

REPORT

Contract: WELLMA-1

Cicerostr. 24
D-10709 Berlin
Germany
Tel +49 (0)30 536 53 800
Fax +49 (0)30 536 53 888
www.kompetenz-wasser.de

RÉSUMÉ ÉTENDU Projet: WELLMA1

de
Project Team WELLMA
Auteur responsable: Hella Schwarzmüller

Department "Sustainable Use and Conservation of Groundwater Resources"
KompetenzZentrum Wasser Berlin, Cicerostraße 24, 10709 Berlin, Germany
Email: hella.schwarzmueller@kompetenz-wasser.de, Tel. ++49 (0)30-536-53814

pour
Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

La préparation de ce rapport a été financé par des fonds apportés par :



Berlin, Germany

2012

Mention légale importante:

Non-responsabilité: l'information mise à disposition dans cette publication a été admise techniquement irréprochable par un consensus de personnes engagées dans le développement et l'approbation du document au moment où il a été élaboré. Le KWB rejette toute responsabilité de tout dommage qu'il soit personnel, matériel ou autre, qu'il soit spécial, indirect, conséquent ou compensatoire, résultant directement ou indirectement de cette publication, de son utilisation ou découlant de la confiance en ce document. Le KWB n'apporte aucune garantie et aucune assurance explicite ou implicite concernant la pertinence et la complétude de ce document. Il est expressément signalé que les informations données dans la publication ainsi que les résultats peuvent, en raison de changements subséquents, ne plus être d'actualité. En outre, le KWB rejette toute responsabilité et n'apporte aucune garantie que les informations contenues dans ce document vous aideront dans la réalisation de vos objectifs particuliers ou répondront à vos besoins. La présente clause de non-responsabilité ne vise ni à restreindre la responsabilité du KWB envers la prescription légale nationale correspondante, ni à l'exclure des cas pour lesquels une exclusion selon cette prescription légale est impossible.

Mentions légales

Titre

Résumé étendu des résultats et des conclusions de la phase préparatoire du projet WELLMA [WELLMA1: Nov. 07 - Dec. 08]

Auteurs

Ingeborg Graeber, Researcher, KWB
Dagmar Orlikowski, Researcher, KWB
Dr. Hella Schwarzmüller, Researcher, KWB

Prof. Asaf Pekdeger, Dep. of Earth Sciences, Section Hydrogeology, Freie Universität Berlin (FUB)

Dr. Thomas Taute, Researcher, FUB
Ulrike Maiwald, Researcher, FUB
Christian Menz, PhD, FUB

Prof. Ulrich Szewzyk, Dep. Environmental Technology, Section Microbial Ecology, Technical University Berlin (TUB)

Oliver Thronicker, PhD, TUB

Dr. Klaasjan Raat, Kiwa Water Research, Dept. Geohydrology

Andreas Wicklein, Pigadi GmbH

Dr. Andreas Bartetzko, Environmental Technology Dr. Bartetko Ltd.

Assurance-Qualité

Dr. Gesche Grützmacher, Dept. leader KWB

Publication/ diffusion approuvées par les membres du comité technique suivants :

Katia Besnard, Veolia Environnement
Marc Alary, Veolia Eau
Andreas Wicklein, Pigadi
Regina Gnirss, BWB, F+E
Elke Wittstock, BWB-WV
Heidi Dlubek, BWB-WV
Yann Moreau-Le Golvan, KWB
Gesche Grützmacher, KWB

Numéro de livrable :

D [WELLMA1 - 2nd TCM]

Remerciements

L'équipe du projet exprime sa gratitude envers *BWB* et *Veolia* pour le soutien financier du projet *WELLMA*.

Nous remercions toutes les personnes impliquées des divisions techniques et des départements de recherche et développement ainsi que le comité technique pour les précieuses discussions et les informations fournies.

Merci!

Table des matières

Chapitre 1 Introduction	1
Chapitre 2 Etat de la technique.....	2
2.1 Vieillessement et gestion de puits (WP1 to WP3)	2
2.2 Contamination microbienne (WP4).....	6
Chapitre 3 Analyse statistique avancée de donnée de puits (D 1.2)	8
3.1 Méthode.....	8
3.2 Conclusions	9
3.3 Analyse descriptive des données sur les puits français	10
Chapitre 4 Comparaison de méthodes et procédures (D 1.3)	11
4.1 Méthodes	11
4.2 Conclusions et évaluation	22
Chapitre 5 Premières recherches sur le terrain sur les puits berlinois pour évaluer les impacts de la fréquence de commutation (Option O ₂) et traitements H ₂ O ₂ sur les processus de vieillissement (Option H ₂ O ₂).....	25
5.1 Méthodes	25
5.2 Conclusions et évaluation	29
5.3 Recommandations	30
Chapitre 6 Recommandations pour une gestion de puits améliorée	32
6.1 Surveillance des puits	32
6.2 Exploitation des puits	34
6.3 Construction des puits.....	34
6.4 Transfert de R & D	35

Chapitre 1

Introduction

L'optimisation de la gestion des puits intéresse toutes les décisions relatives à l'exploitation, la surveillance et la maintenance des puits, afin d'assurer une meilleure performance et qualité de l'eau possibles.

Sachant que de nombreux mécanismes interviennent et que leur interaction est complexe et diffère pour chaque puits, il est indispensable de bien comprendre les processus de base et les paramètres clés pour que les connaissances ainsi acquises puissent servir à dresser des lignes directrices et des recommandations.

L'ensemble du projet WELLMA vise l'élaboration de telles lignes directrices pour la compagnie des eaux berlinoise BWB et Veolia dans le but de ralentir les processus de vieillissement et prévenir la détérioration de la qualité.

A ce titre, WELLMA 1 correspond à la phase préparatoire. Cette phase consiste à émettre des recommandations sur les méthodes (y compris de diagnostic, de régénération etc.) à suivre lors de travaux de recherche plus poussés, et à repérer les sites appropriés pour réaliser ultérieurement des recherches sur le terrain à partir de:

- Examen de la littérature pour établir l'état de la technique ;
- Analyses statistiques avancées des données de puits afin de répertorier les indicateurs et paramètres de vieillissement, de décrire les processus et regrouper les puits concernés ;
- Etudes sur le terrain pour comparer les méthodes et outils de diagnostic et de contrôle.

Chapitre 2 Etat de la technique

2.1 Vieillessement et gestion de puits (WP1 to WP3)

La maintenance et rétention de valeur de puits existants revêtent une importance croissante.

2.1.1 Facteurs et processus

Comme les puits sont en interaction avec le milieu naturel des aquifères et des nappes phréatiques, les impacts sur l'équilibre du système eau sol sont fort probables et peuvent aboutir aux processus dits de *vieillessement* physiques, chimiques ou microbiologiques des puits.

La géologie des aquifères exploitées avec la qualité de l'eau puisée, le schéma de puits (dimensions et matériaux), la construction (méthode de forage) et l'exploitation sont les facteurs principaux qui déterminent le type, l'étendue et l'emplacement des dépôts (Fig. 1).

