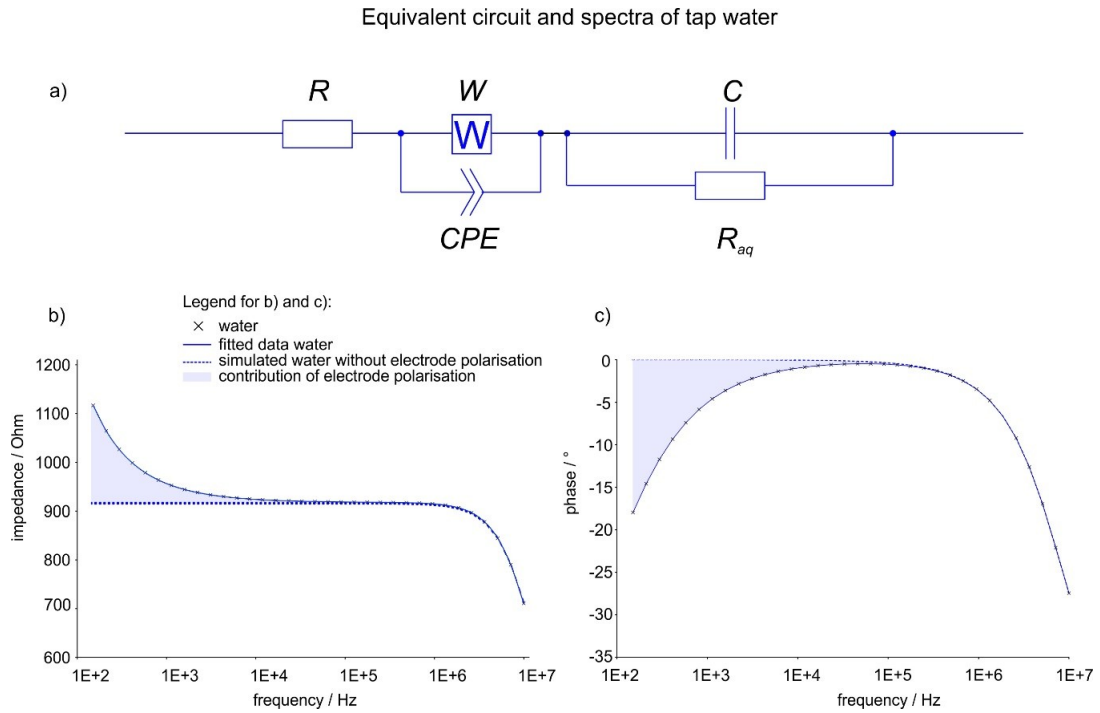


Figure 1. (**a**) Circuit équivalent ; (**b**) impédance exemplaire *Z* ; (**c**) spectres de phase (ϕ, sous-figure c) de l'eau du robinet, y compris les résultats de l'ajustement. *R*, *W* et *CPE* sont la résistance, l'impédance de Warburg et l'élément à phase constante simulant la polarisation de l'électrode et la migration des ions ; *C* et R_{aq} la capacité et la résistance de l'eau du robinet.

1.4. Motivation de la recherche présentée

1.4.1. Le WCM en tant que dispositif de traitement

Jusqu'à récemment, l'utilisation de dispositifs magnétiques pour le traitement de l'eau ou la prévention du tartre était considérée comme de la charlatanerie par la majorité de la communauté scientifique. L'argument principal était que les modèles explicatifs, basés sur l'intensité absolue du champ des dispositifs par l'intermédiaire de la force de Lorentz, ne parvenaient pas à expliquer entièrement ou du moins en partie les effets observés.

$$F = qpE + v \times Bq \quad (3)$$

Le modèle de Coey [21], cependant, qui est basé sur l'existence des DOLLOPs et de leurs agglomérations [27], implique que ce n'est pas l'intensité absolue du champ mais les gradients de champ magnétique qui ont un impact sur la dynamique de croissance des cristaux. Selon cette théorie, des aimants très faibles peuvent influencer la cristallisation tant que des gradients importants sont présents. Les WCM étudiés dans le cadre de cette recherche répondent à ce critère : Leur champ est si faible (<10 G) que toute action appréciable de la force de Lorentz peut être exclue, mais il contient une structure fine de gradients locaux multiples et forts, préambule à la théorie de Coey.

1.4.2. Eau du robinet comme échantillon

L'efficacité des dispositifs de traitement magnétique sur des solutions d'eau préparées artificiellement (solutions définies de carbonate de calcium) a été démontrée et discutée à plusieurs reprises ; les recherches les plus récentes comprennent (sans s'y limiter) les travaux de Higashintani, Coey, Kobe et Knez [4,13,15,16]. Leurs recherches constituent la base de ce travail orienté vers la pratique : Étant donné que dans la plupart des applications industrielles, l'eau traitée est l'eau du robinet [28-30], nous avons délibérément choisi l'eau du robinet comme échantillon. La teneur en ions de nos échantillons a été analysée dans cinq échantillons prélevés au hasard pendant la période de cette étude. Les résultats de cette étude montrent que la teneur en ions varie. Cependant, même avec cette variabilité, il est possible de tirer des conclusions générales sur l'efficacité du traitement, et le comportement de cristallisation semble être influencé selon le modèle de Coey.

2. Matériels et méthodes

2.1. Procédure de traitement

200 ml d'eau du robinet ont été versés dans des béchers de 250 ml. Pour garantir un échantillonnage correct, les béchers ont été remplis après que l'eau du robinet a coulé pendant 1 minute. Deux béchers ont été placés à côté des dispositifs de traitement (WCM, type DZKL, IPF GmbH, Autriche ; voir figure 2a,b, deux ont été placés dans la même pièce dans les mêmes conditions ambiantes pendant au moins 24 h et au plus 7 jours à deux endroits distants de plusieurs mètres afin d'éviter un traitement par inadvertance de l'échantillon de référence.

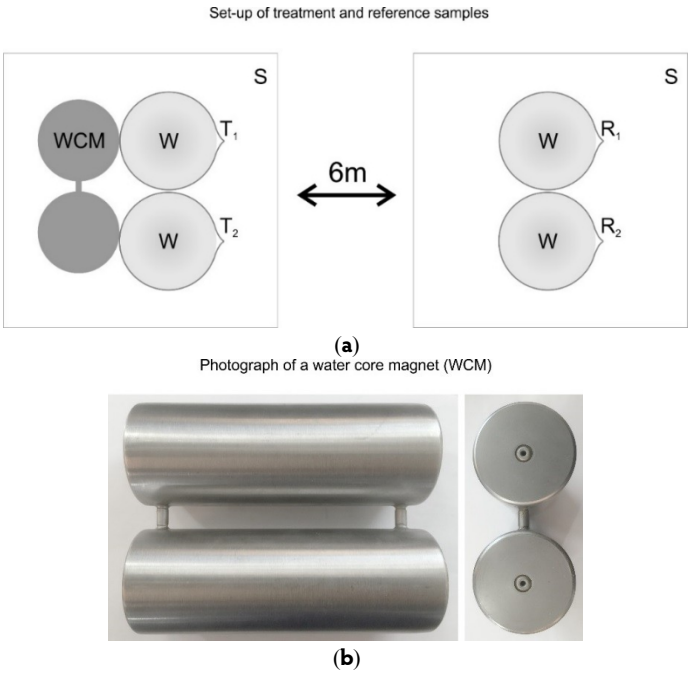


Figure 2. **(a)** Croquis montrant l'installation pour le traitement et la référence ; S : base en plastique (table), WCM : aimant à noyau d'eau, W : verre de montre recouvrant les béchers, T : béchers traités, R : béchers de référence.

(b) Dispositif de traitement magnétique du noyau d'eau de type DZKL (rayon du cylindre 2,25 cm, hauteur 15 cm, distance entre les cylindres 1 cm).

Aux deux endroits, le champ magnétique local (sans la présence du dispositif de traitement) était inférieur à 0,5 G. Les béchers et les aimants du noyau d'eau ont été placés sur des surfaces en bois recouvertes de plastique (non conductrices et non magnétiques). Les positions de traitement et de référence ont été interchangées au hasard. L'humidité et la température étaient les mêmes pour la position de référence et la position de traitement (conditions ambiantes), puisqu'elles se trouvaient dans le même laboratoire et à la même altitude. Deux dispositifs de traitement différents du même type (aimant à noyau d'eau à double cylindre) ont été utilisés et échangés au hasard pour différentes expériences. Les béchers ont été recouverts d'un verre de montre pour éviter la contamination par la poussière et les particules et pour permettre un équilibre continu entre l'échantillon et l'atmosphère. Après le traitement, au moins trois échantillons ont été prélevés dans chaque bécher (deux béchers traités et deux béchers non traités au moins), ce qui a donné un total d'au moins 12 mesures individuelles par expérience. Toutes les mesures ont été effectuées à température ambiante. Afin de vérifier la possibilité d'une dérive de l'instrument de l'analyseur d'impédance, l'ordre séquentiel des mesures (traitées et non traitées) a été modifié dans certaines expériences. La séquence des mesures n'a pas eu d'influence sur les résultats. Comme test supplémentaire pour la reproductibilité des mesures et l'influence de l'emplacement de l'échantillon, des échantillons d'eau d'essai ont été mesurés à plusieurs reprises sur plusieurs jours. Ces échantillons ont été placés aux mêmes endroits respectifs du laboratoire où les échantillons de traitement et de référence ont été placés, mais sans le WCM à proximité de l'échantillon traité. Dans ces cas, aucune différence significative n'a été constatée entre les échantillons des deux emplacements.

2.2. Analyse de l'eau du robinet

Pour l'analyse de l'eau du robinet, les instruments analytiques suivants ont été utilisés : Un ICP Perkin Elmer de type Optima 5300 DV avec un passeur d'échantillons ESI de type SCA DX et un refroidisseur d'eau Polyscience de type 6106P (PolyScience 6600 W. Touhy Avenue, Niles, Illinois 60714-4516 USA). Le logiciel était Perkin Elmer WinLab32 version 4.0.2.0380 ; la solution standard interne était de 100 mg/L $^{Y+3}$ et 2% d'acide nitrique comme solution de rinçage. La limite de détection était de 25-750 $\mu g^{\cdot}L^{'1}$ avec une limite supérieure de 10 000 $\mu g^{\cdot}L^{'1}$. Le carbone organique total (COT) a été mesuré avec un Shimadzu TOC-L utilisant un passeur d'échantillons Shimadzu ASI-L et le logiciel standard de cet équipement. Les réactifs utilisés étaient de l'acide chlorhydrique 2 M et de l'acide phosphorique 25 %. La limite de détection était de 1,00 $mg^{\cdot}L^{'1}$. Pour l'analyse de l'anion IC, un chromatographe ionique Metrohm Compact IC Flex 930 avec une colonne Metrohm Metrosep A Supp 5150/4,0 mm a été utilisé. La pré-colonne était une Metrohm Metrosep A Supp 4/5 Guard. Le détecteur de conductivité, le CO_2 et le suppresseur chimique sont intégrés dans le chromatographe ionique. Un échantillonneur automatique Spark Optimas a été utilisé ; l'unité de traitement était un Metrohm, type MagIC Net. Comme réactifs, on a utilisé une phase mobile composée d'une solution de carbonate de sodium 3,2 mM et de bicarbonate de sodium 1 mM + 1% d'acétone ; le liquide de suppression était de l'acide phosphorique dilué ; les réglages appliqués étaient un flux de phase mobile de
0,7 $mL^{\cdot}min^{'1}$; solutions de suppression de flux 0,4 $mL^{\cdot}min^{'1}$; et durée d'exécution 20 min ; le volume d'injection était de 20 µL. La limite de détection était de 0,05-0,10 $mg^{\cdot}L^{'1}$ avec une limite supérieure de 80 $mg^{\cdot}L^{'1}$ pour $Cl^{'}$ et 20 $mg^{\cdot}L^{'1}$ autrement.

2.3. Analyse d'impédance

Toutes les mesures ont été effectuées à l'aide d'un analyseur d'impédance/de gain de phase HP 4194A (Hewlett-Packard, CA, USA), connecté par quatre câbles BNC à une tête de connexion BDS 1200 contenant une cellule de mesure BDS 1309 (NOVOCONTROL Technologies, Montabaur, Allemagne). Le BDS 1309 se compose de deux électrodes plaquées or avec un anneau d'isolation en téflon entre les deux. Le diamètre des électrodes est de 11 mm et la distance entre les électrodes est de 6,1 mm. Cette cellule d'échantillonnage est spécialement conçue pour les liquides à haute permittivité. Une configuration d'électrodes bipolaires a permis de mesurer le courant séparément tout en appliquant une tension. Le logiciel WinDETA (NOVOCONTROL Technologies, Montabaur, Allemagne) a été utilisé pour calibrer le système en utilisant la capacité de fuite de la cellule (1,2 pF) et pour effectuer les mesures. L'impédance complexe des échantillons d'eau a été mesurée dans une gamme de fréquences

allant de 100 Hz à 10 MHz. Dans chaque spectre, 65 points de données sur une échelle logarithmique de 100 Hz à 10 MHz ont été enregistrés avec une triple moyenne interne par point. L'impédance obtenue et les

Les spectres de phase ont été ajustés avec le logiciel "EIS Spectrum Analyser" [36] en utilisant l'algorithme de Powell [37]. Lorsque l'eau traitée et l'eau non traitée ont été comparées, la résistance de l'électrode (*R*) a été déterminée dans un ajustement et maintenue constante dans l'autre.

2.4. SEM/EDX

La MEB/EDX a été réalisée avec un microscope JEOL JSM 6480 LV (JEOL Technics Ltd., Tokyo, Japon) en mode vide poussé (détection des électrons d'émission, tension d'accélération de 10 kV, distance de fonctionnement de 10 mm).

2.5. Mesures et visualisations du champ magnétique

Les champs magnétiques des CMR ont été mesurés à l'aide d'un magnétomètre (VGM, AlphaLab, Inc., Salt Lake City, UT, USA) monté sur une tige en plexiglas de 30 cm de long sur une platine XYZ. Cette platine était composée de deux unités de translation Thorlabs LTS 300/M pour X et Y, et d'une unité LTS 150/M pour la direction Z (Thorlabs GmbH, Dachau/Munich, Allemagne). L'ensemble du dispositif a été monté sur une plaque antivibration TMC (75SSC-103-12 TMC Vibration control, TMC, 15 Centennial Drive, Peabody, MA, USA). Le WCM à scanner a été placé sur une plaque de plexiglas au-dessus d'une table en bois. Une zone de 20 ˆ 20 ^{cm2} a été échantillonnée par pas de 1 mm, 5 mm au-dessus des doubles cylindres (voir figure 3). Avant chaque mesure, le capteur a été mis à zéro dans une chambre à zéro Gauss (ZGC, AlphaLab Inc.) qui réduit le champ magnétique environnemental (champ terrestre) à une valeur proche de zéro (<0,002 G). Chaque point a été mesuré à plusieurs reprises jusqu'à ce que toutes les valeurs (direction *x*, *y* et *z* du champ magnétique) ne diffèrent pas de plus de 5 % l'une de l'autre lors de deux mesures ultérieures. Les champs magnétiques ont ensuite été visualisés en cartographiant les valeurs absolues des composantes *X*, *Y* et *Z* dans l'espace colorimétrique RVB en chaque point. Cette procédure est décrite en détail avec l'exemple d'un barreau aimanté dans la section des résultats.

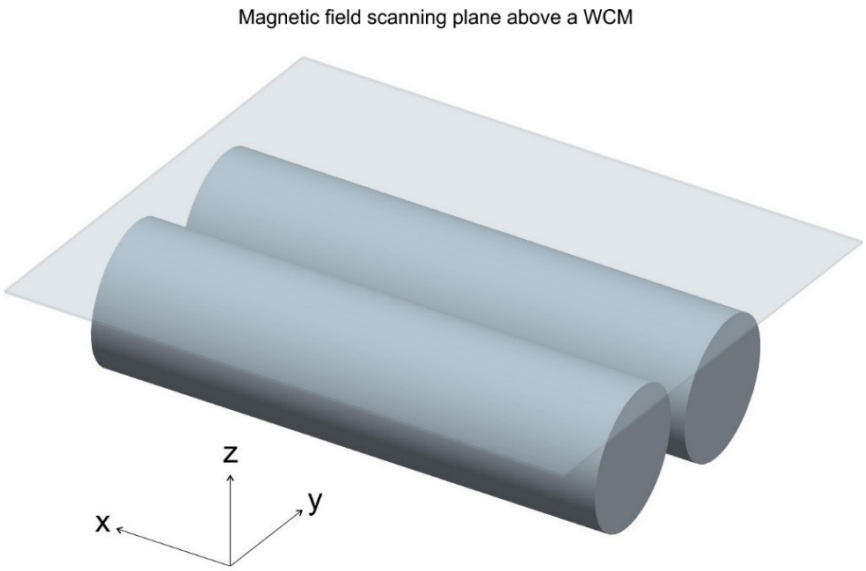


Figure 3. Croquis montrant la zone (20 ˆ 20 cm^2) balayée pour les mesures du champ magnétique avec l'aimant du noyau d'eau en dessous (deux cylindres, 18 cm de longueur, 5 cm de diamètre, 1 cm de distance).

2.6. Mesures de diffusion laser

Pour la diffusion laser, 22 échantillons de chaque analyte ont été mesurés par diffusion laser dans un système microcapillaire (Guava easycyte 8HT, Merck Millipore, Merck KGaA, Darmstadt, Allemagne). La diffusion vers l'avant et vers le côté des particules de taille nm a été détectée dans deux tubes photomultiplicateurs dédiés. L'eau Milli-Q (eau désionisée, Millipore Corporation, résistivité 18 MΩ¨cm) a été utilisée comme blanc. L'analyse des données a été effectuée à l'aide du logiciel InCyte du système. Les données de comptage des particules ont été

récupéré en traçant les données de diffusion vers l'avant (échelle logarithmique) et de diffusion latérale (échelle logarithmique). Le bruit de fond a été défini à l'aide des données de diffusion de l'eau Milli-Q (valeur à blanc). La région a été dessinée dans le graphique en laissant le moins de données de fond possible dans la zone de comptage réelle, qui a ensuite été utilisée pour récupérer les comptages/échantillons.

2.7. Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de GenStat 17th Edition (VSN international Ltd., Hemel Hempstead, UK). Pour chaque expérience, chaque fréquence ($n > 5$) a été comparée aux valeurs à blanc ($n > 5$) à l'aide d'un *test t* bilatéral à deux échantillons avec un intervalle de confiance de 95 %. Le test binominal a été effectué comme un test bilatéral à deux échantillons avec un intervalle de confiance de 95 % en utilisant l'approximation normale. Les analyses des données obtenues ont été effectuées à l'aide du *test t*. ϕ et Z de 65 fréquences uniques par expérience ont été comparés aux valeurs à blanc.

3. Résultats

3.1. Analyse de l'eau du robinet

Pendant la durée des expériences, cinq échantillons aléatoires d'eau du robinet ont été prélevés et analysés. La concentration de leurs constituants est indiquée dans les figures 4 à 6. Les données ont été réparties en trois graphiques afin d'en améliorer la lisibilité. Dans tous les graphiques, la même échelle sur l'ordonnée a été choisie pour des raisons de comparaison. Outre les ions présentés, $NO_2^{'}$, $PO_4^{3'}$, $Fe2+$, $Fe3+$ ont également été étudiés ; leurs concentrations étaient inférieures à la LOQ (<0,05 mg/L). L'analyse montre que les concentrations d'ions ont été relativement constantes tout au long de la période (2,5 ans).

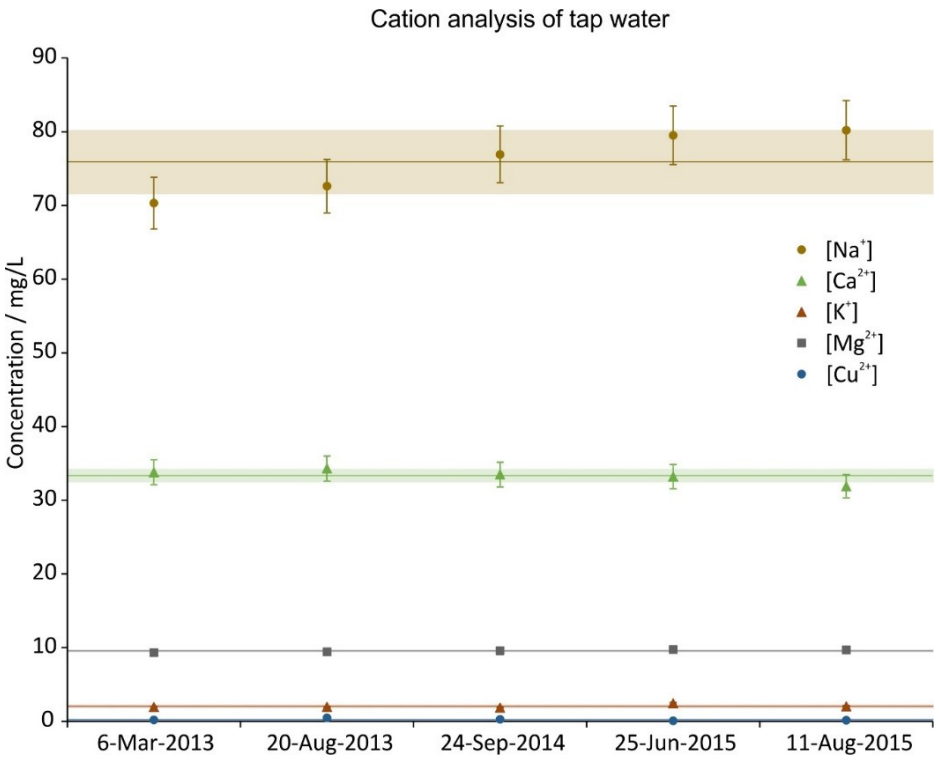


Figure 4. Concentration en cations de 5 échantillons aléatoires d'eau du robinet au cours de la période d'enquête. Les barres d'erreur indiquent la précision de la mesure (5 %), les lignes représentent les moyennes et les zones ombrées décrivent les écarts types sur les 5 échantillons.