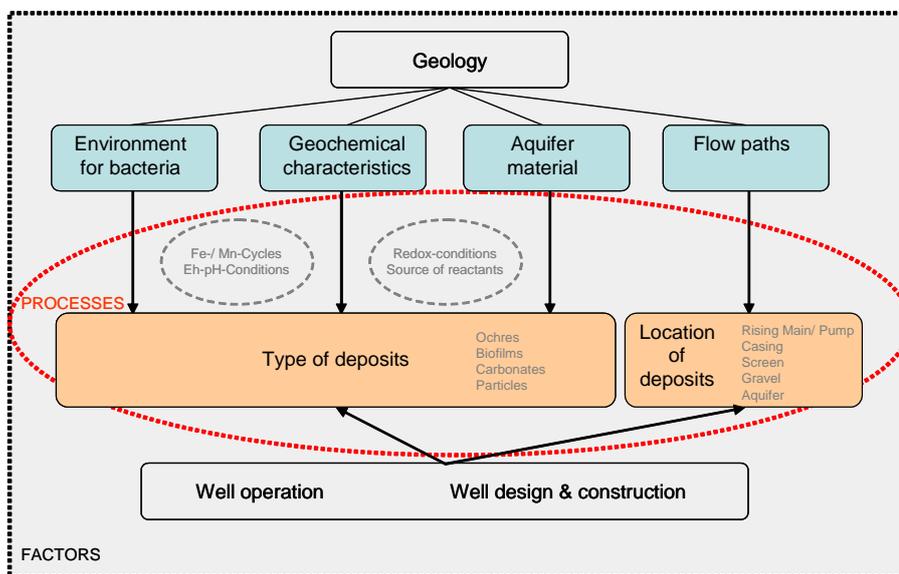


Fig. 1: Interaction entre facteurs et processus donnant des types et étendues de vieillissement variables [KWB 2009]

Géologie

Les processus de vieillissement reflètent le type d'aquifère et ses propriétés hydrologiques car ce sont ces éléments qui déterminent les matières en présence, le milieu poreux et les voies de passage. Ainsi, la géologie est un facteur décisif et la distribution des types de vieillissement suit la distribution des aquifères (voir tableau 2-1 du rapport circonstancié sur l'état de la technique)..

Tant le sol que l'eau contiennent des quantités variables de composés chimiques (fer, calcium etc.) et organiques, ainsi que des particules et des colloïdes. Leur composition et concentration constituent les matières de départ pour toute réaction de précipitation (colmatage chimique), processus de rétention (colmatage physique) et le milieu vivant pour les bactéries (colmatage biologique).

Avec les effets des procédés d'exploitation, ceci peut conduire à l'apparition de processus de colmatage. Ils peuvent être ralentis, mais pas empêchés totalement.

Pour les détails concernant les types de vieillissement et de distribution spatiale des dépôts, voir le chapitre 2 du rapport sur l'état de la technique.

Schémas et construction de puits

Même avec des dimensions (diamètre, longueur de tamis, profondeur de crépines par rapport à l'aquifère et au rabattement de nappe maximal etc.) et un aménagement appropriés, le schéma et la construction de puits présentent des facteurs qui peuvent influencer sur les processus de vieillissement tels que:

- le choix de matériaux et leurs propriétés physico-chimiques et biochimiques superficielles (par ex. sensibilité des tamis en acier à la corrosion, apport en nutriments des tamis PVC et boues de forage)
- la dimension du filtre à gravier artificiel (par ex. granulats trop petits qui collectent des particules ou trop grands qui laissent passer le sable)
- l'aménagement inapproprié du puits après construction (élimination incomplète des boues de forage, gâteau de filtration et matières fines)

Avec les propriétés de l'aquifère, ces facteurs déterminent le type et l'emplacement des dépôts. Outre leur potentiel d'encouragement des processus de vieillissement, le schéma et la construction de puits doivent être pris en compte en tant que source de contraintes dans l'applicabilité des méthodes de régénération. A titre indicatif, les puits en PVC sont moins résistants et, par conséquent, ne peuvent être traités par des méthodes impliquant des forces mécaniques élevées comme le décapage par ondes de choc (shock blasting) or l'injection sous haute pression.

Il semble donc qu'il y ait une marge d'améliorations possibles du schéma et de la construction des puits. Si l'on développe des démarches standardisées, il faudra les soumettre à un examen périodique et apporter des ajustements selon les besoins de contrôle continu, de diagnostic et de maintenance, et au fil des avancées techniques récentes.

Exploitation de puits

Etant donné que les procédés d'exploitation de puits transforment toujours les conditions hydrauliques, ils ont une incidence prononcée sur les propriétés géochimiques. Les facteurs principaux en sont la vitesse d'écoulement croissante, les processus de brassage et l'apport en oxygène éventuel qui provoquent essentiellement un déséquilibre thermodynamique. Pour le colmatage biologique ou le frittage, la hausse de température liée au pompage est également envisagée comme cause possible.

Les paramètres influençables sont

- Le rendement de la pompe et
- Le cycle d'exploitation (continue ou périodique)

En général, grâce au schéma ou aux procédés d'exploitation

- La vitesse d'écoulement devrait être maintenue au niveau le plus faible afin d'éviter les mouvements tourbillonnaires,
- Le niveau d'eau dynamique devrait toujours se situer au-dessus de la crépine pour empêcher l'arrivée d'oxygène, et
- Les changements abrupts comme les commutations de pompe répétées sont à éviter pour réduire les contraintes.

2.1.2 Surveillance et maintenance de puits

GROSSMANN (2000: Régénération des puits d'eau potable – examen de la littérature, *en allemand*) conclut qu'il existe de nombreuses études de cas spécifiques concernant les processus de vieillissement et des mesures de régénération réussies, mais qu'il n'y a pas d'étude suffisamment poussée des processus et mécanismes qui conduisent à une perte de productivité de puits dont les résultats seraient transférables. Grossmann présente comme « questions en suspens » trois aspects fondamentaux qui restent valables à ce jour:

- (1) La documentation, le traitement et l'usage des données d'exploitation sont dans la plupart des cas insuffisants. On obtiendrait plus de résultats rien qu'en analysant les données déjà disponibles.
- (2) Le type et la composition des dépôts doivent faire l'objet de recherches afin de pouvoir choisir et, par la suite, évaluer les stratégies de régénération.
- (3) Une base de référence standardisée (par ex. évaluation Qs de la vitesse et à la durée d'écoulement en amont et en aval de travaux de régénération réalisée dans des conditions constantes) est indispensable afin d'évaluer le succès de toute mesure de maintenance ou de régénération, et de comparer les différentes méthodes et technologies.

Par conséquent, une bonne surveillance et une bonne documentation sont des éléments essentiels de toute gestion de puits qui associe construction, processus de vieillissement, exploitation et maintenance (voir Fig. 2).

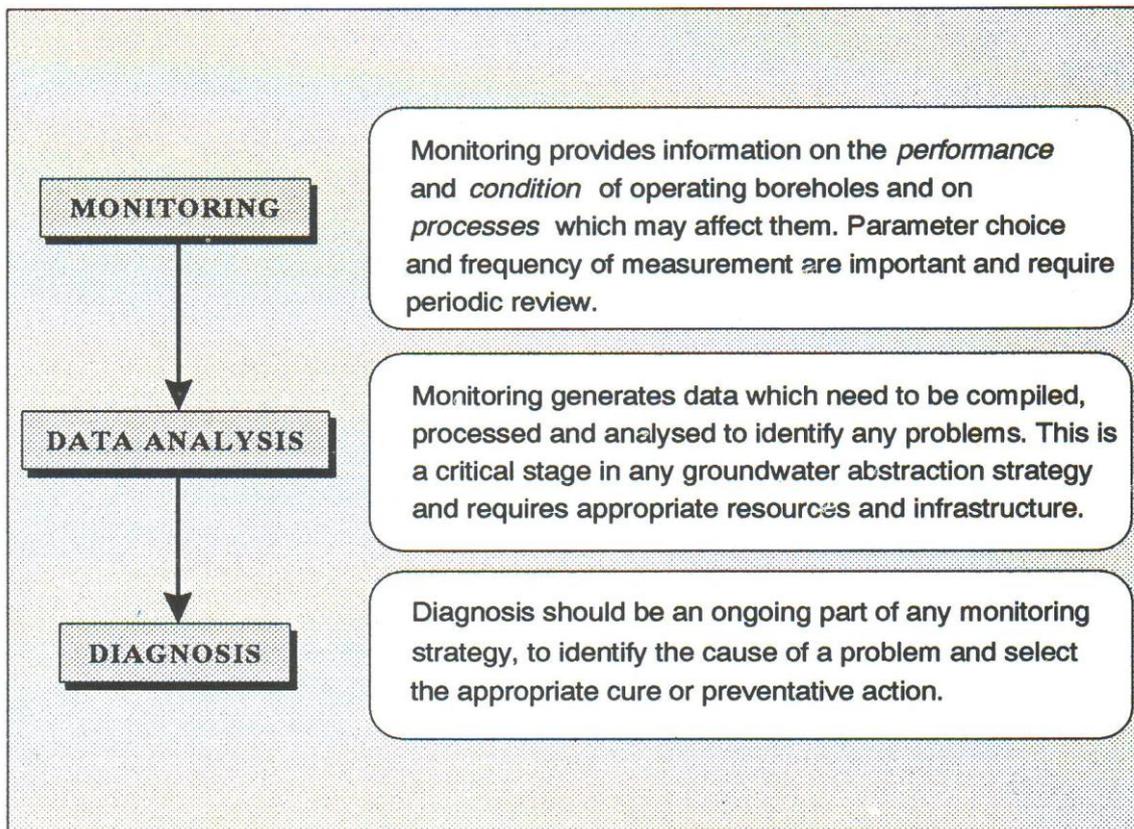


Fig. 2: Résumé graphique de la finalité et du principe même de diagnostic de vieillissement [extrait de HOWSAM, MISSTEAR et al. 1995:85]

La surveillance se partage en deux groupes d'activités

- (1) Saisie continue des données en cours d'exploitation (performance du puits) et
- (2) Mesures discontinues périodiques, ou à chaque fois que le suivi continu révèle une baisse de performance, afin d'obtenir des informations supplémentaires sur les causes et les sites (état et diagnostic de puits)

Les exigences pour les paramètres et les calendriers d'interventions doivent être adaptés aux conditions in situ et aux propriétés du puits en envisageant toujours une combinaison de méthodes. Un tableau récapitulatif de stratégie générale est fourni par HOWSAM (1995: Monitoring, maintenance and regeneration of water supply boreholes, *en anglais*) et il est repris dans le chapitre 3 du rapport circonstancié sur l'état de la technique. Les recommandations pour les puits BWB et Veolia seront présentées aux chapitres 2.3 et 6.1 du présent rapport de synthèse.

Pour ralentir les processus de vieillissement (mesures préventives) ou rétablir la performance du puits après détérioration (régénération), on applique des méthodes de maintenance. Les méthodes de traitement préventif et d'assainissement sont plus ou moins les mêmes. La différence se situe au niveau du moment de l'intervention et du degré d'intensité de l'application.

Pour faire un bon choix de méthodes, il faut tenir compte de:

- (1) la nature du problème,
- (2) l'emplacement et étendue des dépôts, et
- (3) les restrictions et contraintes imposées par l'ouvrage ou son état de construction.

Un vaste éventail de techniques existe. Pour les détails et les descriptions, veuillez consulter les manuels de référence (par ex. HOWSAM, 1995; HOUBEN & TRESKATIS 2007), l'internet (par ex. www.groundwaterscience.com/free-article-library) ou encore le rapport circonstancié (chapitre 4, tableau 4-1, 4-2 et annexe A).

En général, le traitement préventif vise à ralentir les processus microbiologiques et chimiques. C'est pourquoi ces techniques doivent prévenir la croissance bactérienne et le durcissement des incrustations. Les approches les plus répandues sont les méthodes de désinfection employant de puissants oxydants comme l' H_2O_2 (appliqués à Berlin et dans d'autres sites Veolia). Les travaux de régénération, quant à eux, visent à éliminer les dépôts dans tout le puits. Donc, ils doivent pouvoir atteindre tous les filtres à gravier et décrocher (mesures mécaniques) ou dissoudre (traitements chimiques) les dépôts.

Le fondement de tout effort de régénération efficace et durable est:

- (1) la prise en compte des expériences pratiques, d'où le besoin de documenter les interventions de maintenance passées ;
- (2) une mise en œuvre aussi précoce que possible, d'où le besoin de définir le point de déclenchement (paramètre d'exploitation surveillé régulièrement), par ex. 20% de chute de performance (baisse de débit Q_s spécifique comparée à la valeur initiale en fin de construction) ;
- (3) l'élimination de tous les dépôts pour prévenir la re-croissance rapide d'où la nécessité de pompage extensif et de réaménagement de puits.

2.2 Contamination microbienne (WP4)

Partant d'un examen bibliographique des cas existants de contamination microbienne de puits, les cas publiés sont comparés à la situation à Berlin pour permettre une analyse des origines possibles de la contamination microbienne. Ainsi, l'on a approfondi les questions suivantes:

- Identification des bactéries pertinentes
- Évaluation des sources
- Évaluation des voies de cheminement vers le puits
- Paramètres de schéma et/ou d'exploitation de puits qui augmente le risque de contamination
- Techniques et méthodes analytiques à employer pour établir les sources et cheminements

L'on trouve dans le monde entier des publications traitant de la question des microorganismes dans les eaux souterraines. Force est de constater que ce milieu est loin d'être défavorable. Bien au contraire, de nombreuses bactéries se sont adaptées aux conditions spéciales présentes dans le sous-sol.