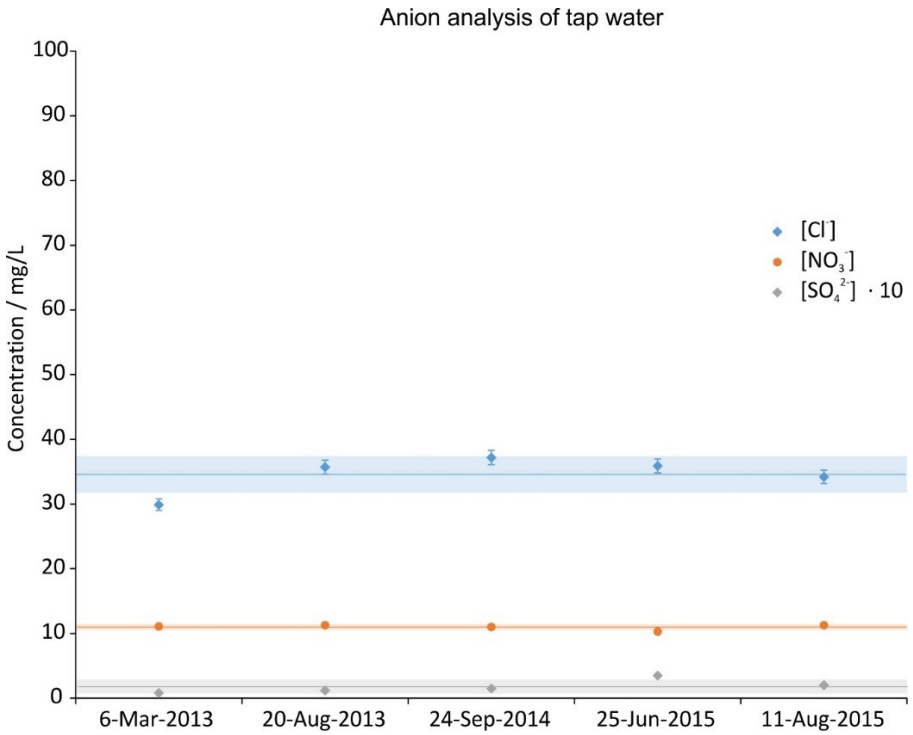


Figure 5. Concentration en anions de 5 échantillons aléatoires d'eau du robinet au cours de la période d'enquête. Les barres d'erreur indiquent la précision de la mesure (3 %), les lignes représentent les moyennes et les zones ombrées décrivent les écarts types sur les 5 échantillons.

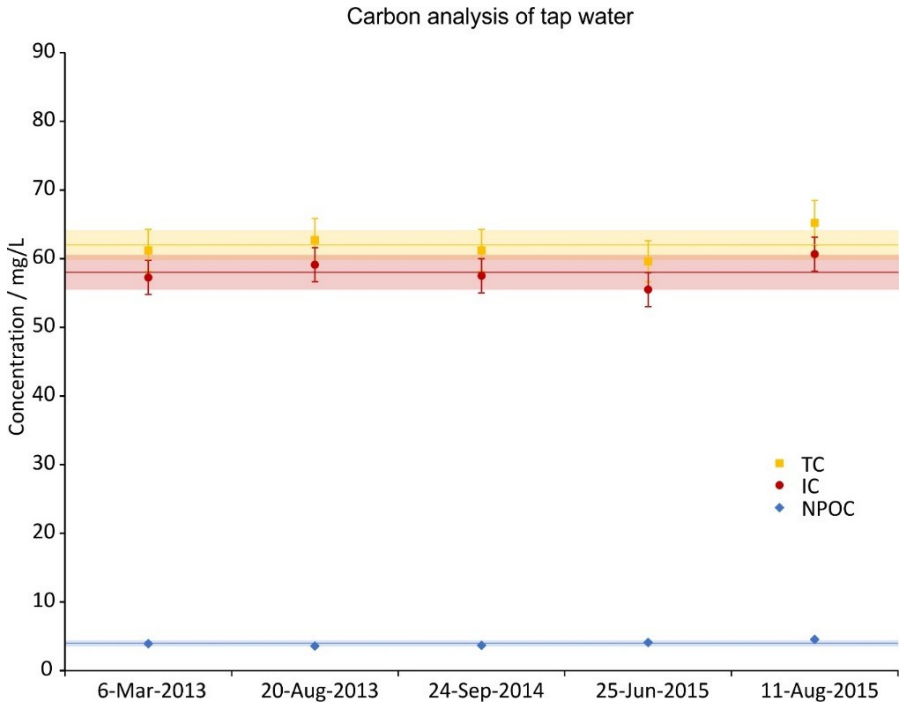


Figure 6. Concentrations de carbone total (TC), de carbone inorganique (IC) et de carbone organique non purgeable (NPOC) de 5 échantillons d'eau du robinet prélevés au hasard au cours de la période d'enquête. Le CI a été calculé à partir de la différence entre le CT et le NPOC. Les barres d'erreur indiquent la précision de la mesure (5 %), les lignes représentent les moyennes et les zones ombrées décrivent les écarts types sur les 5 échantillons.

Indépendamment de cette analyse, l'eau du robinet contenait parfois de minuscules quantités de précipités visibles qui provenaient probablement de l'entartrage des tuyaux qui se sont détachés. Des expériences avec et sans ces précipités ont été réalisées, les résultats sont discutés dans la section 3.4.

3.2. Champs magnétiques

Afin de pouvoir lire correctement les images de balayage du champ magnétique, l'analyse d'un barreau aimanté cylindrique est d'abord présentée. La figure 7 montre le champ d'un tel aimant scanné avec l'appareil décrit dans la section méthode dans une zone de 14 ⌒ 14 ^{cm2}, 3 cm au-dessus de l'aimant.

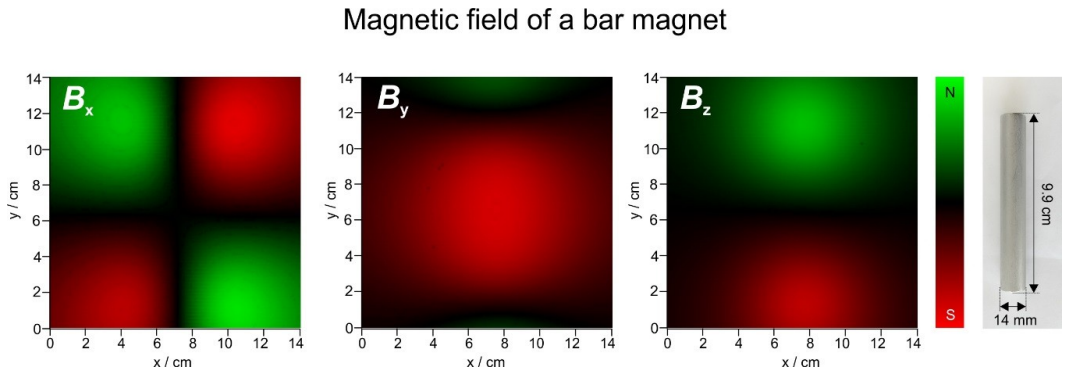


Figure 7. Champ magnétique d'un barreau aimanté (image de droite à l'échelle) dans les directions *x*, *y* et *z*. L'échelle va de '28 à 28 G pour x, '53 à +53 pour y et '71 à +71G pour z. L'échelle va de '28 à 28 G pour *x*, '53 à +53 pour *y* et '71 à +71G pour *z*, respectivement.

Le signe (N ou S) n'étant pas important pour la présente analyse, le champ peut également être représenté en termes d'intensité absolue, et les trois composantes peuvent alors être traduites en trois couleurs primaires, le rouge (*x)*, le vert (*y)* et le bleu (*z)*. Ces images sont ensuite combinées en une image composite RVB. Cette procédure est illustrée à la figure 8.

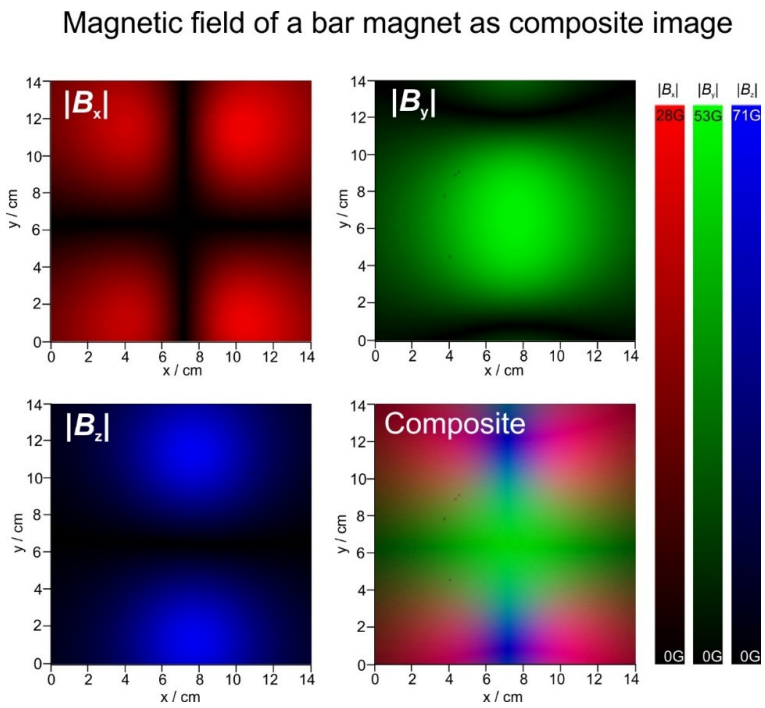


Figure 8. Champ magnétique d'un barreau aimanté dans les directions *x*, *y* et *z* en valeurs absolues. Les images *x*, *y* et *z* sont additionnées pour former la représentation RVB composite finale du champ magnétique.

Avec la méthode décrite ci-dessus, les images composites des champs magnétiques de deux WCM différents (numéros de série 62083545 et 62081992) sont présentées dans la figure 9. Les lignes sombres correspondent à des changements soudains de l'intensité du champ magnétique, qui ressemblent à de forts gradients. Les gradients dans la direction *x* ont été calculés et sont représentés sur la figure 10. Ici, une échelle allant du blanc aux couleurs primaires est utilisée afin d'établir une distinction claire avec les images composites de la figure 9.

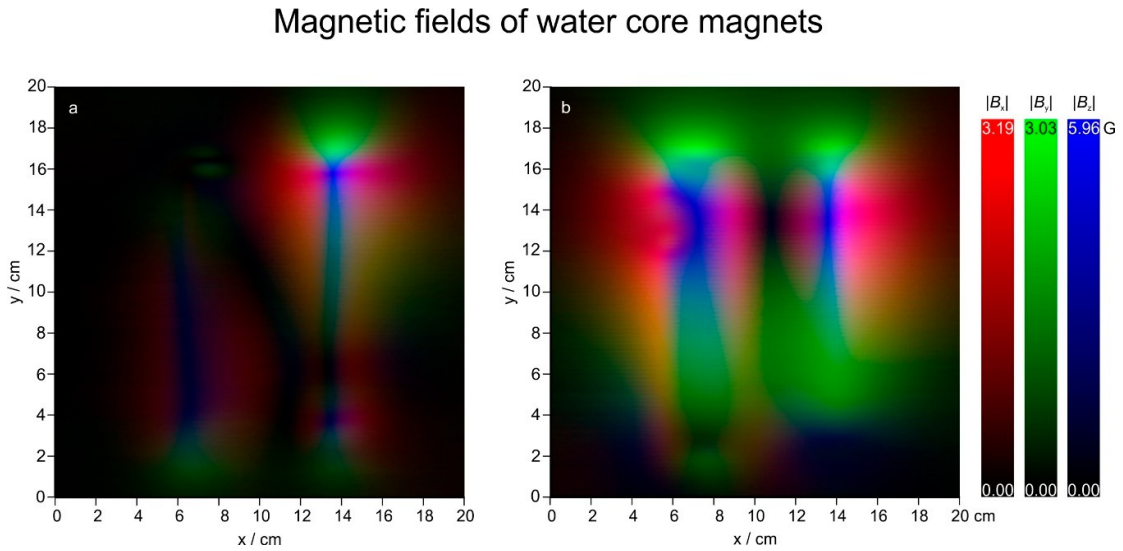


Figure 9. Visualisations du champ magnétique composite RVB des WCM 62083545 (**a**, gauche) et 62081992 (**b**, droite). L'image est de 20 ^ 20 cm^2 , chaque pixel est de 1 mm.

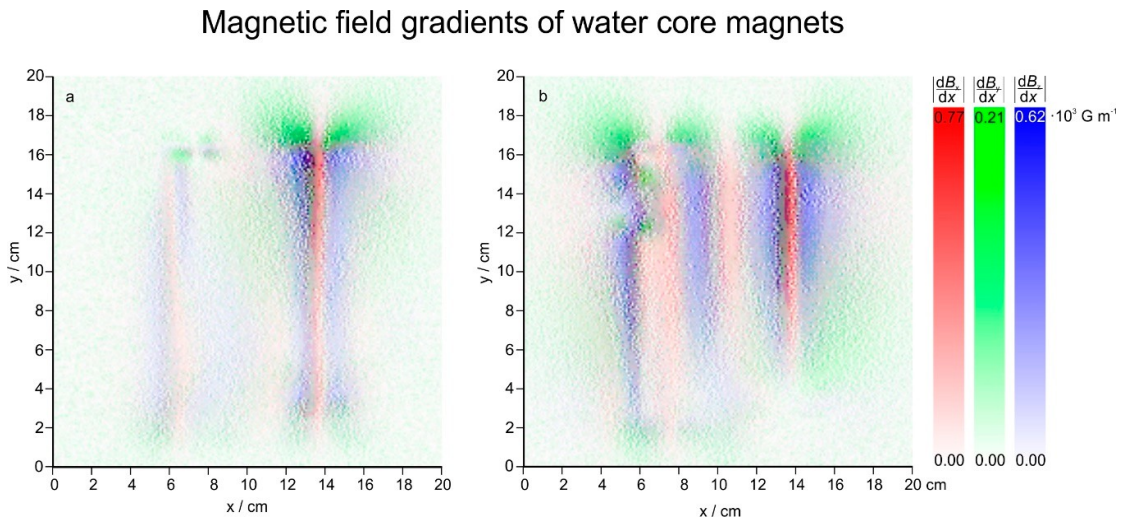


Figure 10. Gradients de champ magnétique (*d/ dx*) du WCM 2. WCMs 62083545 (**a**) et 62081992 (**b**). L'image est de 20 ^ 20 cm^2 , chaque pixel est de 1 mm.

Comme le montre la figure 10, les gradients de champ magnétique des WCM sont de l'ordre de 770 G¨m'^{1} (WCM 62081992) et 740 G¨m'^{1} (WCM 62083545) ou 0,077 T¨m'^{1} (WCM 62081992) et 0,077 T¨m'^{1} (WCM 62083545).
0,074 T¨m'^{1} (WCM 62083545). De plus, tous les gradients semblent avoir une structure plus fine. Comme la sonde à 3 axes du magnétomètre VGM a ses trois capteurs placés dans un rayon de moins de
1,5 mm (selon le manuel) de l'extrémité de la sonde, une résolution spatiale supérieure ne peut être enregistrée. Les gradients présentés avec un pas de 1 mm sont probablement déjà des moyennes spatiales, et les gradients réels présents sont probablement encore plus élevés que 0,077 T¨m'^{1} (WCM 62081992) et que 0,077 T¨m'^{1} (WCM 62081992).

0,074 T¨m'1 (WCM 62083545). Un gradient plus élevé ne changerait pas les résultats de cette étude, mais les auteurs prévoient de mesurer le champ avec un système différent offrant une résolution plus élevée à l'avenir.

Comme mentionné dans l'introduction, Coey [21] a dérivé une inégalité sur laquelle l'efficacité d'un dispositif magnétique peut être évaluée. Par souci de clarté et en raison de son importance, cette inégalité (2) est répétée ici,

$$C \text{''} 2 f \frac{L}{v} {}_{p} a \nabla B \text{ ě } 1, \tag{4}$$

où C est le critère, L la longueur du dispositif magnétique, v la vitesse des DOLLOPs, f_P la fréquence de Larmor d'un proton, a la séparation des spins (0,25 nm) et ∇B le gradient du champ magnétique. Si C ě 1, le dispositif magnétique peut effectivement influencer la cristallisation du carbonate de calcium. Pour les expériences présentées, le dispositif magnétique est plus grand que le volume d'eau traité, c'est pourquoi le diamètre du bécher, 6 cm, est utilisé à la place. On pourrait arguer à ce stade que pour les WCM, la largeur réelle des inhomogénéités, qui n'est parfois que de quelques mm, devrait être utilisée, et non les mesures de l'appareil. Cela réduit C, mais ne change pas le résultat (C ě 1, voir la fin de ce chapitre) jusqu'à des valeurs de L *de* 8 mm.

La vitesse des DOLLOPs peut être calculée à partir du mouvement brownien dans un liquide en utilisant la loi de Fick, $v \text{''} \frac{Dmg}{k T_B}$. Dans un équilibre dynamique, la vitesse est égale à la vitesse de décantation selon la loi de Fick, v " Dmg .
Équation de Stokes-Einstein,

$$v \text{“} \frac{Dmg}{k T_B} \text{''} \mu mg \text{''} \frac{1}{\zeta} mg \text{''} \frac{1}{6\pi\eta r} mg \tag{5}$$

où D est le coefficient de diffusion, k_B la constante de Boltzmann, T la température absolue, μ et m la masse et la mobilité du DOLLOP, g l'accélération due à la gravité, ξ le coefficient de traînée, η la viscosité du milieu et r le rayon d'un DOLLOP (supposé) sphérique. Pour connaître la masse d'une sphère DOLLOP de 100 nm, il faut d'abord calculer sa densité. Étant donné qu'un DOLLOP est constitué à la fois d'eau ($\rho_{25\,\text{˚}C}$ = 1,00 g¨cm'3) et d'aragonite (ρ = 2,93 g¨cm'3), nous évaluons sa densité comme un mélange égal des deux, soit $\rho_{DOLLOP,25\,\text{˚}C}$ = 1.97 g¨cm'3, ce qui donne une masse de DOLLOP de 1,03 ^ 10'15 g. Compte tenu de la viscosité dynamique de l'eau $\eta_{25\,\text{˚}C}$ = 0,89 ^ 10'4 Pa s, la vitesse résultante de DOLLOP due au mouvement brownien est de 0,012 mm¨s'1. Les gradients de champ magnétique des WCM sont de l'ordre de 770 G¨m'1 (WCM 62081992) et 740 G¨m'1 (WCM 62083545) ou 0,077 T¨m'1 (WCM 62081992) et 0,074 T¨m'1 (WCM 62083545).
(WCM 62083545) (voir figure 8), ce qui donne un critère de Coey de C = 8,1 (WCM 62081992) et C = 7,8 (WCM 62083545), donc clairement ě 1. Les gradients réels sont probablement plus élevés, comme indiqué ci-dessus, ce qui augmenterait encore la valeur de C et permettrait des vitesses de fluide plus élevées. Les DOLLOPs plus petits que 100 nm sont plus lents (la diminution de leur masse dans l'égalité. 5 l'emporte sur l'augmentation de leur mobilité) et augmenteront donc également la valeur de C (la vitesse dans l'équation (4) est au dénominateur).

La vitesse d'un DOLLOP permet également d'estimer le temps nécessaire pour que le traitement soit efficace. Un déplacement rectiligne d'un côté à l'autre du bécher (6 cm) prendrait à un DOLLOP de 100 nm
1,4 h. Au cours d'un tel voyage, un DOLLOP devrait rencontrer un certain nombre de gradients de champ magnétique. Il faut toutefois tenir compte du fait que le mouvement brownien n'est pas unidirectionnel, que le DOLLOP peut être plus petit et donc plus lent, et que le temps doit donc être multiplié par un facteur de 10 ou plus pour garantir la réussite du traitement. Cette estimation correspond aux délais observés pour un effet de traitement mesurable d'environ 24 à 48 heures.