Les points suivants résument les résultats de cet examen bibliographique:

- La présence microbienne et la composition des communautés microbiennes dans la nappe varient selon les propriétés hétérogènes du sol et de l'aquifère.
- Les déterminants principaux de l'abondance et de l'activité microbienne dans la nappe sont l'apport en nutriments, la disponibilité d'oxygène dissous et de sources d'énergie. Les facteurs environnementaux comme la température, le pH, la pression hydrostatique et les sels dissous influent sur la persistance microbienne.
- Les processus et facteurs qui influencent la qualité de la nappe sont nécessairement pertinents pour l'eau de puits. Les puits constituent en outre un habitat particulier pour les microorganismes en raison de la diversité des surfaces d'adhésion, du volume d'écoulement plus grand et de la présence d'espace.
- Dans des conditions oligotrophes souvent présentes dans la nappe et les puits, la plupart des microorganismes adhèrent aux surfaces.
- Il n'est pas possible de suivre le cheminement des contaminations fécales en déterminant les agents pathogènes qui sont multiples et à propriétés variables. Au lieu de cela, l'on suit les bactéries qui, généralement, sont les plus abondantes dans les fèces (comme *E. coli*) et sont évocatrices de pollution fécale. Ce principe d'indicateur est universellement reconnu. L'on convient que la présence de bactéries fécales indicatrices ne coïncide pas toujours avec la présence ou l'absence de bactéries pathogènes, a fortiori dans le cas de virus pathogènes et de protozoaires. Habituellement, l'abondance d'indicateurs sert d'aune de mesure de la probabilité d'une présence d'agents pathogènes. Un débat est en cours actuellement sur l'utilisation de bactériophages comme indicateurs de présence de virus pathogènes. Etant donné leurs caractéristiques de cheminement et de survie, le rapport indicateur à agent pathogène doit être évalué pour chaque milieu particulier.
- L'introduction de microorganismes dans le sous-sol se produit avec l'eau de recharge, qui provient généralement des précipitations ou d'infiltrations des eaux superficielles. Des sources importantes de pollution microbienne dans la nappe ont été signalées comme résultant de fuites d'égouts, de déchets animaux, de

contamination fécale du sol en surface et des eaux superficielles (d'origines humaine, animale, sauvage. Une source de contamination supplémentaire et propre aux puits peut provenir de manipulations contraires aux règles de l'hygiène lors des procédures d'exploitation et/ou de surveillance.

- Selon les propriétés du sous-sol, telles que la porosité, la présence de canalisations, hydrophobicité des surfaces, la vitesse de migration peut varier considérablement. Une fois en dessous du niveau de la nappe, la circulation verticale diminue. La migration est ensuite déterminée par la direction et la vitesse d'écoulement de l'aquifère. Pendant ce passage, la distance de migration microbienne est tributaire de divers processus comme la filtration, la dispersion, l'adhésion superficielle, et le dépérissement.
- Des connaissances poussées des conditions structurelles de l'aquifère et des durées de survie des microorganismes concernés sont essentielles pour évaluer les voies de cheminement par rapport à la vitesse et la distance de transport microbien souterrain.
- Diverses méthodes biochimiques, microbiologiques et moléculaires ont été mises au point et sont prêtes à l'emploi pour déterminer les types, l'abondance, et les activités métaboliques dans les communautés microbiennes, pour dépister les pollutions fécales en fonction des microorganismes indicateurs, et pour détecter des sources de pollution spécifiques.
- La sensibilité des puits à la contamination dépend essentiellement des propriétés hydrogéologiques et géochimiques du site, des couches géologiques supérieures saturées et non saturées, de la distance jusqu'aux sources de contamination potentielles et d'une protection de la tête de puits respectueuse des bonnes pratiques de gestion en phase d'exploitation et de surveillance.

Chapitre 3

Analyse statistique avancée de donnée de puits (D 1.2)

3.1 Méthode

La partie du cahier des charges sur les “ *méthodes de diagnostic* ” concerne l’analyse statistique des ensembles de données existantes provenant de champs de puits à Berlin et en France. Conformément à la stratégie de projet proposée, l’analyse de données s’est faite en trois stades:

- (1) Identification d’un indicateur de colmatage fiable,
- (2) Mise en relation de paramètres associés aux processus de colmatage pour dégager les tendances, et
- (3) Conclusions pour regrouper les puits à étudier ultérieurement.

Comme la majorité des données sous-jacentes provient des puits berlinois, dont on estime qu’ils sont touchés à 80% par le colmatage microbiologique, les conclusions ci-dessous porteront sur les processus de colmatage dû au fer.

Les différents sites français n’ont été pris en compte que dans l’analyse descriptive des données et aucunes autres statistiques n’ont été dressées en raison du nombre trop faible d’échantillons et leur manque d’homogénéité. Toutefois, des recherches de terrain spécifiques ont été menées et les résultats sont présentés dans l’annexe du rapport circonstancié.

Afin d’identifier un indicateur de colmatage fiable permettant des analyses statistiques plus poussées i) les inspections télévisuelles, ii) les changements de débits spécifiques (Qs) et iii) le nombre de traitements H₂O₂ ont été mis en relation avec les paramètres hydrochimiques, de construction et d’exploitation des puits berlinois. Pour déceler les premières tendances, on a utilisé un ensemble réduit de données de puits en distinguant bien les ouvrages colmatés des ouvrages non colmatés. Les inspections télévisuelles systématiques ont mis en évidence la distinction la plus significative entre les puits colmatés et non colmatés, d’après les connaissances actuelles des processus de colmatage ferrique. Par exemple, l’état de colmatage présente des tendances significatives en fonction de l’éloignement par rapport au volume d’eau superficielle le plus proche, des concentrations de fer, de manganèse et de nitrate, de la moyenne mensuelle des heures d’exploitation et le débit total moyen. Toutefois, les inspections télévisuelles ne visualisent que les phénomènes de colmatage à l’intérieur du puits et non pas dans les filtres à gravier, ce qui représente une limitation importante.

Par ailleurs, le pourcentage de réduction annuelle moyenne de débit spécifique (Qs) a été calculé pour comparer les différences d’état des ouvrages. Le paramètre Qs présente l’avantage de donner une quantification métrique de performance de puits. Mais il présente aussi un inconvénient. C’est, en effet, une mesure comparable uniquement pour des aquifères captifs ou pour un débit constant, puisqu’il n’y a qu’une relation linéaire entre le débit et le rabattement dans ces cas-là. Par conséquent, les essais de pompage à débits variables - comme cela est couramment pratiqué par la BWB et Veolia – ne sont pas entièrement comparables. C’est peut-être une des raisons qui veut que les relations entre les processus de colmatage et les changements de Qs révèlent des résultats moins clairs que les inspections télévisuelles, alors que, théoriquement, cet indicateur serait tout à fait approprié pour mettre en évidence les effets des divers processus de colmatage.

Enfin, le nombre de traitements H₂O₂ préventifs a été mis à l’essai comme indicateur de colmatage pour les puits berlinois (sur proposition de la BWB). Cependant, il s’est avéré que la différenciation entre cause et effet du colmatage était problématique, et

que cet indicateur ne correspondait pas à la théorie des processus de colmatage. Ainsi, les traitements H_2O_2 ne semblent pas être un indicateur approprié pour l'analyse statistique.

3.2 Conclusions

Ayant identifié les inspections télévisuelles systématiques comme étant l'indicateur de colmatage le plus fiable pour l'analyse statistique, quatre catégories définies allant du non-colmatage (0) au colmatage intense (3) ont été corrélées aux paramètres disponibles de construction, d'hydrochimie et d'exploitation des puits. De cette façon, l'on a dégagé les tendances générales des paramètres liés aux processus de colmatage:

- (1) La plupart des puits présente des phénomènes de colmatage croissants avec l'âge et la baisse de profondeur du premier filtre.
- (2) Les puits colmatés présentent des concentrations de fer plus faible et de manganèse et nitrate plus élevé que les puits non colmatés.
- (3) Les puits à débit total moyen plus élevé et heures de service plus longues tendent au colmatage.

Pour autant, une quantification finale de l'état de colmatage et les paramètres associés par régression linéaire multiple a abouti à un résultat décevant. Les paramètres indépendants ont rendu compte de seulement 20 % de la variance de colmatage, alors que 80 % de variance reste inconnu.

Par conséquent, l'on manque encore de connaissance lorsque les paramètres les plus pertinents font défaut ou encore lorsque les paramètres connus révèlent trop de variabilité dans les mesures. A titre indicatif, les données hydrochimiques varient non seulement avec le temps, mais aussi avec la profondeur de puits, en fonction de l'hydraulique du puits. En conclusion, une valeur unique mesurée dans l'eau brute brassée ne peut caractériser des variations liées à la profondeur et induites par les activités d'exploitation.

En égard aux données d'exploitation, les relevés d'heures de service et débit total à la BWB sont sujet à une marge d'erreurs élevée, selon que l'on ait mesuré par méthodes directes ou indirectes. Par exemple, dans certains réseaux, les heures de service se calculent à partir de la consommation électrique de la pompe. Dans d'autres, les compteurs mesurent les heures de service à la minute près. On constate la même chose pour les mesures de débit total. Certaines usines d'eau disposent de débitmètres qui, eux aussi, ont tendance à se colmater. D'autres utilisent la mesure inductive ou l'électricité consommée. Voilà pourquoi la plupart des données présentent, au sens statistique, une comparabilité limitée puisqu'elles sont soumises à des erreurs différentes de mesure.

Récemment, Rubbert & Treskatis (2008) ont réalisé des travaux semblables et ont fini par conclure que des tendances peuvent certes se dégager mais pas se refléter dans des cas de figure individuels. Trop de facteurs, y compris pour des raisons d'ordre naturel, opérationnel, rationnel et économique, contribuent à la variabilité élevée observée.

C'est pourquoi il faut

- (1) des mesures pour réduire la variabilité des données, et
- (2) élaborer un système de matrice avec une pondération individuelle des facteurs et l'évaluation de séries chronologiques de mesures

La mise en œuvre dans la routine de surveillance et d'exploitation fera l'objet d'une discussion avec le personnel technique de la BWB et de Veolia à partir des recommandations du chapitre 6.

3.3 Analyse descriptive des données sur les puits français

Pour pouvoir intégrer les données françaises dans les études statistiques, elles doivent être complétées et validées. Pour chaque puits exploité par Veolia, il est donc recommandé de constituer une base de données, par exemple sur le modèle de la base de données du projet WELLMA.

Par rapport aux résultats de l'analyse statistique des données sur les puits de Berlin, les données françaises semblent confirmer le résultat selon lequel il existe un rapport entre les processus de vieillissement des puits et les paramètres de concentration en fer et en manganèse, de teneur en oxygène de l'eau brute, de débit moyen et de durée d'exploitation.

Sur tous les sites français, les hydroxydes de fer, carbonates et biofouling sont les responsables potentiels du vieillissement des puits. On peut déjà affirmer que les recommandations pour une amélioration de la surveillance des puits et du diagnostic des processus de vieillissement sont les mêmes que pour le BWB.

Comme l'inspection vidéo se limite aux procédés de vieillissement intervenant à l'intérieur du puits, les performances du puits doivent être contrôlées par des essais de pompage court plus réguliers. En particulier, les puits pour lesquels on suspecte un processus de colmatage doivent subir une mesure au débitmètre Flow.

En conséquence, le pH, Eh, Ca, HCO₃, O₂ (parallèlement à NO₃) et Fe sont les paramètres essentiels pour les études chimiques. Les prélèvements doivent être menés au moins une fois en profondeur pour déterminer les conditions redox et la composition de l'eau sur toute la hauteur du puits. Combiné avec des mesures au débitmètre Flow, des processus de mélange pourront être révélés.

La fréquence des prélèvements et des mesures dépendent de la vitesse, du type et de l'expansion des phénomènes de vieillissement et doivent être déterminés pour chaque site. Sur la base de cette stratégie de surveillance adaptée, des mesures d'entretien pourront être planifiées.

Dans la phase WELLMA2, les puits français devront être intégrés aux études relatives aux processus de vieillissement. Le tableau B-2 donne un aperçu de l'état actuel sur le contexte géologique ainsi que sur les facteurs potentiellement responsables pour le vieillissement qui seront utiles pour la planification des investigations pendant la phase WELLMA2. Les sites concernés par l'étude seront fixés définitivement en accord avec les participants des départements techniques de Veolia et de Pigadi.

Chapitre 4

Comparaison de méthodes et procédures (D 1.3)

4.1 Méthodes

Un des objectifs de la phase préparatoire WELLMA 1 était d'évaluer les méthodes disponibles pour le diagnostic et la surveillance du colmatage en fonction de leur valeur informative et leur applicabilité. A cette fin, un large éventail de méthodes fut mis à l'essai sur trois puits sélectionnés. On peut les diviser en 3 groupes:

- A) Surveillance de la performance de puits (surveillance normale)
 - (1) Essais de débit par paliers
- B) Surveillance de l'état du puits (surveillance normale)
 - (1) Inspections télévisuelles
 - (2) Diagraphie gamma gamma (GG:D) et diagraphie neutron neutron (NN)
 - (3) Débitmètre (Flow)
 - (4) Débitmètre à packer (Packer-Flow)
- C) Diagnostic des types de vieillissement et leur étendue
 - (1) Echantillonnage d'eau et analyses hydrochimiques
 - (2) Echantillonnage microbiologique suivi d'examen moléculaire
 - (3) BART (test de réaction de l'activité biologique)
 - (4) Comptage de particules

Etant donné que toutes ces méthodes ne correspondent qu'à des mesures indirectes d'évaluation de l'état du gravillonnage, l'on a initialement prévu d'effectuer des carottages horizontaux dans les puits sélectionnés permettant un accès direct aux dépôts attendus et permettant, ainsi, d'évaluer l'opportunité des méthodes testées. La production d'un appareil utilisable pour effectuer les carottages horizontaux n'a cependant pas été terminée pendant WELLMA 1.