3.3. Évaporation

Il a été démontré [20] que les champs magnétiques peuvent modifier le taux d'évaporation des solutions électrolytiques. Dans le cadre de la précision de mesure de nos balances (1 mg), nous n'avons pas constaté un tel effet. Il convient de noter qu'une différence dans l'évaporation a été signalée pour des intensités de champ beaucoup plus élevées (~150 G) que

appliquée dans le cas présent (<10 G), c'est pourquoi cette observation est cohérente avec le modèle proposé et constitue une confirmation supplémentaire de la stabilité des paramètres atmosphériques.

3.4. Impédance complexe

La formation DOLLOP proposée a été testée dans le cadre de 16 expériences indépendantes avec au moins
12 mesures par expérience, une mesure comprenant l'impédance complexe à 65 fréquences, mesurant deux paramètres (phase et impédance) par fréquence. Dans chaque expérience, au moins deux échantillons traités et deux échantillons non traités ont été comparés, et chaque échantillon a été mesuré au moins trois fois. Les résultats des *tests t* pour les échantillons traités comparés aux valeurs vierges ont montré des différences statistiquement très significatives dans 15 des 16 expériences (probabilité exacte binominale < 0,001) soit pour la phase (ϕ), soit pour l'impédance (*Z)*, soit pour les deux paramètres. Une expérience avec une durée de traitement de 48 heures n'a pas montré de différences significatives. Dans 9 expériences sur 16, Z a montré des variations dépendant de la fréquence qui étaient très différentes du blanc. Dans le cas des différences, un minimum de 4 et un maximum de 65 fréquences ont montré une différence significative, des résultats très différents ont été obtenus pour 4 à 65 fréquences. Dans 15 expériences sur 16, ϕ a montré des variations dépendant de la fréquence qui étaient très différentes du blanc. Des différences de fréquences statistiquement significatives pour un ϕ donné sont apparues dans un minimum de 2 et un maximum de 59 cas, des résultats hautement significatifs ont été calculés pour 1 à 56 fréquences. En somme, Z et ϕ ont montré des différences statistiquement significatives dans un minimum de 3 et un maximum de 110 cas, des résultats très différents étant calculés pour 2 à 106 fréquences. La probabilité binominale exacte pour qu'une expérience montre un comportement statistiquement très différent de l'eau traitée par rapport à l'eau non traitée est $p < 0{,}001$ (avec 15 cas sur 16 positifs pour des valeurs statistiques significatives). Ces résultats sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1. Statistiques des résultats du traitement de l'eau de robinet WCM. Dans chaque expérience, 65 fréquences entre 100 Hz et 10 Mhz ont été analysées.

Paramètres	Nombre de paramètres
Nombre d'expériences	16
Mesures par échantillon	ě3
Fréquences par mesure	65
Paramètres par fréquence	2
Différence significative (intervalle de confiance à 95 %)	15

La figure 11 montre des exemples de changements d'impédance et de phase de l'eau du robinet traitée par rapport à l'eau du robinet non traitée. En plus de l'impédance (a,d) et de la phase (b,e), un diagramme de Nyquist des données est présenté (c,f). Sur ce graphique, les parties réelle et imaginaire de l'impédance, $|Z|\cos(\phi)$ et $-|Z|\sin(\phi)$, sont représentées l'une par rapport à l'autre. Sur un tracé de Nyquist, l'impédance est un vecteur dont la longueur et l'angle sont caractéristiques ; une condition préalable obligatoire est donc l'égalité des échelles des axes des ordonnées et des abscisses. Une telle échelle serait cependant défavorable aux détails des spectres présentés dans ce travail, c'est pourquoi nous avons choisi d'omettre cette condition préalable en faveur d'une meilleure représentation des détails spectraux, tout en sachant que l'impédance ne peut plus être lue directement à partir de ces représentations.Alors qu'un tracé de Nyquist ne donne pas d'informations sur la fréquence, il est plus efficace pour montrer les différences entre les spectres sur la même gamme de fréquences puisqu'il combine à la fois l'impédance et la phase en une seule courbe.

Les courbes représentées à la figure 11 ont été ajustées à l'aide du modèle présenté à la figure 1. Les paramètres des éléments du circuit sont indiqués dans le tableau 2 (cas *a)* et le tableau 3 (cas *b)*, respectivement. En outre, les courbes moyennes des 16 mesures ont été ajustées à l'aide de ce modèle. Bien que la composition de l'échantillon et la durée du traitement n'aient pas été identiques pour toutes les expériences, comme décrit dans la section expérimentale, le paramètre le plus important du modèle, la conductivité de l'eau (R_{aq}), a évolué de manière cohérente en fonction du

cas (*a* ou *b)*. Ce résultat est présenté dans le tableau 4.

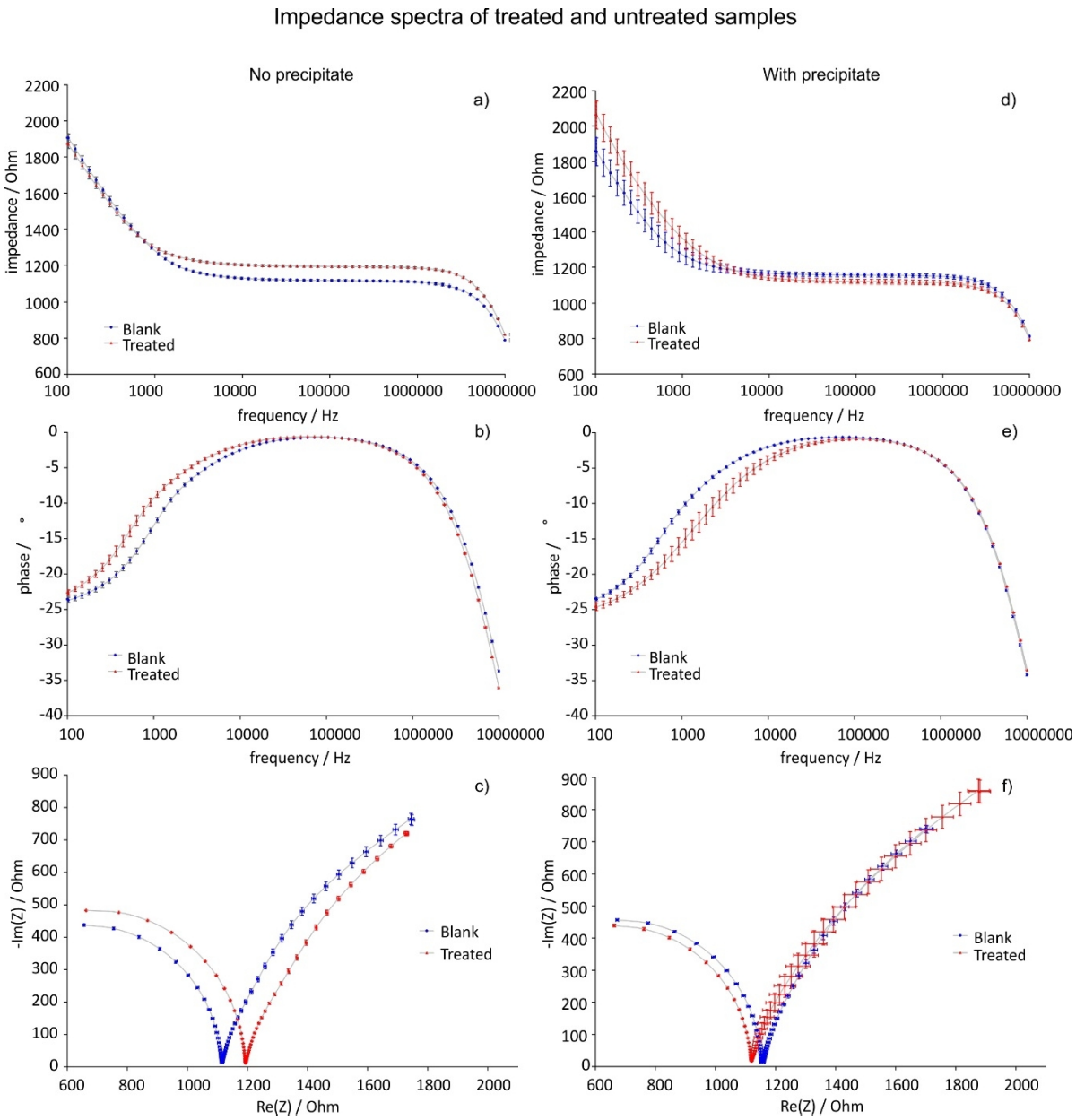


Figure 11. Exemples des deux effets accompagnant la formation de DOLLOP. Selon la présence de précipités, l'impédance augmente ou diminue. Ces effets sont représentés sous forme d'impédance (**a**,**d**), de phase (**b**,**e**) et de diagrammes de Nyquist (**c**,**f**) : Le cas a (**a**,**b**,**c**) a été rencontré sans précipité ; le cas b (**d**,**e**,**f**) a été rencontré lorsqu'une petite quantité de précipité a été trouvée dans le bécher de référence, mais aucune dans le bécher traité après le traitement. Les barres d'erreur représentent l'erreur de mesure.

Tableau 2. Ajustement des paramètres pour la figure 11, cas *a*. Les erreurs représentent la qualité de l'ajustement pour chaque élément. Les couleurs de police bleue et rouge sont utilisées pour mettre en évidence une tendance à l'augmentation ou à la diminution, respectivement.

Paramètres	Non traité		Traité		Différence absolue	Différence relative
R/Ω	238	˘9	238	˘6	0	0%
A_w /Ω¨s´$^{0.5}$	22,593	˘11	21,202	˘511	'1391	'6%
CPE P ˆ 10^7	2.01	˘0.32	4.37	˘0.37	2.36	+118%
CPE n	1.00	˘0.02	0.97	˘0.01	'0.031	'3%
C/pF	17.7	˘0.98	16.8	˘1.4	'0.989	'6%
R_{aq} /Ω	870	˘9	951	˘8	81	+9%

Tableau 3. Ajustement des paramètres pour la figure 11, cas *b*. Les erreurs représentent la qualité de l'ajustement pour chaque élément. Les couleurs de police bleue et rouge sont utilisées pour mettre en évidence une tendance à l'augmentation ou à la diminution, respectivement.

Paramètres	Non traité		Traité		Différence absolue	Différence relative
R/Ω	232	˘7	232	˘10	0	0%
A_w /Ω¨s´$^{0.5}$	21,721	˘10	24,967	˘1064	3246	+15%
CPE P ¨ 10^7	3.63	˘0.34	1.10	˘0.25	'2.53	'70%
CPE n	0.98	˘0.01	1.00	˘0.03	0.019	+2%
C/pF	16.9	˘0.65	17.3	˘1.1	0.342	+2%
R_{aq} /Ω	917	˘7	877	˘11	'40	'4%

Tableau 4. Moyenne, en fonction du cas, du paramètre de résistance de l'eau du robinet R_{aq} ajusté selon le modèle présenté à la figure 1, y compris l'erreur standard. La qualité des ajustements peut être appréciée à partir de l'erreur d'ajustement moyenne de ce paramètre, $E_{Raq,av}$ et de son erreur standard associée.

Cas	Δ $_{Raq,av}$ /Ω	$_{ERaq,av}$ /Ω
a (8 expériences)	31 ˘ 9	14 ˘ 3
b (8 expériences)	'39 ˘ 9	13 ˘ 2

La direction dans laquelle ce changement a été observé dépendait des constituants de l'eau du robinet d'origine :

- Cas *a* : Pas de précipitations

Lorsqu'il n'y avait pas de microprécipitation dans les béchers avant et après le traitement, l'impédance de l'échantillon traité a augmenté à des fréquences élevées (cas *a*, voir figure 11a-c, augmentation de R_{aq} dans le tableau 2). Comme il y a moins d'ions disponibles dans la solution en raison de la formation de DOLLOP, il y a moins de polarisation de l'électrode à basse fréquence (plus petit déphasage dans la figure 7b à basse fréquence et diminution de A_w (constante de diffusion ionique) et *C* dans le tableau 2).

Comme indiqué à la section 3.1, l'eau du robinet initiale contenait parfois de minuscules cristaux. Dans certains cas, des précipitations se sont formées pendant la durée du traitement dans le bécher de référence. Ces deux cas sont résumés dans ce travail sous le nom de cas *b* :

- Cas *b* : précipitations

S'il y avait un micro-précipité visible dans les béchers de référence après le traitement ou dans les deux béchers avant le traitement, l'impédance de l'échantillon traité était plus faible à haute fréquence que celle de l'échantillon de référence, ce qui signifie qu'il y avait plus d'ions en solution (cas *b*, voir figure 11d-f, diminution de R_{aq} dans le tableau 3), et plus élevée à basse fréquence en raison de la polarisation accrue de l'électrode causée par ces ions (déphasage plus important dans la figure 11e à basse fréquence et augmentation de A_w et de *C* dans le tableau 2). Ici aussi, des DOLLOPs sont formés comme décrit dans le cas a, mais le produit de solubilité permet à des ions supplémentaires de se dissoudre à partir du précipité. La solution est donc en équilibre dynamique

entre la formation de DOLLOPs et la solvatation des particules de taille µm (voir Figure 12). L'augmentation d'impédance observée suggère que

le gradient de champ magnétique ne facilite pas seulement la formation de DOLLOPs mais aussi la dissolution des microcristaux. Les auteurs prévoient d'étudier cette hypothèse dans des travaux ultérieurs.

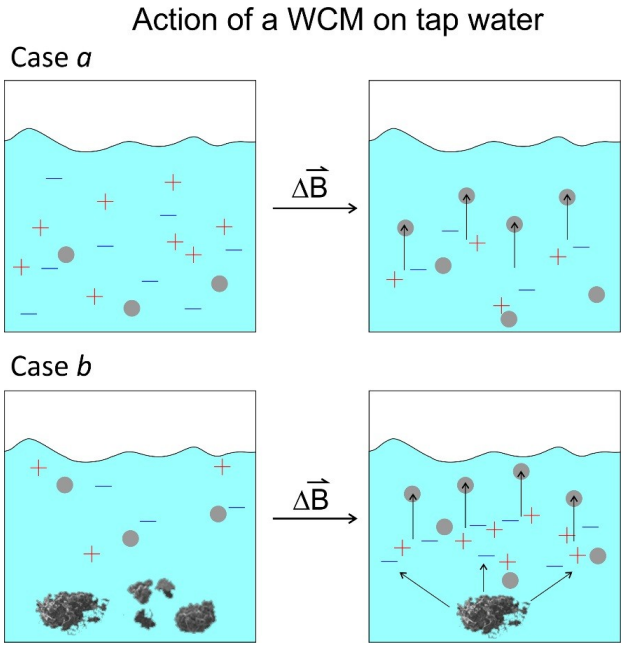


Figure 12. Schéma simplifié des deux cas d'un WCM agissant sur l'eau du robinet. Cas a : aucun précipité n'est présent et le champ induit la formation de DOLLOPs (petits cercles gris). Cas b : si un précipité est présent, des DOLLOPs se forment également, et le précipité est dissous.

Dans aucun cas, on n'a trouvé de précipitations dans le bécher traité après le traitement, ce qui corrobore l'hypothèse de la formation de DOLLOP. En général, le changement dans le cas *b* était plus faible que dans le cas *a* ; et dans le seul cas où nous n'avons pas constaté d'effet significatif du traitement, une tendance vers le cas *b* était observable. Outre la constante de diffusion ionique, la capacité et la résistivité, les paramètres de l'élément à phase constante (*ECP*) présentent de grandes différences entre les ajustements des spectres des échantillons traités et non traités, encore une fois dans la direction opposée pour les cas *a* et *b*, comme les autres paramètres. La signification physique d'un *CPE* fait l'objet d'une discussion permanente en général ; cependant, pour les besoins de ce travail, il suffit de dire que, selon le modèle, avec l'impédance de Warburg, il représente la polarisation de l'électrode et la migration des ions. Les différences de mobilité du contenu ionique de la solution dues à l'impédance de DOLLOP se reflètent également dans les différents paramètres du *CPE*.

Un schéma simplifié de ce mécanisme est donné dans la figure 12.

Ces résultats sont en accord avec les nombreuses observations rapportées dans la littérature [4,6,13,15,16,38-40] et surtout avec le modèle de Coey [21] : les forts gradients locaux agissent sur le mécanisme de précipitation et induisent la formation de DOLLOPs. Dans le cas a, les ions forment de nombreux petits noyaux, les DOLLOPs, qui forment un colloïde et ne sont donc plus capables de suivre le champ électrique alternatif pendant la mesure d'impédance.

3.5. Diffusion laser

Comme ces DOLLOPs sont beaucoup plus petits que 1 μm, leur colloïde est invisible à l'œil nu en raison des petites sections transversales pour la diffusion de Rayleigh. Outre les mesures EIS, nous avons pu confirmer leur présence en examinant des échantillons provenant de deux expériences de diffusion laser. Nous avons comparé 22 échantillons traités à 22 échantillons non traités dans chaque expérience et avons constaté une augmentation significative jusqu'à 25 % des objets de la taille d'un nm dans l'échantillon traité ($p < 0{,}001$) par rapport à la référence. La figure 13 montre des diagrammes de diffusion exemplaires pour l'eau déionisée (eau milli-Q, fond), l'échantillon traité et

l'échantillon non traité ; le tableau 5 résume les résultats de ces expériences.

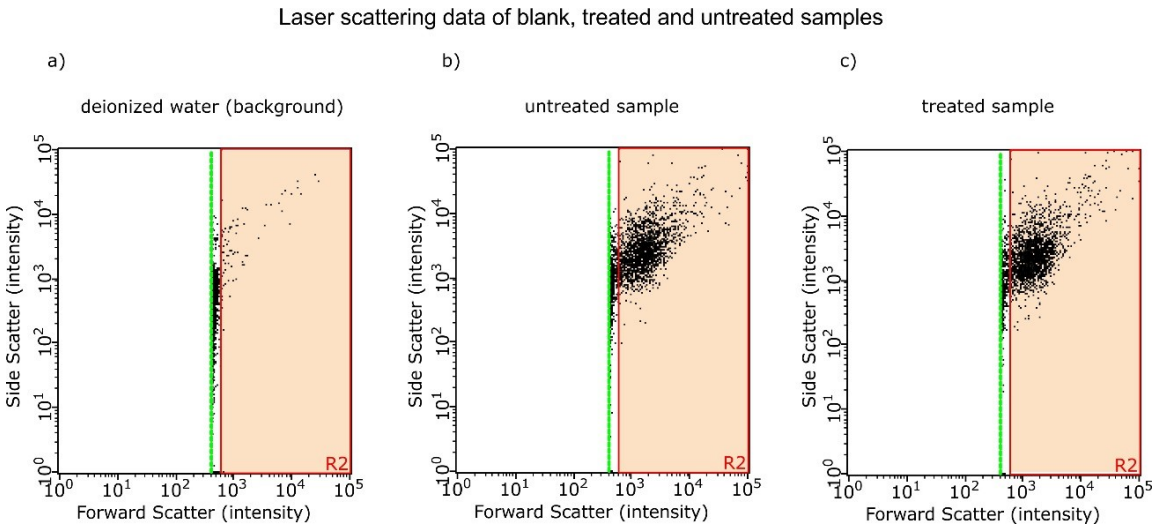


Figure 13. (**a**) Exemple de données de diffusion laser à partir d'eau déionisée ; (**b**) échantillon non traité ; (**c**) un échantillon traité montrant l'intensité de la diffusion avant contre l'intensité de la diffusion latérale. Chaque point représente une particule diffusante. Seule la zone rouge (R2) est évaluée ; les diffuseurs très faibles situés entre la zone rouge et la ligne verte (limite de détection) sont considérés comme du bruit de fond.

Tableau 5. Nombre d'objets déterminés par diffusion laser dans deux solutions traitées et non traitées à partir de 22 échantillons chacune.

Expérience	Non traité/104 chiffres mL'1	Traités/104 comptes mL'1	Différence traité *vs.* non traité
Expérience 1	2.72 ˘ 0.02	3.01 ˘ 0.04	$P < 0.001$
Expérience 2	5.17 ˘ 0.02	7.00 ˘ 0.10	$P < 0.001$

3.6. SEM/EDX

Le précipité a été prélevé dans le bécher de référence à l'aide d'une spatule et examiné par SEM/EDX. L'analyse a révélé qu'il était principalement composé d'oxygène, de calcium et de carbone. Leurs rapports suggèrent la présence d'hydrogénocarbonate et éventuellement de matière organique. Une image représentative du précipité de l'échantillon non traité est présentée dans la figure 14 ; une analyse EDX représentative est donnée dans le tableau 6.