Alors que l'on peut considérer la surveillance de l'état et de la performance de puits comme étant des méthodes standard décrites de façon détaillée dans les manuels de cours et les bulletin techniques (*voir le rapport circonstancié sur l'état de la technique pour les références*), la méthodologie de recherches géochimiques et microbiologiques a dû avant tout être mise au point.

Partant de l'hypothèse que le colmatage des puits berlinois est essentiellement causé par accumulation d'hydroxydes de fer induite par les bactéries ferrugineuses, l'effort a porté sur l'évaluation les conditions d'oxydoréduction, le milieu vivant et la composition des communautés bactériennes des biofilms. Pour rehausser la pertinence de cette évaluation, 17 puits supplémentaires furent inclus dans les recherches hydrochimiques et microbiologiques faites par les universités.

Le tableau 1 résume la portée des recherches:

Tableau 1: Sites sélectionnés et méthodes sur le terrain

MÉTHODE	3 puits abandonnés	1 puits avec transect	17 puits en service supplémentaires
Analyses hydrochimiques	x	x	x
Lames	x	x	x
BART	x	x	
Comptage de Particules	x		
Surveillance normale d'état et de performance du puits	x	x	
Traitement H ₂ O ₂		x	

4.1.1 Résultats des analyses hydrochimiques [FUB]

Méthode

Ces travaux de recherche ont porté sur la détermination des paramètres physico-chimiques (pH, potentiel redox, teneur en O₂, conductivité et température) et sur les concentrations des principaux cations et anions dans les échantillons d'eau des 19 puits BWB distincts.

Pour obtenir des informations sur l'intervalle de sondage optimal, les intervalles de mesures et prélèvements ont été fixés à 1 minute pendant les dix premières minutes après l'allumage de la pompe, suivi d'intervalles croissants. La durée était en fonction de la stabilité des paramètres de champ. Ces valeurs devaient être stables pendant une heure.

Sur le terrain, les paramètres hydrochimiques furent mesurés quasiment en continu dans une chambre d'écoulement gravitaire (Figure 3-1). Les paramètres critiques tels que HS⁻, NH₄⁺, NO₂⁻, couleur, turbidité, HCO₃⁻ ont été établis sur site. Les échantillons d'anions et de cations furent passés dans des filtres d'acétate de cellulose à diamètre de pores de 0.45 µm. Les échantillons de cations ont été acidifiés avec un concentré HNO₃ pour éviter la précipitation des oxydes ou des hydroxydes. Outre l'échantillon de cations filtré, un échantillon non filtré et acidifié fut utilisé pour étudier les particules de fer et de manganèse dans l'eau. Le rabattement dans le puits fut mesuré grâce à une sonde de niveau à signal lumineux au moment des prélèvements.



Fig. 3: Appareils d'échantillonnage pour l'analyse à courte durée de prélèvements d'eau microbiologiques et hydrochimiques. Dispositif de mesure avec cellule d'écoulement pour les paramètres hydrochimiques de champ [FUB 2009]

Pour ramener le nombre d'analyses à un niveau gérable, l'on s'est donné des temps de prélèvements représentatifs en tenant compte de l'évolution des paramètres sur le terrain:

- Le premier échantillon a été prélevé directement après l'allumage de la pompe pour caractériser l'état du puits à l'arrêt.
- Le second échantillon prélevé après une 1 minute correspond à la phase de démarrage.
- L'échantillon suivant a été prélevé 9 minutes plus tard une fois passées les premières mutations rapides.
- Le dernier échantillon correspond à l'état stable avec des paramètres sur le terrain stables.

Les analyses d'anions et cations ont été réalisées dans les laboratoires de la FU (Université libre) de Berlin.

Résultats

Il est apparu clairement à partir des analyses hydrochimiques que l'eau de puits extraite n'est pas en état d'équilibre thermodynamique. L'on a mis en évidence la présence d'oxygène (≤ 10 mg/l) et de nitrate (≤ 14 mg/l) dans des conditions d'oxydoréduction où, en situation d'équilibre, ces éléments auraient dû être absents (voir Fig. 4). Fe et Mn sont présents dans des zones, où ils devraient être oxydés (et, donc, pas dissous) et en équilibre, quoique, dans certains cas comme les zones à faible potentiel redox, ils s'avèrent appauvris (voir Fig. 5).

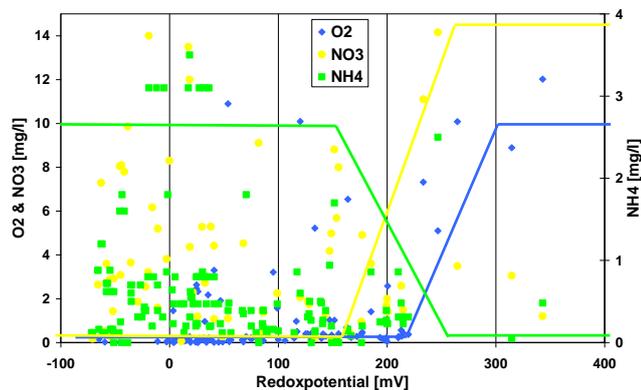


Fig. 4: Relevé pour O₂, NO₃ et NH₄ par rapport au potentiel redox pour tous les prélèvements sur puits. Les courbes indiquent les valeurs probables dans des conditions thermodynamiques stables [FUB 2009]

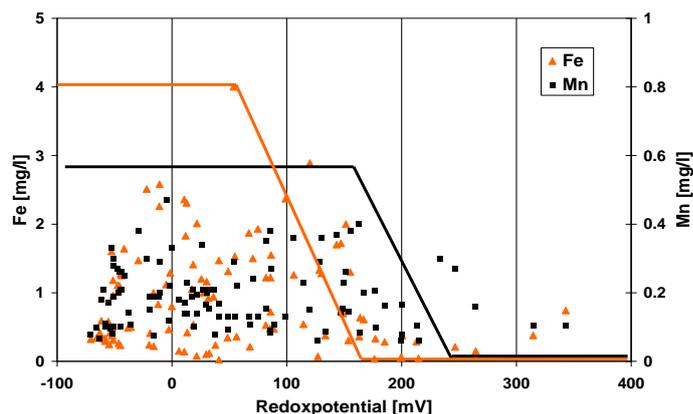


Fig. 5: Relevé pour Fe et Mn comparé au potentiel redox pour tous les échantillons sur puits. Les lignes indiquent les valeurs probables dans des conditions thermodynamiques stables [FUB 2009]

Ces conditions sont fort probablement dues au brassage d'eaux souterraines ferriques anaérobies et d'eaux proches de la surface contenant de l'oxygène et sont des conditions chimiques favorables aux incrustations ocreuses.

Comme l'eau brute captée des puits représente toutefois l'eau mélangée, les zones redox et les états d'équilibre dans le puits ne peuvent être évalués qu'à condition de réaliser l'échantillonnage en profondeur.

Ceci permettrait également d'identifier les zones privilégiées de précipitation des dépôts chimiques colmatants et par conséquent, l'expansion des incrustations ocreuses.

4.1.2 Résultats des études microbiologiques [TUB]

Les études microbiologiques ont porté sur des prélèvements d'eau et de dépôts, ainsi que sur la croissance de biofilms. La mise au point d'une méthodologie faisait partie du sous-projet *WELLMADNA* mais elle fut poursuivie dans le cadre de la tâche 1.3 de *WELLMMA1* également.

Echantillonnage

Afin de prélever des échantillons de biofilm intact à l'intérieur des puits, l'on a dû concevoir un dispositif spécial.

L'on a fixé plusieurs contenants perforés (tubes Falcon 15 ml) avec des vis de serrage Simplex le long d'un fil d'acier. Ces capsules autoclavables en polypropylène étaient dotées de billes de verre ou lames ajustées au calibre des colonnes montantes (Fig.1).

Résultats

- Le dispositif a permis de prélever des échantillons de biofilm intact sans qu'il ait fallu entreprendre des travaux de construction supplémentaires ou d'ouvrir la tête de puits. Il s'est avéré facile à manipuler et approprié pour cette tâche.
- La durée de l'exposition a un impact sur la communauté des biofilms qui adhère à la lame.

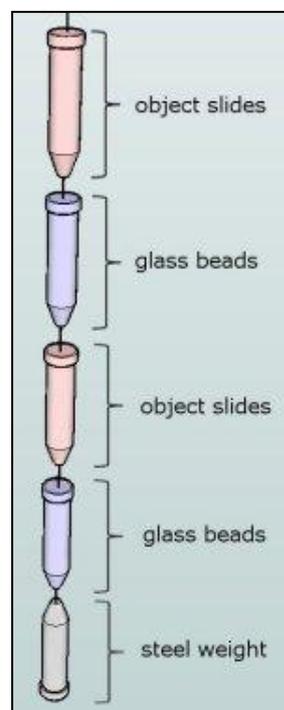


Fig. 6: Dispositif d'échantillonnage [TUB 2009]

Les premiers essais indiquent qu'une exposition de sept semaines suffit pour observer des bactéries ferrugineuses sur les lames.

- La pompe doit à tout moment être en état d'arrêt avant de manipuler le dispositif d'échantillonnage afin d'empêcher qu'il soit aspiré par les pompes dénués de grille de sécurité.

Culture et isolement

Des essais d'isolement des bactéries ferrugineuses ont commencé sur divers prélèvement des puits (eau, enduit de pompe et biofilms sur billes de verre). Les degrés décimaux de dilution ($\leq 10^{-4}$, selon l'inoculum) des suspensions de biofilm ont été préparés à base de STP (solution saline tamponnée au phosphate). Les solutions des deux derniers degrés de dilution ont été répandues sur des boîtes de gélose (milieu: milieu *Leptothrix* modifié et eau de nappe) à deux échantillons subdivisés par milieu. La boîte primaire (PP) a été scellée avec du film plastique et on a laissé incuber à température ambiante jusqu'à 2 mois. La croissance des colonies fut contrôlée régulièrement.



Fig. 7: Culture et isolement [TUB 2009]

L'apparition de colonies brunes ou noires correspondait au résultat attendu de l'oxydation du fer ou de la manganèse. Ces colonies furent en partie prélevées avec des cure-dents stérilisés et répandues dans de nouvelles boîtes de gélose pour sous culture.

On laissa incuber la boîte primaire PP et les colonies à croissance plus lentes ainsi développées furent sous cultivées pendant une période supplémentaire.

Résultats

- La méthode nous a permis d'obtenir des bouillons de culture de référence pour l'électrophorèse DGGE, et de concevoir l'amorce et la sonde.
- Pour bien cultiver les bactéries ferrugineuses des différents puits, de nouveaux bouillons de culture ont été développés à base d'échantillons d'eau des puits correspondants.
- Les boues de pompage et les billes de verres se sont avérées être les inoculats les plus prometteurs.
- Le fait que les meilleurs résultats de culture furent obtenus avec des bouillons sur base d'eau de puits laisse supposer une corrélation entre la formation d'ocre et la composition chimique de l'eau de puits.

Analyse au microscope

Pour obtenir une première évaluation au microscope des sites de prélèvement sélectionnés et observer les premières différences parmi les espèces dominantes de bactéries ferrugineuses, les lames furent exposées dans 19 puits berlinois distincts pendant plusieurs semaines. Quatre morphotypes majeurs de la ferrobactérie purent ainsi être identifiés. Type A : bactéries engainées (ex. *Leptothrix spec.*, *Sphaerotilus spec.*), type B: bactéries pédonculées (*Gallionella spec.*, *Toxothrix spec.*), type C: bactéries sidérocapsacées (*Siderocapsa spec.*) et type D: bactéries filamenteuses (par ex. *Actinomycètes*).

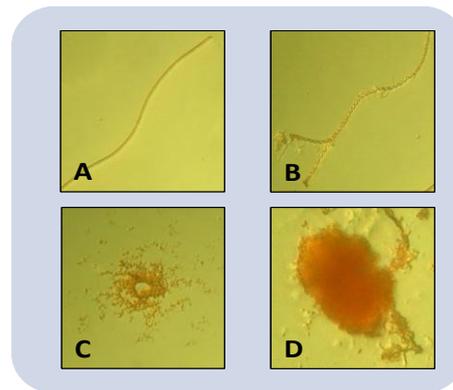


Fig. 8: Morphotypes ITI IR 20091

Résultats

- L'on a mis en évidence que chaque puits contient un ensemble variable de morphotypes ferrobactériens.
- Alors que certains puits contiennent surtout des bactéries engainées, d'autres contiennent des bactéries sidérocapsacées et filamenteuses. Ceci pourrait avoir une incidence importante sur le type de dépôts ocreux qui se forment à proximité du filtre et dans le gravillonnage.
- Le type de dépôts ocreux peut fortement dépendre du type de ferrobactéries prédominant dans le puits. Les premiers résultats de corrélations avec des données chimiques indiquent que la structure morphologique des biofilms est corrélée aux conditions chimiques du puits. Des ajustements de procédés d'exploitation permettraient éventuellement d'influencer ces conditions et la structure de la communauté. Il faudra approfondir cela.

Développement des sondes d'ADN

Beaucoup de ferrobactéries appartiennent à la classe des bêtaprotéobactéries, une classe du système phylogénétique bactérien qui regroupe les bactéries selon les séquences de base de l'acide ribonucléique ribosomique 16S (16S-rRNA). On trouve d'importants représentants des bêtaprotéobactéries dans les genres *Sphaerotilus*, *Nitrosomonas*, *Spirillum*, *Thiobacillus* et *Gallionella*.