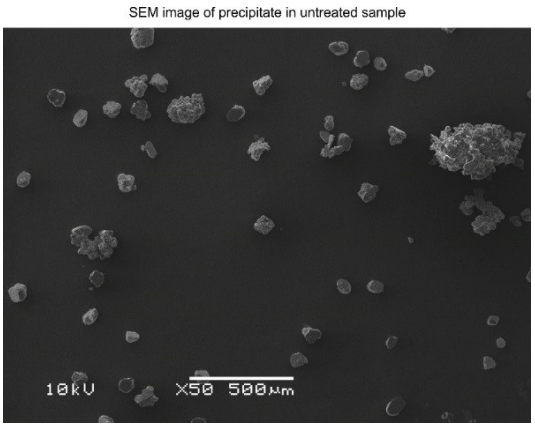


Figure 14. Image MEB du précipité trouvé dans les béchers de référence. La longueur de la barre blanche est de 500 µm.

Tableau 6. Analyse EDX du précipité présenté à la figure 10.

Élément, ligne	Poids (%)	Atome %
Carbone, K	13.23	18.87
Oxygène, K	68.28	73.11
Magnésium, K	0.40	0.28
Phosphore, K	0.00	0.00
Soufre, K	0.01	0.01
Potassium, K	0.06	0.02
Calcium, K	18.03	7.71
Fer, L	0.00	0.00
Total	100.00	100.00

4. Conclusions

Selon une théorie dérivée par Coey [21], la cristallisation du carbonate de calcium peut être influencée par de forts gradients de champ magnétique, indépendamment de l'intensité absolue du champ de l'aimant. Nous avons testé cette théorie en exposant des échantillons d'eau du robinet à ce que l'on appelle des aimants à noyau d'eau (WCM). Les champs absolus des WCM sont faibles (<10 G). Cependant, ces champs présentent un schéma fin de forts gradients de champ (d'770 $G^{¨}m^{'1}$ (WCM 62081992) et 740 $G^{¨}m^{'1}$ (WCM 62083545)). Par spectroscopie d'impédance électrique (EIS) et diffusion laser, nous avons mesuré des différences significatives dans le comportement de cristallisation des échantillons d'eau du robinet exposés. Les résultats peuvent être interprétés comme une formation accrue de DOLLOPs, des grappes de prénucléation à méso-échelle, due à l'exposition à un champ WCM. Nous avons ainsi montré que, comme le prévoit l'inégalité de Coey, le traitement magnétique avec des champs très faibles peut être efficace tant que de forts gradients sont présents dans le champ.

Remerciements : Ce travail a été réalisé dans le cadre de la coopération de Wetsus, Centre européen d'excellence pour les technologies durables de l'eau (www.wetsus.nl). Wetsus est cofinancé par le ministère néerlandais des affaires économiques et le ministère néerlandais de l'infrastructure et de l'environnement, le Fonds de développement régional de l'Union européenne, la province de Fryslân et les provinces du nord des Pays-Bas. Les auteurs souhaitent remercier les participants au thème de recherche "Physique appliquée de l'eau" pour les discussions fructueuses et leur soutien financier, Marianne Heegstra et l'équipe du laboratoire Wetsus pour les analyses chimiques, Philipp Kuntke, Bert Hamelers et Jakob Woisetschläger pour les discussions longues et utiles.

Contributions des auteurs : Cees J.N. Buisman, Cees Kamp et Elmar C. Fuchs ont conçu et élaboré les expériences. Martina Sammer, Cees Kamp, Astrid H. Paulitsch-Fuchs et Elmar C. Fuchs ont réalisé les expériences. Astrid H. Paulitsch-Fuchs et Adam D. Wexler ont analysé les données. Elmar C. Fuchs a rédigé l'article.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts. Les sponsors n'ont joué aucun rôle dans la conception de l'étude, dans la collecte, l'analyse ou l'interprétation des données, dans la rédaction du manuscrit et dans la décision de publier les résultats.

Abréviations

BNC Connecteur baïonnette Neill-Concelman
C Capacitance
C Critère de Coey
CPE Élément à phase constante
cryo-TEM Cryo-microscopie électronique à transmission DOLLOPpolymère d'oxyanion de type liquide
EDX Spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie EIS Spectroscopie d'impédance électrique
IC Chromatographie ionique
IC Carbone inorganique
ICP Spectroscopie à plasma inductif

K	Notation de l'enveloppe électronique des rayons X
L	Notation de l'enveloppe électronique des rayons X

LOQ Limite de quantification
Milli-Q marque déposée créée par Millipore Corporation pour décrire l'eau "ultrapure" de "Type 1", telle que définie par la norme ISO 3696.
MDPI Institut de publication numérique
multidisciplinaire NPOC Carbone organique non purgeable
R Résistance
R_{aq} Résistance de l'eau
RGB Rouge, vert, bleu (modèle de couleur additif) SEM Microscopie électronique à balayage
TC Carbone total
COT Carbone organique total
W Impédance de Warburg
WCM Aimant à noyau d'eau
Z impédance complexe
ϕ phase

Références

1. Josh, K.M. ; Kamat, P.V. Effet du champ magnétique sur les propriétés physiques de l'eau. *J. Ind. Chem. Soc.* **1966**, *43*, 620-622.
2. Duffy, E.A. Investigation of Magnetic Water Treatment Devices. Thèse de doctorat, Université de Clemson, Clemson, SC, USA, 1977.
3. Lin, I. ; Yotvat, J. Exposition de l'eau d'irrigation et de l'eau potable à un champ magnétique dont la puissance et la direction sont contrôlées. *J. Mag. Magn. Mat.* **1990**, *83*, 525-526. [CrossRef].
4. Higashitani, K. ; Kage, A. ; Katumura, S. ; Imai, K. ; Hatade, S. Effects of a magnetic field on the formation of $CaCO_3$ particles. *J. Colloid Interface Sci.* **1993**, *156*, 90-95. [CrossRef]
5. Gehr, R. ; Zhai, Z.A. ; Finch, J.A. ; Rao, S.R. Reduction of soluble mineral concentrations in $CaSO_4$ saturated water using a magnetic field. *Water Res.* **1995**, *29*, 933-940. [CrossRef].
6. Baker, J.S. ; Judd, S.J. Magnetic amelioration of scale formation. *Water Res.* **1996**, *30*, 247-260. [CrossRef].
7. Pach, L. ; Duncan, S. ; Roy, R. ; Komarneni, S. Effets d'un champ magnétique sur la précipitation du carbonate de calcium. *J. Mater. Sci. Lett.* **1996**, *15*, 613-615. [CrossRef].
8. Wang, Y. ; Babchin, A.J. ; Chernyi, L.T. ; Chow, R.S. ; Sawatzky, R.P. Rapid onset of calcium carbonate crystallization under the influence of a magnetic field. *Water Res.* **1997**, *31*, 346-350. [CrossRef].
9. Parsons, S.A. ; Wang, B.L. ; Judd, S.J. ; Stephenson, T. Magnetic treatment of calcium carbonate scale-effect of pH control. *Water Res.* **1997**, *31*, 339-342. [CrossRef]
10. Barrett, R.A. ; Parsons, S.A. L'influence des champs magnétiques sur la précipitation du carbonate de calcium. *Water Res.* **1998**, *32*, 609-612. [CrossRef].
11. Colic, M. ; Morse, D. Le mécanisme insaisissable de la "mémoire" magnétique de l'eau. *Colloid Surface A* **1999**, *154*, 167-174. [CrossRef].
12. Goldsworthy, A. ; Whitney, H. ; Morris, E. Effets biologiques de l'eau conditionnée physiquement. *Water Res.* **1999**, *33*, 1618-1626. [CrossRef].
13. Coey, J.M.D. ; Cass, S. Magnetic water treatment. *J. Magn. Magn. Mater.* **2000**, *209*, 71-74. [CrossRef].
14. Hołysz, L. ; Chibowski, E. ; Szczes', A. Influence des ions d'impureté et du champ magnétique sur les propriétés du carbonate de calcium fraîchement précipité . *Water. Res.* **2003**, *37*, 3351-3360. [CrossRef]
15. Kobe, S. ; Dražic', G. ; McGuiness, P.J. ; Meden, T. ; Sarantopolou, E. ; Kollia, Z. ; Sefalas, A.C. Control over nanocrystalization in turbulent flow in the presence of magnetic fields. *Mater. Sci. Eng.* **2003**, *23*, 811-815.
16. Knez, S. ; Pohar, C. The magnetic field influence on the polymorph composition of $CaCO_3$ precipitated from carbonized aqueous solutions. *J. Colloid Interface Sci.* **2005**, *281*, 377-388. [CrossRef] [PubMed]
17. Fathia, A. ; Mohamed, T. ; Claude, G. ; Maurin, G. ; Mohamed, B.A. Effet d'un traitement magnétique de l'eau sur la précipitation homogène et hétérogène du carbonate de calcium. *Water Res.* **2006**, *40*, 1941-1950. [CrossRef] [PubMed]

18. Li, J. ; Liu, J. ; Yang, T. ; Xiao, C. Étude quantitative de l'effet du champ électromagnétique sur le dépôt de tartre sur les membranes de nanofiltration via l'UTDR. *Water Res.* **2007**, *41*, 4595-4610. [CrossRef] [PubMed]
19. Katsir, Y. ; Miller, L. ; Aharanov, Y. ; Jacob, E.B. The effect of rf-irradiation on electrochemical deposition and its stabilization by nanoparticle doping. *J. Electrochem. Soc.* **2007**, *154*, 249-259. [CrossRef]
20. Hołysz, L. ; Szczes', A. ; Chibowski, E. Effets d'un champ magnétique statique sur l'eau et les solutions électrolytiques.
J. Colloid Interface Sci. **2007**, *316*, 996-1002. [CrossRef] [PubMed]
21. Coey, J.M.D. Magnetic water treatment-how it might work ? *Phil. Mag.* **2012**, *92*, 3857-3865. [CrossRef]
22. Gebauer, D. ; Völkel, A. ; Cölfen, H. Clusters stables de carbonate de calcium prénucléés. *Science* **2008**, *322*, 1819. [CrossRef] [PubMed]
23. Pouget, E.M. ; Bomans, P.H.H. ; Goos, J.A.C.M. ; Frederik, P.M. ; de With, G. ; Sommerdijk, N.A.J.M. The Initial Stages of Template-Controlled $CaCO_3$ Formation Revealed by Cryo-TEM. *Science* **2009**, *323*, 1455-1458. [CrossRef] [PubMed]
24. Raiteri, P. ; Gale, J.D. Water is the key to nonclassical nucleation of amorphous calcium carbonate. *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 17623-17634. [CrossRef] [PubMed]
25. Gebauer, D. ; Cölfen, H. Clusters de prénucléation et nucléation non classique. *Nano Today* **2011**, *6*, 564-584. [CrossRef]
26. Wolf, S.E. ; Müller, L. ; Barrea, R. ; Kampf, C.J. ; Leiterer, J. ; Panne, U. ; Hoffmann, T. ; Emmerling, F. ; Tremel, W. Carbonate-coordinated metal complexes precede the formation of liquid amorphous mineral emulsions of divalent metal carbonates. *Nanoscale* **2011**, *3*, 1158-1165. [CrossRef] [PubMed]
27. Demichelis, R. ; Raiteri, P. ; Quigley, J.D. ; Gebauer, D. Les amas minéraux stables de prénucléation sont des polymères ioniques liquides . *Nat. Commun.* **2011**, *2*, 590. [CrossRef] [PubMed]
28. Donaldson, J.D. Magnetic treatment of fluids-preventing scale. *Finish* **1988**, *12*, 22-32.
29. Spear, M. L'attrait croissant du traitement magnétique. *Process. Eng.* **1992**, *73*, 143.
30. Zunkovic˘, K. Wasserbelebung am Beispiel Grander-Technologie : Eine Empirische Erhebung unter industriellen Anwendern. Thèse de doctorat, Université de Graz, Graz, Autriche, 2007.
31. Busch, K.W. ; Busch, M.A. ; Parker, D.H. ; Darling, R.E. ; McAtee, J.L., Jr. Studies of a water treatment device that uses magnetic fields. *Corrosion* **1986**, *42*, 211-221. [CrossRef].
32. Goldman, A. *Modern Ferrite Technology* ; Springer : New York, NY, USA, 2006.
33. Sammer, M. ; Laarhoven, B. ; Mejias, E. ; Yntema, D. ; Fuchs, E.C. ; Holler, G. ; Brasseur, G. ; Lankmayr, E. Biomass measurement of living Lumbriculus variegatus with impedance spectroscopy. *J. Electrical Bioimpedance* **2014**, 5, 92-98. [CrossRef]
34. Brug, G. ; van den Eeden, A.L.G. ; Sluyters-Rehbach, M. ; Sluyters, J.H. The analysis of electrode impedances complicated by the presence of a constant phase element. *J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem.* **1984**, *176*, 275-295. [CrossRef]
35. Santos, M.B.D. ; Agusil, J.P. ; Prieto-Simón, B. ; Sporer, C. ; Teixeira, V. ; Samitier, J. Highly sensitive detection of pathogen Escherichia coli O157 : H7 by electrochemical impedance spectroscopy. *Biosens. Bioelectron.* **2013**, *45*, 174-180. [CrossRef] [PubMed]
36. Bondarenko, A.S. ; Ragoisha, G.A. Inverse Problem in Potentiodynamic Electrochemical Impedance. In *Progress in Chemometrics Research* ; Pomerantsev, A.L., Ed. ; Nova Science Publishers : New York, NY, USA, 2005 ; pp. 89-102.
37. Powell, M. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *Comput. J.* **1964**, *7*, 155-162. [CrossRef]
38. Martynova, O.I. ; Tebenekhin, E.F. ; Gusev, B.T. Conditions et mécanisme de dépôt de la phase solide de carbonate de calcium à partir de solutions aqueuses sous l'influence d'un champ magnétique. *Colloid J. USSR* **1967**, *29*, 512-514.
39. Chechel, P.S. ; Annenkova, G.V. Influence du traitement magnétique sur la solubilité du sulfate de calcium. *Coke Chem. R* **1972**, *8*, 60-61.
40. Kronenberg, K.J. Experimental evidence for effects of magnetic fields on moving water. *IEEE Trans. Magn.* **1985**, *21*, 2059-2061. [CrossRef].

© 2016 par les auteurs ; licence MDPI, Bâle, Suisse. Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions de la licence Creative Commons by Attribution (CC-BY) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Environmental Research 213 (2022) 113638

Listes de contenus disponibles sur SeienceDirec t

Recherche environnementale

Page d'accueil du journal : www.elsevier.com/locate/envres

Étude de l'effet d'un traitement magnétique durable sur l e s communautés microbiologiques de l'eau potable

Xiaoxia Liu """", Bernhard Pollner , Bernhard Pollner " , Astrid H. Paulitsch-Fuchs '" , Elmar C. Fuchs "" ,
Nigel P. Dyer "'*, Willibald Loiskandl[1] ', Cornelia Lass-Flörl "

[a] *lVetsus, Centre européen d'excellence pour les technologies durables de l'eau, Oostergoweg 9, 8911 MA Leeuwarde , Pays-Bas*
[b] *Institut de physique du sol et de gestion des eaux rurales Université des ressources naturelles et des sciences de la vie,* Vienne, *Autriche Division de l'hygiène et de la* microbiologie médicale, *Université médicale d'Innsbruck, Innsbruck, Autriche*
[d] *Institut de diagnostic et de recherche en* hygiène, *microbiologie et* médecine *environnementale, Université de* médecine de Graz *Neue Stiftingtalstrafle 2.801 O, Gram, Autriche*
[e] *Université de sciences appliquées de Carinthie, sciences biomédicales, SL Veiterstrafle 47, 9020* Klogen *Autriche*
Optical Sciences Group, Faculty of !Science and Tecluiology (TNW), University of Twente Drienerlolaari !S, 7S22NB Enschede the *Netherlands coherent Water Systems, 2 Crich Avenue, DE23 6ES Derby, United Kingdom*

A R T I C L E E N F O

Mots-clés :
Eau potable
Flowcytométrie
Communauté microbienne du traitement de l'eau magnétique

A B S T R A C T

La pénurie d'eau potable constitue un problème pour l'humanité, d'où la nécessité d' améliorer la qualité de l'eau. Le traitement magnétique de l'eau, qui a été conçu pour améliorer la qualité esthétique de l'eau et réduire les problèmes d'entartrage, peut constituer un complément important au traitement traditionnel dépendant des désinfectants. Malgré les nombreuses possibilités d'application sur le marché, l'effet des champs magnétiques sur la composition de l'eau potable (microbienne) et, par conséquent, sur sa biostabilité est encore largement inexploré, bien que le premier brevet ait été déposé dès 1945.

La cytométrie de flux a été appliquée pour évaluer l'effet de champs magnétiques faibles (<10 G) avec des aimants de taille importante (800 Gym) sur les colonies de niiciobium de l'eau de forage. L'eau de forage a été collectée à partir du robinet et placée à l'intérieur du champ magnétique (traitée) et à 5 ni de l'aimant pour éviter toute interférence rétroactive (conti'ol) en montant une pointe statique et une pointe secouée. Des échantillons ont été prélevés pendant une période de sept jours pour l'examen de la cytonie du sang. En outre, les effets des champs magnétiques sur la croissance de Pseitdoiitonos aeri oso dans l'eau du robinet atitoclavée ont été examinés. Sur la base de l'intensité fliioiescente du contenu en acide nucléique coloré, les cellules niiciobiales ont été classées en deux catégories : faible contenu en acide nucléique (LNA) et haut contenu en acide nucléique (HNA). Nos i'esii1ts montrent que le LNA est dominant en condition de niiti'ient lirrlited tandis que le HNA dorrlinate lorsque le niiti'ient est nioie disponible. Un tel comportement du LNA et du HNA correspond bien au modèle de sélection r/K discuté depuis longtemps, selon lequel les stratèges i s'adaptent aux conditions étirophiques et les stratèges K s'adaptent aux conditions oligotiophiques. Les champs magnétiques appliqués favorisent sélectivement la croissance des LNA dans un environnement riche en nutriments, ce qui indique un effet bénéfique sur l'amélioration de la biostabilité. L'inhibition d'une HNA iepieseiitative *Pseudoitioiins aerugiiiosa* a également été observée. Sur la base de nos observations en laboratoire, nous concluons que l'utilisation du champ magnétique peut être une méthode durable pour la gestion de la communauté microbienne avec un grand potentiel.

1. Introduction

L J. Mopietir *tre'innrRt de tny w'iter*

sur les parois des canalisations est utilisé depuis 1945, lorsque la première application commerciale a été brevetée en Belgique (Vf*i til('I rf*lJ, 19!'*8)*. Malgré les nombreuses applications du traitement magnétique de l'eau, une explication bien acceptée des mécanismes des effets du champ magnétique sur la qualité de l'eau n'a pas encore été trouvée.

L'application des champs (électro-) magnétiques pour le traitement de l'eau n'a pas été établie. Jusqu'à présent, la plupart des études dans ce domaine se sont concentrées sur l'utilisation des champs magnétiques dans le traitement de l'eau.

La méthode d'analyse de l'eau de mer a été utilisée pour supprimer le dépôt de carbonate de calcium (CaCO3) sur les aspects physiochimiques du processus et a laissé les aspects microbiologiques de l'eau de mer à l'état naturel.

* Coi'répondant auteur'. Optical Sciences gi'otip, Faculty of Science and Technology (TNW), Univei'sity of Twente, Di'ienei'lolaan 5, 7o22NB Enscliede, the Nethei'1ands.
Adresse électronique : t .t .fiit'lis(u u lii't ii I' .ml (E.C. Fiichs). Ces aiitliois ont contribué à part égale à ce travail.

https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113638
Received 13 May 2022; Accepted 5 June 2022

Disponible en ligne le 12 juin 2022
0013-935l/C 2022 L'Atithois. Publié par Elsevier Inc. Cet article est en libre accès sous licence CC BY (litt{a://creativeconimons.org/licenses/by/4.0/).

composant de l'amadou aquatique étudié (Q tiinn a1., 97 ; .Ulimi e t 2009 ; li s a1., 2015).

Par ailleurs, les effets des champs magnétiques sur les procaryotes ont été étudiés dans le cadre de l'étude de l'impact des champs magnétiques sur l'environnement.
ont également été rapportés dans différentes études. Par exemple, les effets inhibiteurs des
Les e f f e t s des champs magnétiques sur le taux de croissance ont été observés sur des bactéries en culture pure telles que *Esrlierichin coli* et *Stapliylorcus* curate (I ')i ' i al...
? HU ; S i i a sa k r i at., ? UI4? ; Masood et al., 2020). En outre, *E.* coli et Pseiidoiiionos ceruginosa incubés dans un milieu de culture à 37 °C ont été soumis à un test de dépistage du cancer du col de l'utérus.
plus sensibles aux antibiotiques (kananiycine et aniikacine)
lorsqu'ils sont exposés à des champs électromagnétiques (S' 5u i'i ' i i nl....I ?). Un tel effet inhibiteur des champs magnétiques sur la croissance microbienne semble être
très intéressant pour résoudre les problèmes liés aux bactéries dans l'eau potable, y compris la croissance des pathogènes planctoniques, la formation de biofilrn ou la déterio-
ration de la qualité esthétique des métabolites secondaires des bactéries. Pour
A la connaissance des auteurs, il n'y a pas encore eu d'étude sur l'influence des champs magnétiques sur la microbiologie de l'eau potable. Une approche probiotique de la gestion de la qualité de l'eau potable a récemment attiré l'attention (1 'a ' 1 a1., ?t) ? 1 ; I ii i to ' i at. ? 1 ? ; lvi i th alid Her iiii I !' ; Van N \ I i al. , ? 1 'â), une meilleure compréhension de l'effet des champs magnétiques sur la microbiologie de l'eau potable pourrait conduire à des méthodes non invasives plus durables favorisant spécifiquement les communautés d'indigènes noirs dans l'eau potable.

I.2. *oJnetric* /iigerpriiiO o/ *microbial coiiiiiiiniifies*

Les progrès récents des méthodes de cytométrie en flux ont permis de mesurer en temps réel la microbiologie de l'eau potable et ont donc ouvert de nouvelles possibilités d'application de l'approche probiotique.
à la biostabilité de l'eau potable (1 i nt's' i a1. , ? IN18 ; Va ii N' i ' l ' i a1., ?I416').
Par rapport aux méthodes de culture traditionnelles longues telles que le comptage sur plaque hétéro trophique (HPC) (11rna s'i1"-i a n rl r-1rli i' lJ, 1')8!a ; /\ 1l il r-i a1...,
? HU) qui ne surveillent qu'environ t% des espèces microbiennes totales dans la communauté de l'eau potable (All' ' i al.. ?I4Od) (Va n N' i r l ' i at., ?I4 I /), la cyroniométrie de flux semble être beaucoup plus robuste et précise car elle scanne chaque cellule individuelle pour collecter des informations sur la base de son signal flilorescent. Par conséquent, avec cette méthode, la quantification et les statistiques d'activité de la communauté enritique peuvent être collectées en quelques heures (Var i N t' - i ul. , / ; V\' ai ig '- i ul. , 1IU).

La littérature antérieure fait état de données de cytométrie de flux qui montrent généralement une division entre deux groupes microbiens dans les systèmes d'eau naturels en fonction de la teneur en acide nucléique : les microbes dits "à haute teneur en acide nucléique" (HNA) et les microbes "à faible teneur en acide nucléique" (LNA) (11ai' ai ml r , ti I t) ; Li" ' I at. , 1 ; s t l at. , 1 t)). Le rapport entre HNA et LNA reflète également les sources d'eau ou les événements de contamination, et peut donc être considéré comme une "empreinte cytométrique" p o u r déterminer la qualité de l'eau et surveiller la dynamique et la structure des communautés de poissons sans qu'il soit nécessaire de procéder à une identification taxonomique (lit ni i ' i a1...,
1 ; 1st i ' i a1., EU1 '1, 1I'). En outre, il a également été observé que les deux groupes de @croorganisiHs diffèrent non seulement par leur contenu en acides nucléiques, mais aussi par la taille des cellules, leur fonctionnalité et leur comportement (voir
1). On a observé que les cellules HNA étaient dominantes dans les environnements riches en nutriments et qu'elles présentaient souvent un taux de croissance plus élevé dans l'eau potable contaminée (Li rl ct al.... 201.7 ; al, 29 ., ;
ct al., 2021). En revanche, les cellules LNA sont souvent reliées à des oligo

Tableau 1
Les caractéristiques principales de l'acte de cllai observées dans litei attïi e des niici ooi ganisnis à haute teneur en acide nucléique (HNA) et des inici oo1ganismes à faible teneur en acide nucléique (LNA).

Charac teristi cs	HNA	LNA	Référence
Size	Big	Petite (<0,4 pm ou < 0.22 pm)	Pi c à. 2)
F unetionali ly	Hetero tiophi c/ Eu tiophi c	Oligotrophic	Šolić et al. (2010)
Dominant	eaux usées,	Faible teneur en nutriments	Prest et al.,
Habiiat	eau stagnante, intestin humain	environnement, l'eau potable, eaux de surface	2. 13 ; Ta c 1.. 1)
Cinétique de **croissance** dans la boisson l'eau	Lente dans les 3 premiers jours (ml.2 d'')	Rapide dans les 3 premiers jours (0.fl d'')	Liu at. i 7)
Métal l'interaction	Négativement corrélé au métal concentration	Positivement corrélé au métal concentration	Liu et al. (2017)
Substrat	pas en corrélation avec assimilable Ie carbone organique	posi tivement en corrélation avec organique assimilable carbone	Liu et al. (2017)
Exposition à **oxidant**	Sensible	Non sensible	Ramseier et al. (2011)
Taxonomy	par exemple *Pseudomonos Porcobacteria,* *E.* com, etc.	(Proctor e t a1 ... sp.., 2013 ;	par exemple etc. a1.. 2011 ; Ru b ns ct at. 2 19)
Comporteme nt hypothétiqu e	r-s ti stratégie	E-stratégie	ce document

les microbes trophiques qui s'adaptent mieux aux environnements pauvres en nutriments tels que l'eau potable. Les cellules LNA dépendent également de substrats carbonés différents de ceux des HNA (I iii i at., ? UJ Z ; Smt ir ' i al. ? 14)). Très récemment (I u i r i' ' i a1. , ? USI), la théorie de la sélection r/K, utilisée à l'origine en niacroécologie, a été appliquée à l'écologie microbienne des systèmes d'eau potable, discutant longuement d e s possibilités d'enrichir et de gérer l e s " stratèges K" pour obtenir une eau potable biologiquement stable. Selon ce concept, l e comportement des micro-organismes en ce qui concerne la concentration en nutriments et les taux de croissance peut être regroupé en deux catégories, les stratèges K et les stratèges r. Les stratèges r sont adaptés aux conditions de l'eau potable et aux conditions de l'environnement. Les stratèges r sont adaptés à un environnement à forte disponibilité de nutriments et ont donc un taux de croissance intrinsèque élevé (ligne) dans un environnement riche en nutriments.

Les stratèges K, quant à eux, sont adaptés à des environnements à faible disponibilité de nutriments, ont donc une plus grande affinité pour les nutriments et, par conséquent, ont tendance à croître plus rapidement lorsque les nutriments sont rares. Sur la base du comportement distinct des deux groupes de micro-organismes et de leurs caractéristiques bien assorties avec les stratèges r/K, nous avons également émis l'hypothèse que les microbes HNA utilisent la stratégie r, qui signifie un taux de croissance plus rapide à une concentration élevée de nutriments, et les microbes LNA utilisent la stratégie K, qui signifie un taux de croissance plus rapide à une faible concentration de nutriments, comme caractéristiques de leur comportement écologique.

7.3. *Motivation du travail actuel*

Bien que le traitement magnétique de l'eau soit largement utilisé dans le monde entier comme adoucisseur d'eau en bout de chaîne dans les foyers (€ a1'i Hi i at., 1), on sait peu de choses sur les effets de l'application des champs magnétiques sur les coiiiiiiiinités microbiennes dans l'eau potable, ce qui rend la méthode controversée. Le présent travail vise à combler ce manque de connaissances. Dans cette étude, nous avons utilisé la cytométrie en flux pour étudier les dyna@cs microbiens de coin nilinité dans l'eau du robinet et évalué l'effet des champs magnétiques sur les micro-organismes de l'eau potable, à la fois au niveau de l'espèce unique et au niveau de la communauté. Notre objectif est de fournir une compréhension de base de l'effet des champs magnétiques très faibles sur la microbiologie de l'eau potable et d'explorer le potentiel possible du traitement magnétique de l'eau en tant qu'alternative durable et sans produits chimiques aux méthodes de traitement actuelles.

2. Matériels et méthodes

Le déroulement général de l'expérience peut être décrit comme suit : environ TOO niL L'eau du robinet (native ou autoclavée) a été recueillie après un rinçage de 20 minutes et aliquotée dans des béchers en verre t6 ou 4,8 (100 ml chacun) dont la moitié a été exposée à des champs magnétiques faibles avec des aimants à noyau d'eau (WCM) à gradients longs et ascendants (type DZKL, IPF GmbH, Autriche). Ces aimants présentent un champ magnétique très faible (<10G) avec des gradients magnétiques élevés (800 G/ni) comme caractéristique particulière. Ils ont déjà été utilisés dans des études similaires et le champ magnétique a été cartographié (Sai tin It 1 al. , I ' ; l'aiiI i is' 11.1 it ' 1 is '- i nl., 1) . Le maintien

Tableau 2
Valeurs p des tests de Mann wiiitney U cor+sparing tieated and rnlti eated samples of static set rip expei intent.

Jours	2	3	4	5	6	7
To tal cel1	0.008413*	0.023628'	**0.000624'**	o.ooo3sz'	0.000264"	0. 004994"
%LNA	0.006923*	0.1.81901	**0.284608**	0ññ)9+8	0.804779	0.601.006
LNA	0.027428*	0. 008905'	**0.02690?'**	O.OO&86&'	0.T 24499	0. 0030Z8"
HNA	0.008901*	0.014114'	**0.OI89z9'**	O.OO7+98'	0.080064	0.1.671.70

*p < 0,0S, différence significative (également imprimée en gras).

Tableau 3
Valeurs p 1estilts des tests U de Mann-Whitney comparant les échantillons de bénéficiaires de services de secourisme qui ont été formés et ceux qui ne l'ont pas été.

Jours	2	3	4	5	6	7	9	11	14
To tal cel1	0. 4.76878	**o.OOOOOi-**	0.019'S63*	**0.OOOOZ8'**	0. OOOOO 6*	0. OOOO16"	0.001232*	**0.OO2I2I'**	0. 408739"
%LNA	0. 03638"	0.004 +8'	0. 000372"	**0.000000'**	0. OOOOO 0*	0. 000002"	0.00000'S*	**0.OOOOOI'**	0,00OO1 8"
LNA	0.878291	0.000000*	0.003211"	**0.000002'**	0. OOOOO 0*	0.000002"	0.000001*	**0.000000'**	0. 00 OO99"
HNA	0.4.1.0241	0.000030*	0,7T94 T6	**0.569652**	0.190192	0.306295	0.633032	**0.549928**	0. 1.60637

*p0 ,05, différence significative (également pi interl en gras).

Les deux groupes ont été incubés à température ambiante (22-23 'C) (Amprobe TR200 A, Fluke Europe BV, Pays-Bas) pendant un nombre de jours allant de 7 à 28 jours (ia1'1t SP). À intervalles réguliers et dans des conditions stériles, des échantillons ont été prélevés dans chaque bécher, et le nombre de cellules microbiennes dans chaque échantillon ainsi que leur distribution de fluorescence ont été déterminés par cytométrie de flux. La date des expériences et les paramètres chimiques pertinents indiquant les qualités de l'eau peuvent être trouvés dansS1 . L'expérience a été réalisée dans la partie nord d'Innsbriicker, en Autriche, où l'eau de source s'écoule des roches calcaires des Alpes et est ensuite directement fournie comme eau potable sans prétraitement. Innsbriicker Kommrinalbetriebe (IKB) (li i ips : i' i' ii .i kl'.
) était le fournisseur d'eau.

Deux types différents d'enclos expérimentaux ont été utilisés dans cette étude, un enclos statique et un enclos à secousses. Dans tous les cas, les sites de traitement et de contrôle avaient les mêmes conditions de température, d'humidité et de champ magnétique de fond. Le dispositif statique a été conçu pour représenter l'eau stagnante avec des nutriments limités, et le dispositif d'agitation a été conçu pour représenter l'eau dans des conditions de mélange et d'aération constantes, fournissant ainsi une meilleure disponibilité des nutriments et de l'oxygène que le dispositif statique.

2.1. Static set-up

Pendant l'expérience, huit béchers (250 ml, 95 x 70 mm) recouverts de verres de montre (a 80 mm) ont été placés soit à côté d'un aimant comme échantillons traités, soit sans aimant comme échantillons de contrôle. Les échantillons de contrôle ont été placés à b ni des échantillons traités pour éviter d'éventuels effets d'interférence des champs magnétiques. Les champs magnétiques de fond sur le site expérimental ont été mesurés à l'aide d'un gaiissniomètre Voltcraft GM 100 et étaient de 1 G. Des boîtes en polypropylène (395 x 2s'5 x 290 mm) ont été utilisées pour couvrir les béchers du groupe de contrôle et du groupe traité séparément afin d'assurer une protection supplémentaire contre la contamination (1 init i' S I ri). L'expérience de mise en place systématique a été réalisée avec 8 répliquats pour chaque réactif (n = 8 pour les produits créés et n = 8 pour les témoins) et a été répétée 4 fois. Seuls 4 réplicats en rotation ont été mesurés pour les échantillons du jour 0 (eau du robinet originale) parce que les variances entre les réplicats étaient très faibles (1 its. .I et).

2.2. Shaking set-up

Un agitateur orbital a été placé sur l'établi des deux sites expérimentaux, distants de 5 m l'un de l'autre. Chaque bécher a été blindé magnétiquement à l'aide d'une plaque de base spéciale afin d'éviter les champs magnétiques générés par l'agitateur et de réduire le champ magnétique de retour à une valeur inférieure à 1 G (mesuré à l'aide d'un Gailssnieter GM-100 de Voltcraft). Ces plaques de base étaient constituées d'une plaque acrylique de 4 mm d'épaisseur, d'une couche de 0,40

mm, une plaque de bois de 12 mm, une autre couche de feuilles de métal Mn de 0,40 mm, une autre plaque de bois de 12 nun et une dernière plaque acrylique de 4 nun (de bas en haut). Sur cette plaque de base, une autre plaque acrylique plus grande (4 nun) a été placée, sur laquelle ont ensuite été disposés jusqu'à 24 béchers en verre (300 ml, 55 x 95 nun) recouverts de verres de montre (¢ 80 trim), les béchers du groupe expérimental étant exposés aux gradients magnétiques des WCM. Le groupe traité et le groupe témoin ont été recouverts d'une boîte en polypropylène (710 x 440 x 310 nun) et les deux agitateurs orbitaux ont fonctionné à 166 tours/minute. Dans le groupe traité, les béchers en verre ont été maintenus en place par deux demi-coques fabriquées à partir de tuyaux d'eau en PVC (figure S2 b). Afin de tester l'équivalence entre le site de traitement et le site de contrôle, une expérience doublement négative, sans présence de MCE dans l'un ou l'autre groupe, a également été menée avec l'agitateur orbital. L'expérience de secouage a été répétée trois fois : deux fois avec 8 répétitions (ri = 8) et une fois avec 24 répétitions (ri = 24). Pour chaque répétition, seuls 4 réplicats au total ont été mesurés pour les échantillons du jour 0 (eau du robinet originale) parce que les variances entre les réplicats étaient très faibles (id. .1 et 4).

Pour l'expérience des Psetidoinoiins neruginoso dans l'eau potable stérilisée à l'autoclave, l'agitation a également été appliquée. La même eau du r o b i n e t utilisée pour l'agitation a été recueillie dans un bécher de verre de 1 L recouvert d'un verre de montre, autoclavée pendant 20 minutes à 121 °C, puis répartie dans 16 béchers plus petits (t00 niL) et une culture de Pseiidornoiios oeruginosc (ATCC 279b3) a été ajoutée à chaque bécher en conservant une concentration finale de 3 CFU/niL. Toutes les opérations ont été effectuées dans des conditions stériles dans une armoire à flux laminaire. Ensuite, une moitié des béchers (n = 8) a été placée à côté de l'aimant comme échantillons traités et l'autre moitié (n = 8) a été placée à 5 ni de l'aimant comme échantillons de contrôle. La croissance de *Pseuéloiiioiias aengiiiosa* a ensuite été suivie pendant 2 à 28 jours afin d'observer l'effet du traitement sur l'évolution du nombre de cellules à différentes phases (phase exponentielle, phase stationnaire et phase de mort).

Dans tous les cas, les béchers en verre ont été nettoyés dans un lave-vaisselle de laboratoire, puis stérilisés à la chaleur pendant 13 heures à 210 °C avant d'être utilisés. Le robinet d'eau a été rincé pendant 20 minutes avant le prélèvement d'un échantillon. L'eau a été recueillie dans un bécher en verre de 10 L et répartie dans 48 béchers en verre plus petits (100 niL chacun) pour une incubation plus poussée. Une moitié de ces béchers a été choisie au hasard et utilisée comme groupe de contrôle, l' autre comme groupe traité.

Un échantillon a été prélevé dans chaque bécher à une série d'intervalles de temps (tous les 1 ou 2 jours) dans des conditions stériles. Les béchers du groupe créé et du groupe témoin ont toujours été manipulés séparément. Coloration

2.3. Sample preparation

2.4. Staining & flow cytometry data analysis

a suivi le protocole décrit en détail précédemment (Pi ct al., 29 .,). À chaque point de temps d'échantillonnage, tous les échantillons d'eau incubés dans les deux conditions, traitement magnétique et contrôle, ont été colorés simultanément. Les échantillons d'eau ont d'abord été préincibés à 3s' °C pendant 5 minutes, puis 1,0 pL/mL d'une dilution 1:1,00 de SYBR Green (Sig ma Aldrich S9430) dans du DMSO ont été ajoutés à TOO tiL d'échantillon d'eau, suivi d'une incubation de 1,0 min à 3s' °C dans l'obscurité. Ensuite, les échantillons ont été mis sur de la glace et fixés par du formaldéhyde (1,4 %), et conservés dans l'obscurité. Un nombre niaxinitlni de huit échantillons a été traité en une seule fois. L'acquisition des données de cytométrie en flux a été effectuée immédiatement après la coloration en suivant la procédure décrite dans l'étalon l'rt . 1I'm). Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un cytomètre BD FACSVerse (BD Bio- sciences) équipé d'un laser bleu de 20 niW (488 nrn) et d'u n matériel de comptage volumétrique. Les intensités de fluorescence à 527 nrn 32 nin (fluorescence verte) et à > 670 nm (rouge lointain) ont été collectées ainsi que les signaux de diffusion avant et latérale. Une valeur seuil de 500 a été fixée pour le canal de fluorescence verte. Le cytomètre de flux a été calibré quotidiennement selon l e s normes du fabricant.

Pour chaque échantillon, les données ont été acquises pendant 90 s (fl0 pL7min) et utilisées pour extraire le nombre total de cellules microbiennes présentes dans l'échantillon. Le calibrage a été étalonné avec de l'eau Milli Q, de l'eau du robinet atitoclavée et des séries de dilution pour garantir un reflet précis du nombre de cellules et un calibrage identique a été appliqué à tous les échantillons. Les données ont ensuite été traitées avec un paquetage R personnalisé (basé sur les *paquets* R *flowCore* et ;fioivWorLspare9 (Ellis ct2 .41S ; Fand d 2.411) et présentés sous forme d'histogramme montrant le nombre cumulé de cellules à différentes intensités de fliio rescent pour chaque échantillon d'eau. Ces histogrammes ont été utilisés comme empreinte fluorescente pour chaque échantillon d'eau. Une méthode similaire a déjà été employée pour analyser l'eau provenant de filtres à sable lents avec la cytométrie de flux dans l'eau potable (1 "ir s i ' i al., ?O1.1 ; lia n ' i al.. ? IN18) Le nombre de cellules dans l'ensemble agité était environ deux fois plus élevé que celui de l 'e n s e m b l e statique. Par conséquent, les spectres de la queue (au-dessus de 2350) qui ne sont pas représentatifs du comportement des pics principaux peuvent avoir un impact plus important sur l e nombre de cellules d u LNA% de l 'installation statique par rapport à rhose de l'installation par agitation, un passage de bande de fliilorescenr en tension (1600-2350) a été appliqué pour permettre une comparaison plus précise entre l'installation statique et l'installation par agitation-tlp (1 it. 1). Le seuil d e séparation entre LNA et HNA a été fixé différemment pour chaque expérience sur la base de l'évolution de la taille d e s groupes de cellules dans l a condition de contrôle uniquement. Plus précisément, la courbe de croissance cellulaire a été tracée sur la base du nombre total de cellules, puis le point temporel au début de la phase stationnaire a été sélectionné et l'histogramme fluorescent montrant le nombre moyen de cellules à chaque intensité fluorescente a été tracé. Ensuite, l'intensité fluorescente qui contenait le nombre de cellules le plus bas entre deux pics sur l'histogramme de fluorescence a été déterminée comme seuil automatiquement par un paquetage R écrit sur mesure (Fig S 4). La procédure spécifique pour

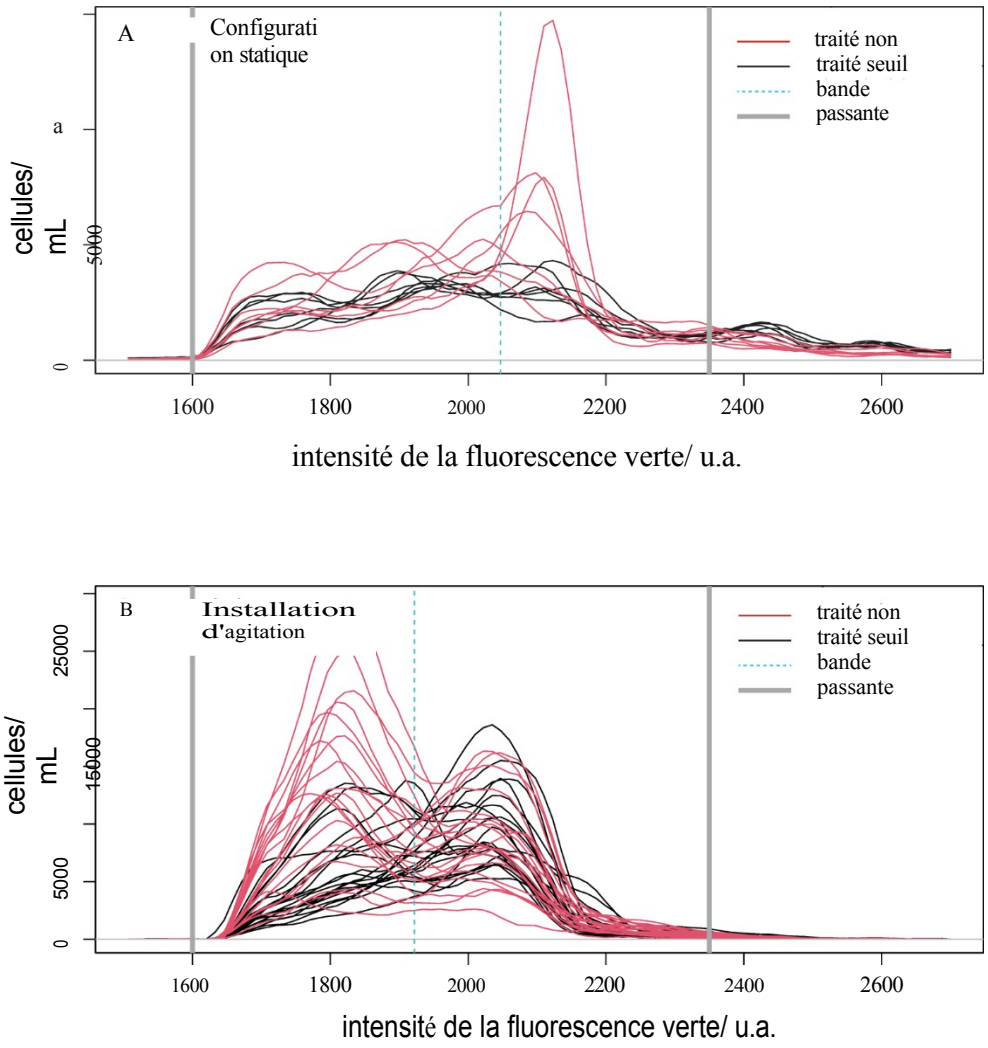


Fig. t. Disnibution of gieen flttoi escence foi tieatnieiit giotip (ied) and conti ol giottp (black) Koi A) the static set tip at day 6 and B) the shaking set rip at day 4. La ligne bleue en pointillés représente la région isoeniissive séparant les cellules à forte intensité d'émission des cellules faiblement émettrices (LNA) et a été utilisée pour le calcul

du pourcentage de cellules LNA. (Pour l'inteipi station des iefel ences à colorer dans la légende de cette figure, l'ieadei est iefei ied à lire la ed ver sion de cet ar ticle).

Le seuil de séparation entre LNA et HNA est indiqué dans la section S^. Cette méthode de division LNAJNA garantit que LNA et HNA présenteront des comportements de croissance différents, ce qui se traduira par le développement de quantités différentes d'acide nucléique au cours de la croissance cellulaire dans un système discontinu.

2.S. Évaluation statistique

Les expériences avec 2 x 24 béchers en verre ont fourni suffisamment de données pour permettre une exclusion plus importante basée sur une analyse iiiiiltivariée utilisant l e s paquets R nqtiopP et rrcovDD (helm at id Koi a' s, EU 1 (' ; 1oc1'ii , 1 ('). Cette exclusion permet de reconnaître les valeurs aberrantes du nombre de cellules et de la distribution de la fluorescence. Pour les expériences avec des béchers en verre de 2 x 8, l'exclusion des valeurs aberrantes a été effectuée sur la base du nombre de cellules dans le bécher par point de temps, en supprimant manuellement les points de données situés en dehors d e s moustaches des diagrammes en boîte standard. Après l'exclusion de l'otitlier, les données ont été soumises à une évaluation statistique univariée standard (intervalle de confiance à 95 % ; toutes les opérations ont été effectuées dans R) (R2 41 7). Les données n'étant pas normalement distribuées, le test U de Mann Whitney a été appliqué pour tester la différence d e densité cellulaire entre l e s échantillons de contrôle et les échantillons traités par magnétisme à chaque *point d'*échantillonnage.

Comme l e s données à chaque point d'échantillonnage n'étaient pas distribuées normalement, la médiane (au lieu de la moyenne) de la concentration cellulaire totale, de la concentration cellulaire de LNA et de la concentration cellulaire d e HNA à différents points temporels dans la configuration statique et la configuration orbitale a été utilisée pour l'analyse cinétique de la croissance. Les courbes de croissance dérivées de LNA et de HNA ont été montées à l'aide d'un modèle logistique dans le paquetage *Growtliratr+* de R développé sur la base du modèle de croissance de Monod (Ku ii, ? tJtJ'4). Le taux de croissance niaxinjilrn et la capacité de charge (taille maximale de la population pouvant être maintenue dans un environnement donné) des cellules totales, des cellules LNA et des cellules HNA ont été calculés sur la base des courbes de croissance à l'aide de l'équation),

$$y = \frac{K_s \cdot Y_0}{Y_0 + (K_s - Y_0)e^{-\mu_{max} \cdot t}}, \quad (1)$$

où R signifie la *capacité de charge,* *o l'abondance initiale, p le taux de croissance maximal et I le temps.

3. Résultats

3.1. Observation concerning the flow cytometry data

1 ig I représente un exemple de l'intensité de la fluorescence en fonction de la concentration cellulaire. En général, un effet des champs magnétiques sur les cellules présentant une intensité de fluorescence différente a pu être observé. Plus précisément, l e traitement magnétique a augmenté le nombre de cellules à faible intensité de fluorescence et inhibé les cellules à forte intensité de fluorescence dans l a configuration d'agitation, alors que dans l a configuration statique, la densité globale des cellules à faible et forte intensité de fluorescence a augmenté. Comme l'intensité de fluorescence reflète la teneur en acides nucléiques des cellules microbiennes, la quantité d'acides nucléiques colorables dans les cellules peut également refléter d'autres caractéristiques ou le comportement des cellules mesurées. Par conséquent, des *paramètres* quantitatifs résumant cette observation sont nécessaires pour une analyse plus approfondie des données. D'après l'évolution de la densité des cellules à différents moments de l'échantillonnage, une division progressive de l'intensité de fluorescence basée sur les clusters a pu ê t r e observée tout au long de l a croissance des cellules. Étant donné qu'une telle division était souvent plus évidente aux points d'échantillonnage juste avant que la croissance cellulaire n'entre dans l a phase stationnaire (environ 3fi jours), ces points d'échantillonnage ont été sélectionnés pour définir l e seuil qui divise les cellules microbiennes en LNA et HNA. Par conséquent, le seuil a été défini individuellement pour chaque expérience sur la base des caractéristiques des histogrammes de fluorescence de chaque échantillon pendant la croissance cellulaire dans des conditions non traitées (1 it ii r' S:I ; I all1' Sfl). Le seuil des 9 expériences se situait dans la zone médiane (1850-2050 parmi 1600-2350) de l'histogramme de fluorescence ('1'al'l' S ?). Par la suite, la lecture finale de l'analyse a été réduite à deux paramètres : le nombre total de cellules et le pourcentage de cellules microbiennes en dessous du seuil en pourcentage du nombre total de cellules.

LNA (%LNA).

L'évolution du nombre total de cellules microbiennes et la proportion de LNA/HNA dans l'eau du robinet dans l'installation statique ont été surveillées pendant Z jours et l' effet du traitement magnétique a été évalué. En général, l' augmentation de la concentration cellulaire totale suit le schéma général de la croissance microbienne dans un système discontinu, où une croissance exponentielle est observée dans la phase initiale (jour 2-3) et un plateau de la concentration cellulaire est observé dans une phase ultérieure (jour 4-7). L'effet positif du WCM sur le nombre total de cellules était plus marqué dans la deuxième phase (1 si EA).

Le groupe LNA a été dominant (>60%) dans les échantillons de contrôle pendant l'expérience (1 if. GB). Le % d'ARNL dans les échantillons traités était significativement plus bas dans l'échantillon créé pour un seul jour (1 if. GB) même si les cellules totales dans les échantillons traités étaient toujours significativement plus élevées que celles des échantillons de contrôle. Cela suggère que les concentrations cellulaires des deux groupes ont été augmentées par l'application du champ magnétique (1 'it. DC-D). Plus précisément, pour les cellules LNA, même si le taux de croissance maxijHlim (pinor) des cellules traitées était légèrement inférieur à celui des cellules non traitées, la capacité de charge (Ks) a augmenté après le traitement magnétique (1DC). Pour les cellules HNA, la croissance cellulaire ne correspond pas très bien au modèle de croissance logistique pour les taux de croissance, mais la capacité de charge (Ks) a augmenté de 50 % après le traitement magnétique (Fig. 2D). La capacité de charge de HNA était beaucoup plus faible (50 %) que celle de LNA, ce qui indique que dans des conditions statiques, la disponibilité du substrat (oxygène) est très limitée pour que HNA atteigne une croissance plus rapide et une concentration cellulaire plus élevée que les cellules de LNA (I al'lr ?). L'expérience a été répétée quatre fois et trois d'entre elles ont montré une augmentation significative de la concentration cellulaire totale (I a ml' ?).

Dans le set-tlp agité, une tendance générale similaire à celle du set-ilp statique a été observée. La concentration cellulaire totale a augmenté de manière exponentielle au cours des trois premiers jours et a atteint la phase stationnaire à partir du quatrième jour (1 si. !1A). Cependant, la concentration cellulaire totale maximale dans le set-tlp agité, tant dans les échantillons traités que dans les échantillons de contrôle, était plus élevée que dans le set-tlp statique, ce qui suggère une meilleure disponibilité du substrat et donc une capacité de charge accrue de l'environnement de l'eau de robinet après un meilleur mélange (1a1'1t ' I). Il est intéressant de noter que la capacité de charge des échantillons d'eau du robinet a été multipliée par plus de deux après la création de champs magnétiques. Parallèlement, le % d'ARNL des échantillons traités (61,79 %) était également plus élevé que le % d'ARNL des échantillons de contrôle (43,38 %) pendant la phase stationnaire, malgré la faible abondance initiale d'ARNL (13,8 %) dans les échantillons traités et de contrôle (1 ig. 'JB).

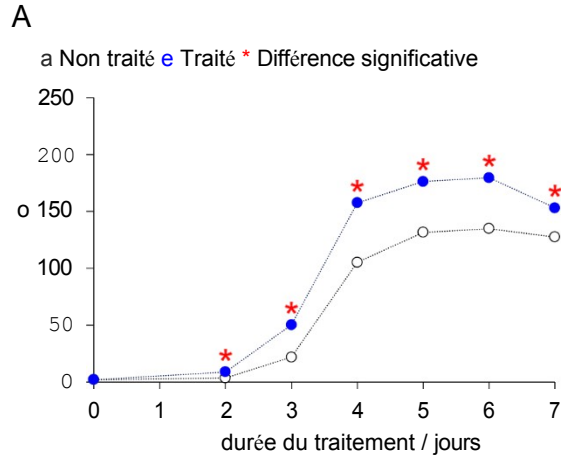
Un examen plus approfondi de la concentration cellulaire de LNA et de HNA séparément (1 'it. 'JC et D) a montré que l'effet du WCM sur LNA était responsable de la plupart des différences dans la concentration cellulaire totale et le %LNA. La capacité de charge de l'eau du robinet pour LNA a été améliorée de près de trois fois après le traitement au WCM, alors qu'aucune différence n'a pu être observée pour HNA après le traitement au WCM.

Les taux de croissance au cours de la phase initiale ont montré une dynamique variable pour les différents groupes microbiens avec ou sans traitement (F3C et D). Plus précisément, le troisième jour, la concentration cellulaire totale (I'i . :JA) était significativement plus faible dans les échantillons traités par rapport au contrôle. Mais cette différence significative a disparu immédiatement le jour suivant avec une tendance légèrement inversée (jour 4). À partir du jour b, la concentration cellulaire dans les échantillons traités est devenue significativement plus élevée que cellule des échantillons de contrôle pendant cinq jours sans interruption. L'inversion de la concentration cellulaire entre le jour 3 et le jour 4

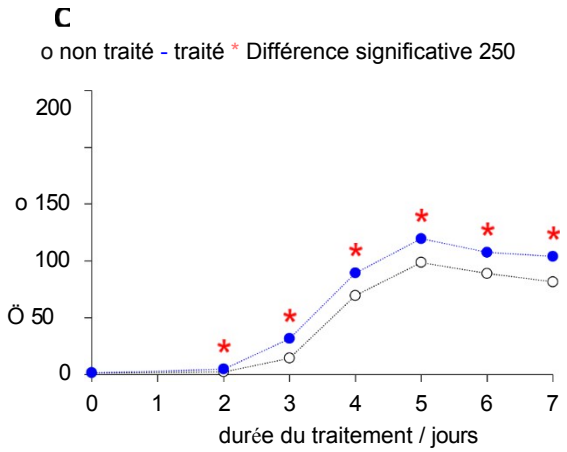
3.2. Static set-up

pourrait s'expliquer par le changement rapide du taux de croissance des LNA et HNA sous l'influence du champ magnétique (1'i¿. HC et D). Entre le jour 2 et le jour 3, dans le groupe témoin, le taux de croissance spécifique de LNA (1,88 jour ') était plus élevé que le taux de croissance de HNA (1,54 jour '). Après le jour 3, les taux de croissance spécifiques de tous les échantillons ont diminué brusquement. Pour LNA, le taux de croissance spécifique

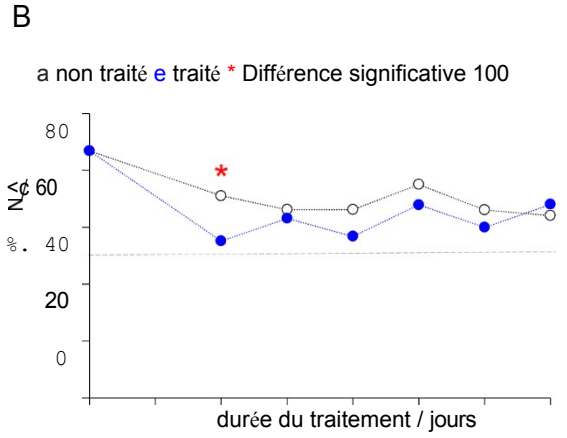
3.3. Shaker set-up

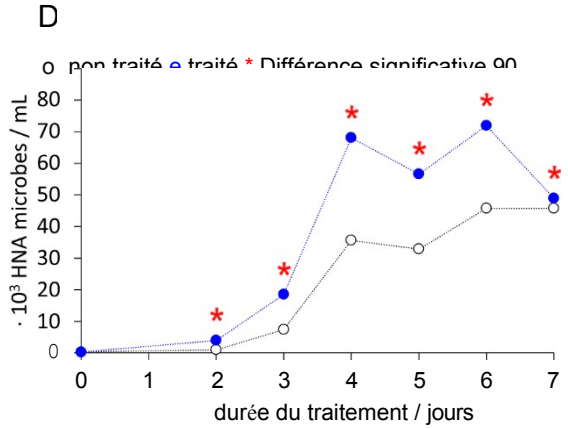


	Y,	pmax	K,
traité	o.o0z	3,0	132
non traité	o.o0s	3.3	170



	Y,	pmax	K,
traité	o.024	2.5	111
non traité	o.002	3.o	90





	Y#	pmax	K_s
traité	o.001	3.47	62
non traité	o.002	2.92	42

Fig. 2. (A) Médiane de la concentration cellulaire totale et (B) % de cellules LNA dans les échantillons d'eau du robinet collectés sur 7 jours de temps d'incibiation dans la condition conti ol (noir) par rapport à la condition liée à l'eau (bleu) dans 1e set top statique (ri = 2 x 8). Les différences significatives détectées par un test H de Mann Whitney sont indiquées par des points rouges. (C) Consommation cellulaire des cellules LNA et (D) consommation cellulaire des cellules HNA à chaque point dans le temps, calculée à partir de la consommation cellulaire totale réelle et du % LNA réel. Le gi owtli cellulaire 1epiesenté par le niedian de la consenu ation cellulaire de HNA et LNA a été ajusté à un modèle logistique (1 i u ' ü.') et les par anietei s (abondance initiale, Y ; giowth i ate maximale, pniax ; canying capacité, Ks) ont été montrés dans le tableau. Seules les valeurs de pai anierei qui peuvent influencer significativement le comportement de gi owth (p 0 .05) ont été indiquées en gras. Des diagrammes en boîte montrant l'éventail des valeurs peuvent être trouvés dans la figure SG. (En raison de l'interpétation des i e£ei ences à colotïi dans cette ligili e légende, l'ieadei est ieferi ed à la vei sion Web de cet anicle).

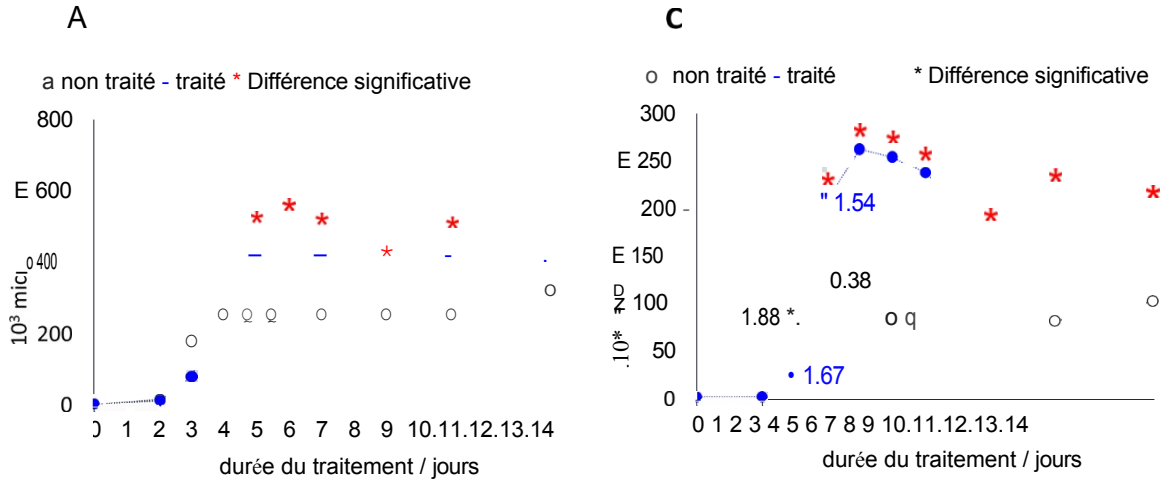
a diminué de 1,88 jour °' au jour 3 à 0,38 jour °' au jour 4 dans les échantillons de contrôle, tandis que dans les échantillons traités, le taux de croissance n'a diminué que de 1,88 jour °' au jour 3 à 0,38 jour °' au jour 4 dans les échantillons de contrôle.
1,67 jour ' ou 1,54 jour °'. Cet effet est probablement dû à l'augmentation de la capacité de charge dans les échantillons traités, qui a permis aux nii crobes LNA de maintenir un taux de croissance élevé. Pour le HNA, le taux de croissance spécifique dans l'échantillon traité a également diminué plus lentement que le contrôle au jour 4, mais la différence entre l'échantillon traité et le contrôle était beaucoup plus faible que pour le LNA. L'expérience a été répétée quatre fois, et toutes les répétitions ont montré une augmentation de la concentration cellulaire totale et/ou une augmentation du %LNA.

Notamment, même si le taux de croissance maxiiiiiini de HNA était beaucoup plus faible que celui de LNA, la population de départ estimée au jour 2 (Yp) de HNA était environ 600 à 5000 fois plus élevée que celle de LNA.

Il est possible que le taux de croissance maximal de HNA ait eu lieu avant le point d'échantillonnage. Si nous supposons que la population initiale de LNA et de HNA au jour 1 était d'environ 10' cellules/niL, le taux de croissance moyen de LNA pour les trois premiers jours (1,01 jour ') sera inférieur à celui de HNA (1,17 jour°).[1]

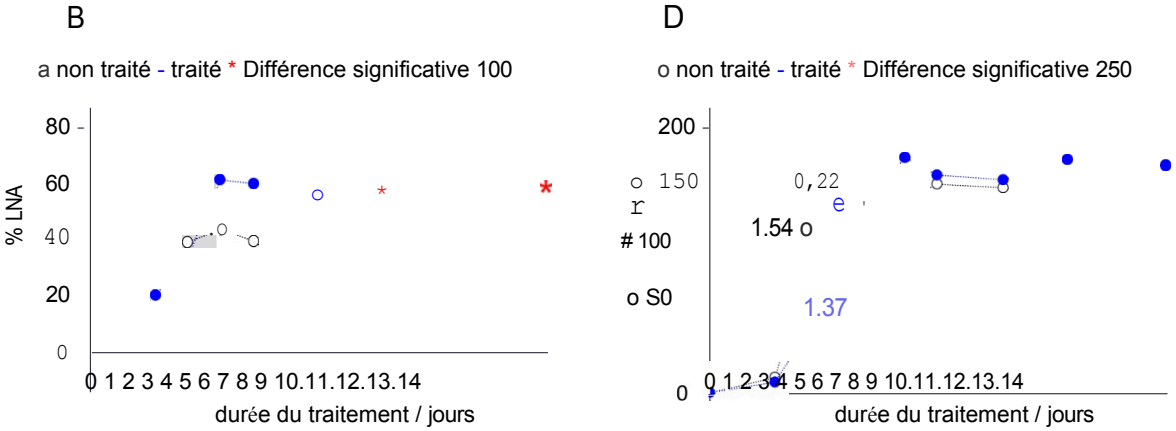
3.4. üseî'ùo//îoîtos aemginos" i/ï *autoclavi°d* r "ç +v "rer

Pour étudier l'effet du traitement magnétique sur le comportement d'une seule espèce bactérienne dans l'eau du robinet, *Psettdoiiioiias* oeritgiiioso a été introduit dans de l'eau du robinet aiitoclavée et l'évolution du ntlnibre cellulaire a été observée pendant 28 jours. Un effet inhibiteur du traitement magnétique a été observé tout au long du processus de croissance, mais des différences significatives n'ont pu être observées qu'au cours des 28 jours.



	Y_0	µmax	K_s
traité	0.013	2.98	419
non traité	0.045	3.13	261

	Y#	pmax	K,
traité	0.001	3.59	226
non traité	0.001	4.26	88



	Y,	pmax	K_s
traité	o.s4	1.6	199
non traité	4.90	1.1	185

Fig. 3. (A) Médiane de la concentration cellulaire totale et (B) % de cellules à ADNL dans les échantillons d'eau du robinet prélevés pendant 14 jours d'incibiation dans la condition (noire) et dans la condition traitée par WCM (bleue) dans le dispositif de glissement (ri = 2 x 24). Les différences significatives (basées sur les tests U de Mann Wifi tney) sont indiquées par des stan s rouges.
(C) Concentration cellulaire d'ARNL et (D) concentration cellulaire d'ARNH à chaque point dans le temps, calculée à partir de l a concentration cellulaire totale réelle et du % d'ARNL réel. Les ntinibei s dans (C) et (D) indiquent les gi owth i ates spécifiques au troisième jour et au quatrième jour (mis en évidence par la lumière véi tique) dans les deux conditions, ligaturée (bleu) et conti oI (noir), iespectivement. La croissance cellulaire représentée par la médiane de l a concentration cellulaire de HNA et de LNA a été ajustée à un modèle logistique (1 i ui S.') et les pai an tes (abondance initiale, Y ; niaxiiii fini gr ow fii i ate, piiiax ; cai iying capaci iy, Ks) ont été montrées dans le tableau. Seules les valeurs parametei qui peuvent représenter de manière significative l'ajustement du comportement de croissance (p < 0,0°') ont été indiquées en gras. Les diagrammes en boîte montrant l'éventail des valeurs sont illustrés à la figure ii' S Z. Pour l'inter pretaÎon des i efei ences à colorer dans la légende de cette figiii e, l'ieadei est iefeii ed à la ver sion Web de cet article).

La réduction de la capacité de charge des eaux du robinet pour Psendoitioiiris neruginosa n'a pas été observée à la phase stationnaire (jour 9-21) (1'i . fl), ce qui suggère des niches écologiques et des comportements différents (1 . '). En d'autres termes, la réduction de la capacité de charge de l'eau du robinet pour *Psendoitioiiris neruginosa* différents comportements des microbes HNA et LNA à différents niveaux desubstrataprès le traitement.

4. Discussion

4.1. r/K fraitiework and cytoinetric fiiigeryriit

Le comportement des

correspondassez bien au modèle stratège r7K, qui stipule que K
les stratèges présentent des taux de croissance plus élevés à des concentrations de substrat plus faibles
et les stratèges présentent des taux de croissance plus élevés à des concentrations de substrat plus élevées (Fai'ei2021 ; £4e ze ct al., 29 7). En détail, dans des conditions limitant les nutriments (rip statique), les taux de croissance des microbes LNA étaient similaires à ceux des HNA et la capacité de charge (Ks) des HNA était plus élevée que celle des HNA.
microbes HNA et LNA dans l'eau du robinet a été fortement influencé

par le fait
plus élevés que c e u x pour HNA
LNA est deux fois plus élevé que celui de HNA.

que les échantillons d'eau siip pour LNA étaient environ deux fois
. Mais dans le set tip où il y a plus de nutriments et d'oxygène, le taux de

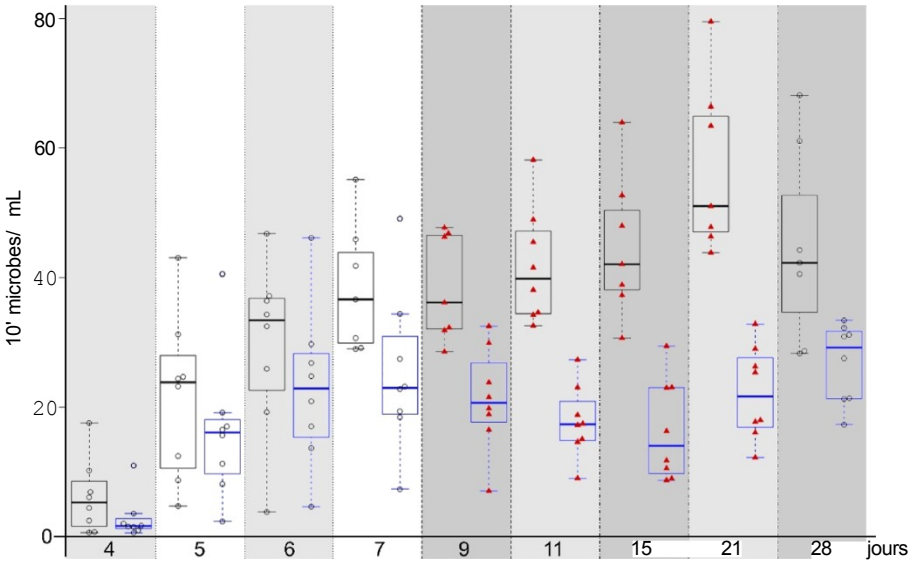


Fig. 4. Numération cellulaire de l'eau du robinet traitée par autoclave et enrichie de *Pseudoitioiias aerugitiosa* (slinking set-tip). Les données du traitement WCM (bleu) et du contrôle (noir) sont données du jour 4 au jour
28. Les différences significatives basées sur la coi'rection de Bonfei'i'oni-Holrn pour les comparaisons multiples sont indiquées par des triangles rouges. (Pour l'inteipi'etation des refe'ences de couleur'
dans cette légende, le lecteur est iefei red à la vei sion Web de cet ai'ticle).

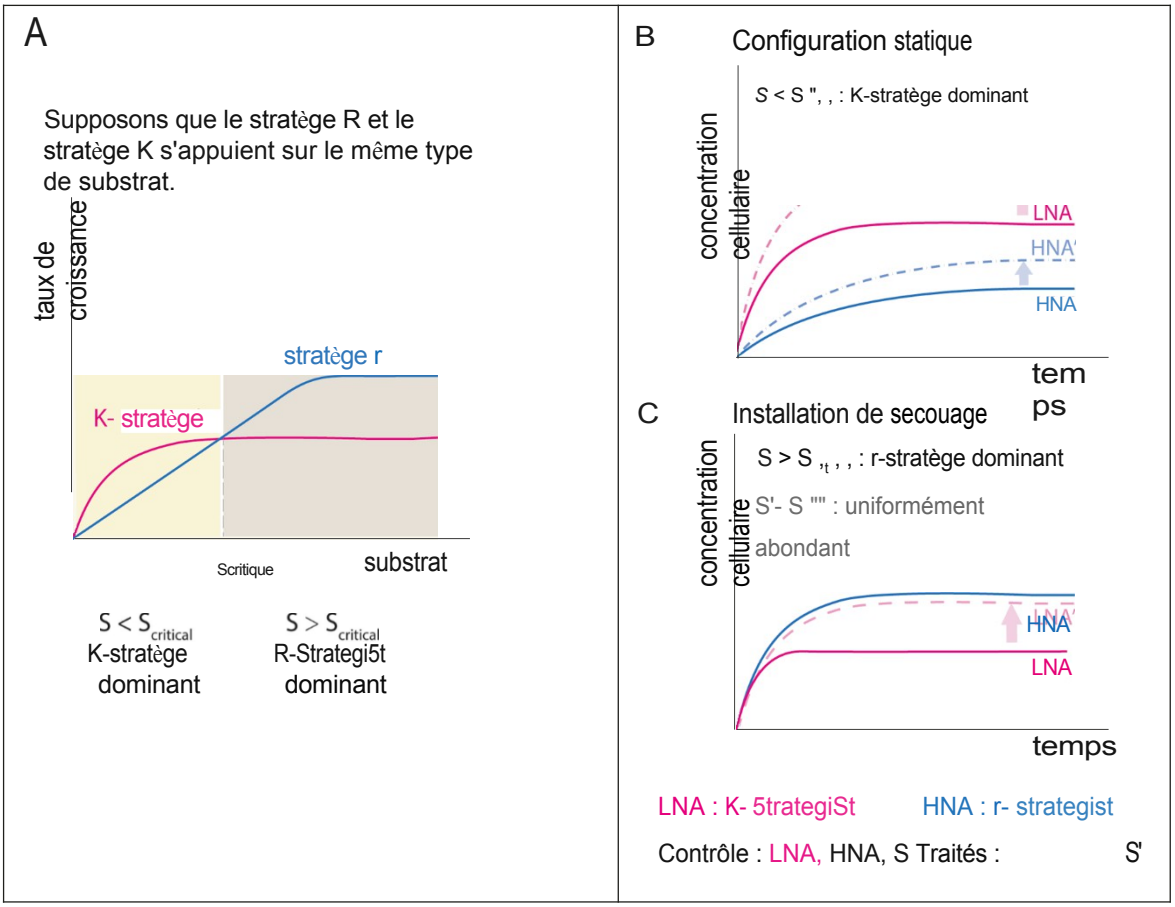


Fig. S. Cinétique de croissance des K-sti'ategistes et des r-stratèges à différentes concentrations de substrat. A) L'évolution du taux de croissance du K-sti'ategist et du r-strategist à différentes concentions de siibstiate. Lorsque la concentration en siibstiate S est inférieure à la concentration critique Scriticai, les K-sti'atégistes présentent des taux de croissance élevés. Lorsque la concentration en substrat S est supérieure à la concentration critique Striticalj, les I -stiatégistes ont des taux de croissance plus élevés. B) Dynamique de la croissance dans une configuration statique : en raison de la limitation de l'intensité, les stratèges K (LNA) constituent le groupe dominant. Le lien WCM augmente la croissance des LNA et des HNA. C) La dynamique de croissance dans un set-tip agité : en raison d'une meilleure disponibilité des nutriments avec le mélange, les stratèges I (HNA) sont le groupe dominant. Le traitement au WCM n'augmente que la croissance des LNA mais pas celle des HNA, car les HNA et les LNA sont également abondants après le traitement.

est devenue disponible, la capacité de charge (Ks) de la LNA dans le groupe de contrôle était approximativement la moitié de celle de la HNA (F2B et .3B).

Le cadre conceptuel des stratèges r/K a été appliqué à divers processus microbiens allant de la dégradation des hydrocarbures (l3rzr sz' z
' i a1. ?O16'), de la nitrification (N'iii ka i-i at., ?I4 I .) à la niéthanogenèse (I ' ilJk1 in ' i a1., ?f)tJt' ; I0i- Vi ii-z r- '- i ul. , if) I ?). Cependant, les études précédentes sont le plus souvent basées sur des espèces ou des genres spécifiques pour un certain processus fonctionnel. Dans leur analyse documentaire approfondie, I a i r i' ' i ul. (?O?1) ont étendu l e concept aux écosystèmes d'eau potable et ont proposé que les communautés microbiennes de l'eau potable puissent également être classées comme des stratèges r ou des stratèges K. À notre connaissance, notre étude est la première étude expérimentale qui soutient l'applicabilité de ce concept aux communautés microbiennes de l'eau potable et montre en outre qu'en appliquant la méthode de cytométrie de flux, les stratèges r/K sont à la fois mesurables et gérables. En outre, Favere et aI. suggèrent également qu'une limitation des nutriments devrait enrichir les stratèges K non pathogènes à croissance lente et donc maintenir l' eau potable dans un état biostable, car les stratèges K enrichis peuvent occuper exclusivement la majeure partie de la niche environnementale qui aurait autrement été occupée par les stratèges r, qui sont souvent des pathogènes ou des organismes indicateurs (l i i "i ct a t , 2.41S; 2011 ; R ttla 29.9 ;). Ce scénario conceptuel est également vérifié expérimentalement dans notre étude, car le LNA a dominé l 'environnement à faible teneur en nutriments, laissant le HNA à une très faible concentration cellulaire. En outre, même si une croissance cellulaire a été observée dans l'eau du robinet pour la pointe statique et la pointe agitée, les concentrations cellulaires totales finales dans la pointe statique étaient beaucoup plus faibles que celles de la pointe agitée dominée par le HNA.

4.2. *Effi°ct des champs iiiapie.tiques* sur le biosr "bili/-y

Il est intéressant de noter que l'effet du champ magnétique par le traitement WCM a agi différemment sur les microbes LNA et HNA dans l'eau du robinet dans des conditions différentes. Dans l'essai statique, le taux de croissance maximal a été légèrement augmenté pour LNA et HNA après le traitement. En fait, l'influence du champ magnétique sur la capacité de charge de l'eau était encore plus frappante, puisque la capacité de charge de LNA était améliorée d'environ 22 %, tandis que celle de HNA était augmentée d'environ 50 %. En revanche, l'effet positif des champs magnétiques n'a été observé que sur les LNA dans le cadre de l'agitation. En fait, l'effet était si prononcé que la communauté dans l'eau du robinet est passée d'un srrilcriire à dominance HNA à un stricture à abondance égale de LNA et HNA après le traitement (1 si. '1B). Comme aucun effet évident des champs magnétiques sur HNA n'a pu être observé lors de l'élévation de la configuration d'agitation (1 'JD), il semble que l'effet favorable sur HNA dans la configuration statique (1 ig. .JD) dépende de la disponibilité des nutriments dans le système. Il est également possible que les cellules LNA aient été favorisées par le champ magnétique à tel point que la niche environnementale laissée à HNA est devenue très limitée. D'autre part, l'effet inhibiteur observé sur un représentant HNA, *Psendoii ioiins aerugiiiosn* (1st ct 'i i a1., 2.41S), suggère un effet inhibiteur potentiel des champs magnétiques sur les microbes HNA dans des conditions riches en nutriments.

À la lumière de la théorie du stratège r/K, l'effet sélectif proniotif sur le LNA dans des conditions riches en nutriments peut être très bénéfique pour maintenir la biostabilité de l'eau potable. Différentes études ont mis en évidence une forte corrélation entre le HNA et le nombre de plaques hétérotrophes (HPC) ou la production de bactéries hétérotrophes (I a i i i ' ns' li1ap' r ' i al....
? UI14 ; l1iJI'l"u s r i at., ? UI'4), qui ont illustré la corrélation entre les HNA et les pathogènes ou les organismes indicateurs. D'un point de vue prudent, on ne sait toujours pas si les LNA contiennent des agents pathogènes en raison des connaissances limitées sur la taxonomie des LNA (I "i r' ir'i ' i al., ROIS ; l1iil'l" iis ' i al....
? UI Z). Le nombre limité d'études portant sur l'identification taxonomique des LNA a cependant montré que les LNA sont principalement associés à des bactéries oligo- trophiques et inciviles (N' ls"n u url i' ¿t n, I !' ; 11 is ' i at...,
I /, **I** 'ij.

Afin de déterminer si la population LNA se compose de cellules HNA plus petites en cas de pénurie de nutriments, nous avons réexaminé les données de séquençage de la communauté provenant d'une étude précédente qui utilisait le même système de séquençage de l'ADN.

traitement magnétique de l'eau stagnante du robinet comme consigne statique (Pa tl F al., 2021). Cette analyse montre une augmentation de la diversité et de l'indice de régularité après le traitement magnétique (I'i iiir- SS). En outre, les Les données de l'étude suggèrent que la plupart des espèces bactériennes se développant sous l'influence du champ magnétique étaient inconnues (I i¿i ir' S8). Ces deux observations confirment notre hypothèse selon laquelle les espèces LNA appartiennent à un groupe bactérien différent de la population HNA et que la croissance de ce groupe est favorisée de manière sélective par le traitement magnétique.

En résumé, cette épidémie a illustré le potentiel du traitement magnétique à fournir une méthode alternative durable pour la gestion des cornnjilnités microbiennes en plus d'autres méthodes courantes telles que l e pH, la température, le régime hydrologique ou les désinfectants (14"iii' rt l" i at., I II ; l-r' s i i n I t'a). À notre connaissance, il s'agit de la première étude à utiliser la cytométrie de flux pour illustrer l'effet des champs magnétiques sur la consommation d'eau potable. les coiiiiiiiinités microbiennes de l'eau.

4.3. La méconnaissance à l'origine de l'effet sélectif

La catégorisation des microbes HNA et LNA était basée sur l' intensité de la fluorescence détectée par les mesures cytométriques en flux, qui en théorie devrait refléter le contenu en acide nucléique des cellules microbiennes. La relation spécifique entre la teneur en acide nucléique et la susceptibilité aux champs magnétiques ne semble pas évidente. Quelques indices insaisissables pourraient être trouvés dans une étude antérieure sur la différence fonctionnelle entre les cellules HNA et LNA (Ramse ci at., 11 ; Lift t 2 41 7). t at. 11) ont rapporté que les cellules LNA dans l'eau potable sont beaucoup moins sensibles aux stress oxydatifs créés par les désinfectants (par exemple le chlore) que les cellules HNA, probablement en raison des différentes propriétés méningées des cellules HNA. I iii ' i ul. Z) a rapporté que les cellules LNA sont corrélées avec la concentration en métaux, alors que les cellules HNA ne le sont pas. La différence entre les structures membranaires et l'interaction avec les métaux traces pourrait être liée à la sélectivité de l 'influence magnétique.

Étant donné que l'effet du champ magnétique était plus prononcé lorsqu'on examinait la capacité de charge plutôt que les taux de croissance, et que l'une des caractéristiques les plus importantes des stratèges K est leur forte affinité pour les éléments nutritifs, on peut raisonnablement supposer que l'influence majeure des champs magnétiques sur les LNA est liée à une modification de l'affinité pour les éléments nutritifs. Diverses études antérieures ont abordé principalement deux types de mécanismes des effets induits par les champs magnétiques : 1) les effets directs sur les processus biologiques et 2) les effets indirects sur les processus biologiques par le biais de modifications de la chimie de l'eau (t.ct \', EU 1 fi ; Ht'i EU 1 fi ; Li1'off, 1 '9 .').

Deux mécanismes possibles ayant un effet direct sur les processus biologiques sont le mécanisme des paires de radicaux (Si ii i am6 U li li, l '4s'4) et la résonance cyclotronique ionique (Li1'off, l "48!'), qui ont tous deux été examinés dans nos travaux précédents (l aiili ls' li 1lis i a l., US I). Le mécanisme des paires de radicaux stipule que le gradient de champs magnétiques faibles (par exemple, le champ magnétique terrestre) peut affecter l e comportement synchronisé qiiantiim d e s paires de radicaux interriiediate générées au cours des réactions d'oxydoréduction et, par conséquent, affecter la cascade biochimique. Plus précisément, les champs magnétiques peuvent faire basculer les spins électroniques de la paire de radicaux de l'état simple à l'état triplet de manière irréversible, affectant ainsi les étapes en aval de la cascade biochimique. Ce mécanisme a été largement étudié dans le centre de réaction des bactéries photosynthétiques ainsi que pour la synthèse de l'ATP dans les bactéries (Pe t al., 2 ; Hot e, 1.2 ; Liti ? HU!'). Les études sur la synthèse de l'ATP montrent que la version irréversible du spin peut pousser une réaction d'oxydoréduction initialement réversible vers la direction oxydative, ce qui conduit à u n e production accrue d'ATP (lh i Isa r lii-i km r-i a 1., ? Inf).).

L'autre mécanisme souvent évoqué est celui de la résonance cyclotronique ionique, qui repose sur l'influence de la force de Lorentz sur les particules chargées en mouvement (t" 1rlsu ' r ili' i ul. , I'J'4'J ; I t rl ' ', l'J'4 I ; 1'JS!'). Par exemple, une étude réalisée par 1 'I8.') a montré q u e même les particules de l'intensité du champ géomagnétique pourrait être suffisante pour accélérer le flux de Ca'" dans les canaux transniernbranaires en forme d'hélice dans les cellules bactériennes ou humaines.

Parallèlement, les effets des champs magnétiques sur la chimie de l'eau,

en particulier les processus de cristallisation du carbonate de calcium, ont été décrits encore plus souvent que les effets biologiques directs (Li a Itsal.. 29 ü ; 13a kr-i a n rl Ii ml rl, 1')')(' ; It iir-z a lJd I-r'li u r, l)IN!'). Un mécanisme récemment discuté est basé sur une théorie de nucléation non classique selon laquelle des amas de prénitrification de carbonate de calcium (DOLLOPs) existent dans des conditions rirées iindersat telles que l'eau potable en plus des ions libres (l3' i\' rn i iz r-i u1. , PI)l P, *1.1'* nlir l"-l is *'i* al Pf)J 1, *ii* Isa i ii-i u nr l rel fr-1J ? III I). Par conséquent, la conversion de spin induite par les champs magnétiques sur la surface de ces amas de prénicules peut affecter leur taille et leur quantité (t.'it y, IN ; San iit i i al. I I'). Les bactéries de l'eau potable ont été signalées comme interagissant de manière intensive avec le calcium et peuvent même participer aux processus de précipitation du carbonate de calcium (1 io t i n1., tJ> I). A son tour, l'interaction entre le calcium et les cellules bactériennes peut également être affectée

Une étude taxonomique sur les microbes LNA a indiqué un mode de vie symbiotique des LNA en raison de leur petit génome et d'un manque de gènes riches en FAD synthase (nécessaire pour les activités d'oxydoréduction nucléaire) ou en particules de reconnaissance de signaux (.N ' lets i et Sii , EU l .' ; 11nlis ' i a1., I /, l '9). D'autres études ont suggéré des propriétés membranaires distinctes entre LNA et HNA et l a dépendance des concentrations minérales dans l'eau par rapport à LNA (Li rl e t201 .7 ; a1., 1). En reliant ces éléments d'information épars, nous supposons qu'une combinaison d'influences directes et indirectes qui modifient l'interaction entre les cellules microbiennes et les ions induits par un champ magnétique est responsable de l'effet sélectif sur les cellules LNA. D'autres études seront nécessaires pour une compréhension approfondie.

S. Conclusions

La cytométrie en flux est une méthode robuste pour différencier les groupes microbiens fonctionnels sur la base de la teneur en acides nucléiques via les intensités de fluorescence dans l'eau potable. Les groupes microbiens HNA/LNA présentent des comportements distincts à différentes teneurs en nutriments et l e u r schéma comportemental correspond bien à la prédiction de la théorie de la sélection rZK. Les effets sélectifs de forts gradients dans les champs magnétiques faibles des aimants de noyaux d'eau sur les groupes LNA/HNA de l'eau du robinet ont pu être observés. Ces résultats ont fortement étayé l'hypothèse d'un *effet* biologique direct de ce traitement (I "a i Iiisr li I iir Iis r i al. ? US1) sur l'eau du robinet, à côté des effets physico-chimiques établis (Sa i ni r i i at ., ?I4 I I'). Les effets du champ magnétique appliqué semblent être bénéfiques pour le maintien de la biostabilité de l'eau potable et présentent un grand potentiel en tant qu'outil alternatif pour la gestion microbienne des chaînes d'approvisionnement en eau potable, par exemple.

Contribution de l'auteur

Xiaoxia Lin et Bernhard Pollner ont contribué à parts égales à l'étude préparée. Bernhard Pollner et Xiaoxia Liu ont planifié et réalisé les expériences. Bernhard Pollner, Nigel P. Dyer, Elrnar C. Ftlchs et Xiaoxia Lin ont analysé les données. Astrid H. Paiilitsch Ftichs a fourni des conseils sur l'analyse des données. Corneliu Lass-Flörl et Willibald Loiskandl ont supervisé le projet. Xiaoxia Liu et Bernhard Pollner ont rédigé le manuscrit en consultation avec Elniar C. Fiichs, Astrid H. Paiilitsch Fiichs et Nigel P. Dyer.

Déclaration d'intérêts concurrents

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas d'intérêts financiers concurrents connus ou de relations personnelles qui auraient pu sembler influencer le travail présenté d a n s cet article.

Acknowledgments

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la coopération du Centre européen d'excellence pour les technologies durables de l'eau de Wetsils (. u ' isos.' ii) dans le thème de la physique appliquée de l'eau. Wetsiis est cofinancé par le ministère néerlandais des affaires économiques et le ministère néerlandais des infrastructures.

Les auteurs remercient Pieter van Veelen et Inez Dinkla pour leurs discussions fructueuses. Les auteurs remercient Pieter van Veelen et Inez Dinkla pour leurs discussions fructueuses. Cette recherche a été financée par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention Marie Sklodowska Ciirie n° 665874.

Annexe A. Données complémentaires

Les données complémentaires à cet ar ticle peuvent être consultées en ligne à l'adresse suivante : l1 iiJoe : 'c1or org/10.1016/j.envres.2022.113638.

Références

Alimi, F., TliIi, M.M., Amor, M. Ben, Maurin, G., Gabrielli, C., 2009. Effet du traitement de l'eau >-8-etic sur la précipitation du carbonate de calcium : influence du matériau de la conduite. Chem. Eng. Process. Process Intensif. 48, 1327-1332. la ccps: j . c 008.

II. J.. E i g. aswei . D J. . i o ti plci pla o nut b i Ïaa c i s th e i t s i° t n i f i c a n c e in t ? Ïn t. J. Fo J\Ïi bi 1. 2G5 27 d .

Baker, J.S., Judd, S.J., 1996. Magneiic ameIioraiion of scale formation. water Res. 30 (2), 24Z-260. 1it p : i . 0.

B I\I. D.. e iss bi c . D. K rato i1. B E.. Sigi ist. J..ù... II. S . Ham rn . F.. 4. fe b oł a utom a nli ne ld c in situ rn nitoi nï icr bial d} nand i in sq ua s rns. Fr n t . Ï\ Ïicr bio1. 265.

Bewerni tz, M.A., Gebauer, D-, '°*8. , Colfen, H., Gower, L.B., 201.2. A meias table liquid precursor phase of calcium carbonate and its interactions with polyaspartate. Faraday Dis. 169, 291-312. It tt ps : doi.or 1 .0.1.0.3. .

Brzeszcz, J., SheIiga, T., Kapusta, P., Turkiewicz, A., Kaszycki, P., 20.16. r-s trategis t versus K-strategist for the applicati on in bioreme diation of hydrocarbon-contaminated soils. Int. Biodeierior. Biodegrad. 106, 41-fl2. la ctps :, i. i 1. 1 6 j. 5. 0.0.1.

Bucha chenko, A.L., Eouznetsov, D.A., OrIova, M.A., Markarian, A.A., 2006. Magnetic isotope effect of magnesium in phosphoglycerate kinase phosphorylati on. Proc. Nai1. Acad. Sci. U.S.A. 102, 10793-10Z96. la ctps: i. 1. 7 p . 2.

Bucha chenko, A.L., Eouznetsov, D.A., Breslavskaya, N.N., 0 rIova, M.A., 2008. Effets des isotopes du magnésium dans la phosphorylation enzymatique. J. Phys. Chem. B 1.12, 2548-2556. h Ottos :, ô T 02 T Ìp 7 T ü.

Chan, S., Pullerits, E., Riechelmann, J., Persson, K.M., Rådsiröm, P., Pau1, C.I., 2018. Monitoring biofilm function in new and matured full-scale slow sand filters using flow cytometric histogram image comparison (CHIC). Water Res. 138, 27-36. litcp s : i. g, 1. a ct es. 3.0.3.2.

Coey, J. M.D., 201.2. Traitement de l'eau par magnétisme - comment cela pourrait-il fonctionner ? Philos. Mag. A 92, 3867-386fl. h ctps :, d0 0 1 4Z82 . 8o G.

Conklin, A., Stense I, H.D., Ferguson, J., 2006. Growth kinetics and compe tition between methanosarcina and me thanosaeta in mesophilic anaerobic d*8estion. Water Environ. Res. 78, 486-496. pi. g, 2 93.

De Vrieze, J., Hennebel, T., Boon, N., Versiraete, W., 2012. Methanosarcina : the rediscovered methanogen for heavy duty biomethanation. Bioresour. Technol. 1.12, 1-9. h ccps: 1. 1 j . .2.079.

De Vrieze, J., Christiaens, M.E. R., Verstraete, W., 201.7. Le microbiome comme outil d'ingénierie : fabrication et échange entre micro-organismes. N. Bioiech. 39, 206-214. IIttQ 1'' Ï. Ø, 1. . nb t. 2.0.1.7. 0Z. 1.

Demiche Iis, R., Rai teri, P., Gale, J.D., Q uigley, D., Gebauer, D., 2011. Stable prenucleation mineral clus ters are liquid-like ionic polymers. Nat. Commun. 2, S90-698. h , d 8 nc .

Douierelo, I., Sharpe, R., Boxall, J., 2013. Influence de l'hydtául ic re8*>fld sur le bacierial. La structure et la composition de la composition dans un système expérimental de distribution d'eau potable. Water Res. 4.7, S03-616. h ctps : 1.0 J. ATS ES. 1.2. o3.

ElÏis. B.. Ha ma nd. P , Ha hne. F.. Ï\ Ïeui , N.. ma ki ishna n. N., Spi n , J.. úia n ÌÏ . r : Ba s S ct u ur\v c en- Da ca. v s i J . 4G 1. **Package**.

Favere, J., Barbosa, R.G., Sleu tels, T., Uerstraete, W., De G usseme, B., Boon, N., 202J . Sauvegarder la qualité de l'eau rnicrobia1 de la source au robinet. NPI Clean Water 4, I -6. h 18-1.

Finak. Jiang. J\(, . ld \\N rksp I ras ct u ui R pr nti n Ïn c a n i eta the ate c ci -. i ct si n 2S. I . R Pa ka ge.

Fojt, L., Strasak, L., Vetterl, V., Smarda, J., 2004. Corn par ison of the low-fre quency magnetic field effects on bacteria Escheri chia coli, Leclercia adecarboxylata and Staphylocoecus aureus. In : Bioelectrochemistry, pp. 337-84 J. 1st , g, 1.01. j. rn. .I J. 0 .

Gabrie Ili, C., Jaouhari, R., Maurin, G., Keddam, M., 2001. Magne tie water treairnent for scale prevention. Water Res. 86, 3249-32b9. la tt ps : doi.or 1.0.1 S I) 1. -0.

Geba uer, D., Cölfen, H., 20.1 J. Clusters de prénucléation et nucléation non classique. Nano Today 6, S64-684. h ctps : 01 j.nant 0.0 o.

Goldsworthy, A., Whitney, H., Morris, E., 1999. Biological effects of physically conditioned water. Water Res. 33, 1618-1626. la ctps , i. i 1. 1 -9.

Hammes, F., Egli, **T., 2010.** Méthodes cytométriques pour mesurer les bactéries dans l'eau : avantages, pièges et applications. Arial. Bioanal. Chem. 397, 1083-1095. https://doi.org/10.1007/s00216-010-3646-3.

Hore, P.J., 2012. Les réactions biochimiques sont-elles affectées par des champs magnétiques faibles ? Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 109, 1357-1358. https://doi.org/10.1073/pnas.1120531109.

Kargi, F., **2009.** Réinterprétation de l'équation logistique pour la croissance microbienne discontinue en relation avec la cinétique de Monod. Lett. Appl. Microbiol. 48, 398-401. https://doi. org/ 10.1111/J.1472-765X. 2008.02537.

Knez, S., Pohar, C., **2005.** The magnetic field influence on the polymorph composition of CaCO 3 precipitated from carbonized aqueous solutions. J. Colloid Interface Sci. 281, 377-388. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.099.

Lautenschlager, K., Boon, N., Wang, Y., Egli, T., Hammes, F., 2010. Overnight stagnation of drinking water in household taps induces microbial growth and changes in community composition. Water Res. 44 (17), 4868-4877. https://doi. org/10.1016/ j.watres. 2010.07.032.

Lednev, V.V., 1991. Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems (Mécanisme possible de l'influence des champs magnétiques faibles sur les systèmes biologiques). Bioelectromagnetics 12, 71-75. https://doi. org/10.1002/ bern. 2250120202.

Liboff, A.R., 1985. Geomagnetic cyclotron resonance in living cells. J. Biol. Phys. 13, 99-102. https://doi.org/10.1007/BF01878387.

Lipus, L.C., Hamler, A., Ban, I., Acko, B., 2015. Permanent magneM for water-scale prevention. Adv. Prod. Enq. Manag. 10, 209-216. https://doi. org/10.14743/ apem2015.4. 203.

Liu, Y., Edge, R., Henbest, K., Timmel, C.R., Hore, P.J., Gast, P., 2005. Magnetic field effect on singlet oxygen production in a biochemical system (Effet du champ magnétique sur la production d'oxygène singulet dans un système biochimique). Chem. Commun. 2, 174-176. https://doi.org/10.1039/B413489C.

Liu, J., Zhao, Z., Chen, C., Cao, P., Wang, Y., 2017. Caractéristiques in situ des bactéries LNA et HNA dans les embranchements des réseaux de distribution d'eau potable. J. Water Supply Res. Technol. - Aqua 66, 300-307. https://doi.org/10.2166/aqua.2017.108.

Liu, X., Zarfel, G., van der Weijden, R., Loiskandl, W., Bitschnau, B., Dinkla, I.J.T., Fuchs, E.C., Paulitsch-Fuchs, A.H., 2021. Density-dependent microbial calcium carbonate precipitation by drinking water bacteria via amino acid metabolism and biosorption. Water Res. 202, 117444 https://doi.org/10.1016/j. watres.2021.117444.

Nelson, W.C., Stegen, J.C., 2015. Les génomes réduits de Parcubacteria (ODI) contiennent des signatures d'un mode de vie symbiotique. Front. Microbiol. 6, 1-14. https://doi.org/ 10.3389/fmicb.2015.00713.

Nowka, B., Daims, H., Spieck, E., 2015. Comparaison de la cinétique d'oxydation des bactéries oxydant le nitrite : la disponibilité du nitrite comme facteur clé de la différenciation des niches. Appl. Environ. Microbiol. 81, 745-753. https://doi.org/10.1128/AEM.02734-14.

Paulitsch-Fuchs, A.H., Stanulewicz, N., Dyer, N., Fuchs, E.C., 2021. Strong gradients in weak magnetic fields affect the long-term biological activity of tap water. Water 12, 28-4S. https://doi.o r g / 1 0 . 1 4 2 9 4 ATER. 2020.5.

Pinto, A.J., Xi, C., Raskin, L., 2012. Bacterial community structure in the drinking water microbiome is governed by filiation processes. Environ. Sci. Technol. 46 (16), 8851-8859.

Pollner, B., Kovacs, Z., 2016. aquap2 : Multivariate Data Analysis Tools for R Including Aquaphotomics Methods. Version 0.3.0, R-Package. In : Kobe, Japon : Aquaphotomics : Understanding Water in Biology - 2nd International Symposium.

Prest, E.I., Hammes, F., Kötzsch, S., van Loosdrecht, M.C.M., Vrouwenvelder, J.S., **2013.** Monitoring microbiological changes in drinking water systems using a fast and reproducible flow cytometric method. Water Res. 47, 7131-7142. https://doi.org/ 10.1016/j.waWes.2013.07.051.

Prest, E.I., Weissbrodt, D.G., Hammes, F., van Loosdrecht, M.C.M., Vrouwenvelder, J.S., 2016. Dynamique bactérienne à long terme dans un drinking water distribution system. PLoS One 11.

Prest, E.I., Hammes, F., van Loosdrecht, M.C.M., Vrouwenvelder, **J.S., 2016a.** Stabilité biologique de l'eau potable : facteurs de contrôle, méthodes et défis. Front. Microbiol. 7, 1-24. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00045.

Proctor, C.R., Hammes, F., **2015.** La microbiologie de l'eau potable - de la mesure à la gestion. Curr. Opin. Biotechnol. 33, 87-94. https://doi. org/10.1016/j. copbio. 2014.12.014.

Proctor, C.R., Besmer, M.D., Langenegger, T., Beck, K., Walser, J.C., Ackermann, M., Bürgmann, H., Hammes, F., 2018. Regroupement phylogénétique de petits acides nucléiques de faible poids. dans divers écosystèmes d'eau douce. ISME J. 12, 1344-1359. https://doi.org/10.1038/s41396-018-0070-8.

Props, R., Rubbens, P., Besmer, M., Buysschaert, B., Sigrist, J., Weilenmann, H., et al, 2018. Détection des perturbations microbiennes dans une communauté microbienne d'eau potable par l'acquisition continue et l'analyse avancée des données de cytométrie en flux. Water Res. 145. 73-82.

Quinn, C.J., Molden, T.C., Sanderson, C.H., 1997. Magnetic treatment of water prevetns mineral build-up. Iron Steel Eng. 47-53.

R Core Team, 2017. R : un langage et un environnement pour le calcul statistique. R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche. Consulté à l'adresse suivante : https:// www.R-project.org/.

Ramseier, M.K., von Gunten, U., Freihofer, P., Hammes, F., 2011. Kinetics of membrane damage to high and low nucleic acid bacterial clusters in drinking water by ozone, chlorine, chlorine dioxide, monochloramine, ferrate-VI, and permanganate. Water Res. 45, 1490-1500. https://doi. oral 0.1016/j.watres.2010.11.016.

Reasoner, D.J., Geldreich, E.E., 1985. A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water. Appl. Environ. Microbiol. 49, 1-7.

Rubbens, P., Props, R., Boon, N., Waegeman, W., 2017. Identification par cytométrie en flux de cellules uniques de populations dans des communautés bactériennes synthétiques. PLoS One 12, 1-19. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169754.

Rubbens, P., Schmidt, M.L., Props, R., Biddanda, B.A., Boon, N., Waegeman, W., Denef, V.J., 2019. Randomized lasso links microbial taxa with aquatic functional groups inferred from flow cytometry. msystems 4, 1-17. https://doi.org/10.1128/ msystems.00093-19.

Sammer, M., Kamp, C., Paulitsch-Fuchs, A.H., Wexler, A.D., Buisman, C.J.N., Fuchs, E.C., **2016.** Strong gradients in weak magnetic fields induce DOLLOP formation in tap water. Water 8. https://doi.org/10.3390/w8030079.

Segatore, B., Setacci, D., Bennato, F., Cardigno, R., Amicosante, G., Lorio, R., 2012. Evaluations of the effecM of extremely low-frequency electromagnetic fields on growth and antibiotic susceptibility of Escherichia coli and Pseudomonas aeruginosa. Internet J. Microbiol, 587293 https://doi. org/10.1155/2012/587293, **2012.**

Solic, M., Krstulovic, N., Vilibic, I., Bojanic, N., Kuspilic, G., S "estanovic, S., Same, D., Ordulj, M., **2010.** Variability in the bottom-up and top-down controls of bacteria on trophic and temporal scales in the middle Adriatic Sea. Aquat. Microb. Ecol. 58, 15-29. https://doi.org/10.3354/ame01342.

Steiner, U.E., Ulrich, T., 1989. Magnetic field effects in chemical kinetics and related phenomena. Chem. Rev. 89, 51-147.

Strasak, L., Vetterl, V., Smarda, **J., 2002.** EffecM of low-frequency magnetic fields on bacteria Escherichia coli. Bioelectrochemistry 55 (1-2), 161-164. https://doi.org/ 10.1016/S1567-5394(01)00152-9.

Taguer, M., Quillier, O., Maurice, C.F., 2021. Effets de l'exposition à l'oxygène sur le contenu relatif en acides nucléiques et l'intégrité membranaire du microbiote intestinal humain. PeerJ 9. https://doi.org/10.7717/peerj.10602.

Todorov, V., 2016. rrcovHD : Robust Multivariate Methods for High Dimensional Data, version 0.2-5, R-package. Consulté à l'adresse suivante : https://CRAN.R-project.org/package=rrc ovHD.

Van Nevel, S., De Roy, K., Boon, N., 2013. Le potentiel d'invasion bactérienne dans l'eau est déterminé par la disponibilité des nutriments et l a communauté indigène. FEMS Microbiol. Ecol. 85, **S93-603.** https://doi. org/10.1111/1574-6941.12145.

Van Nevel, S., Buysschaert, B., De Gusseme, B., Boon, N., 2016. Examen par cytométrie en flux de la croissance bactérienne dans un réseau local d'eau potable. Water Environ. J. 30 (1-2), 167-176.

Van Nevel, S., Koetzsch, S., Proctor, C.R., Besmer, M.D., Prest, E.I., Vrouwenvelder, J.S., et al, 2017. Flow cyomeWic bacterial cell counM challenge conventional heteroWophic plate counts for routine microbiological drinking water monitoring. Water Res. 113, 191-206.

Vermeiren, T., 1958. Traitement magnétique des liquides pour la prévention du tartre et de la corrosion. Corr. Techn. S, 215-219.

Wang, Y., Hammes, F., De Roy, K., Verstraete, W., Boon, N., 2010. Past, present and future applications of flow cytometry in aquatic microbiology. Trends Biotechnol. 28, 416-424.