Par la méthode FISH (Fluorescence In Situ Hybridization) il est possible de visualiser particulièrement les organismes cibles sur une lame. La méthode repose sur le principe que les cellules bactériennes contiennent une multitude de ribosomes, en partie composés d'acide ribonucléique (ARN).

Sachant que l'acide ribonucléique ribosomique contient des régions bien spécifiques, les sondes génétiques marquées par des colorants fluorescents peuvent se fixer de manière sélective aux bactéries qui contiennent la séquence cible. Par le truchement de sources lumineuses appropriées ces signaux peuvent être visualisés.

Résultats

- La méthode permettra de corréler des signaux de sonde spécifiques avec des incrustations ferriques. Ce sera un outil important pour évaluer le potentiel de formation de dépôts ocreux selon les organismes en présence.

- Les premiers résultats indiquent une corrélation entre les procédés d'exploitation du puits et le ratio de bêtaprotéobactéries sur les lames.
- Il pourrait y avoir moyen de manipuler la communauté bactérienne du puits ainsi que la forme et l'épaisseur des dépôts ocreux simplement en allumant ou éteignant la pompe pendant des périodes prolongées. De plus amples informations sur ce sujet doivent être recueillies.

Essais biologiques moléculaires

Au cours du projet, nous avons prélevé plus de 150 échantillons sur différents sites de sondage, y compris des échantillons d'eau et de biofilms.

Les échantillons ont été traités et l'ADN extrait des bactéries, ce qui fournit suffisamment de matériel pour les analyses de contrôle à venir. Les travaux d'amplification d'ADN, de clonage et d'essais d'électrophorèse DGGE ont démarrés.

Résultats

- Les résultats des premiers essais d'électrophorèse DGGE révèlent des ressemblances, mais également des distinctions entre les peuplements des divers puits. Les premiers profils de composition des communautés sont constitués.
- La méthode DGGE, en association avec d'autres méthodes, pourrait permettre l'identification d'organismes indicateurs qui corrélerent avec les dépôts ocreux respectifs.
- L'on a observé que de nombreux échantillons de biofilm ne révélaient que de faibles taux d'ADN comparé aux échantillons d'eau. Le temps d'exposition des billes de verre sera prolongé lors d'expérimentations à venir.
- Par ailleurs, certaines substances s'accumulent dans les biofilms et semblent interférer avec la PCR (réaction de polymérisation en chaîne). Les conditions de la PCR ont été optimisées à un niveau suffisant pour résoudre ces difficultés. Ceci étant, il faudra procéder à d'autres optimisations au cours du projet.

4.1.3 BART [UWT]

Méthode

Cette méthode fut mise au point par des chercheurs canadiens étudiant le bio-encrassement. Il s'agit d'une méthode de criblage à base de cultures qui donne des informations sur la présence et l'activité des groupes de bactéries connues pour leur rôle dans les phénomènes de bio-encrassement des puits.

Le procédé comporte 9 kits d'échantillonnage (plus un pour le contrôle) avec des nutriments visant :

- Ferrobactéries (IRB)
- Bactéries sulfato-réductrices (SRB)
- Bactéries visqueuses (SLYM)
- Bactéries nitrifiantes (N) et dénitrifiantes (DN)
- Bactéries aérobies hétérotrophiques (HAB)
- Pseudomonas fluorescens (FLOR)
- Microalgues (ALG)

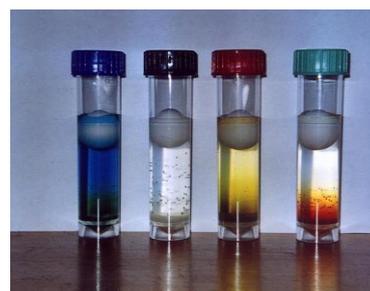


Fig. 9: kits d'essais IRB BART

Nous avons sélectionné IRB, SRB et SLYM sur des échantillons d'eau et de dépôts colmatants provenant de trois puits pour évaluer le potentiel d'accumulation d'hydroxydes de fer induite biologiquement.

Résultats

BART met en évidence la présence de ferrobactéries et de bactéries visqueuses dans tous les échantillons d'eau et de dépôts colmatants étudiés. Cependant, il n'a pas été possible de classer les bactéries plus avant.

Pour évaluer définitivement la signification des résultats de la méthode BART, l'Université technique de Berlin a inclus un des échantillons d'eau et un de dépôts colmatants issus des kits d'analyse dans les essais de culture et analyses DGGE. Ici, seule une faible corrélation entre les profils DGGE a pu être constatée.

Il n'est pas certain que BART soit réellement en mesure de représenter le taux d'activité des ferrobactéries qui, comme on le sait, ne sont pas cultivables. Les travaux actuels d'identification et de classification par méthodes biomoléculaires permettront de spécifier les bactéries représentées par BART.

4.1.4 Comptage particulaire [KWR]

L'institut de recherche du cycle de l'eau KWR (anciennement Kiwa) préconise la méthode du comptage particulaire par lequel il a obtenu de bons résultats de caractérisation du colmatage physique des puits.

Aux Pays-Bas, environ un tiers des puits de captage sont affectés par le colmatage sur paroi, ou à proximité de la paroi du puits. Ce type de colmatage est caractérisé par des crépines complètement propres et un degré élevé de résistance d'entrée entre la nappe et le filtre à gravier (Fig. 10A).

A l'inverse, les puits qui subissent un colmatage chimique et/ou biologique (un autre tiers des puits néerlandais) se caractérisent par une résistance d'entrée entre le filtre à gravier et les tamis encrassés de la crépine (Fig. 10B).

Les études ont mis en évidence que la filtration mécanique des particules est un procédé qui cause de manière prépondérante le colmatage à proximité des parois du puits et, ainsi, on qualifie souvent ce type de colmatage de colmatage mécanique (De Zwart, 2007).

Les comptages particuliers des eaux captées montrent que lorsqu'un puits est mis en service, une partie des particules filtrées sont ensuite relâchées et aspirées à travers le gravier et le filtre. De plus, des commandes de marche et d'arrêt régulières peuvent réduire considérablement, voire même prévenir le processus de colmatage mécanique. Cette modulation fréquente de commandes, (ou « switching ») est désormais un moyen répandu d'exploitation de nombreux champs de puits aux Pays-Bas (lire par ex. Van Beek et al., 2007).

D'autre part, dans le cas des puits souffrant de colmatage chimique, il est de pratique courante d'assurer une exploitation du puits aussi constante (continue) que possible (Makkink et al., 2000; Van den Berg et al., 2007). L'idée est que la zone de transition redox est au plus stable dans des conditions de service en continu ce qui réduit le risque de mélange de types d'eaux oxiques et anoxiques. De plus, on considère souvent que le colmatage particulaire ne joue pas un rôle important dans ce genre de puits. A ce titre, le comptage particulaire n'a jamais auparavant été mis à l'essai.

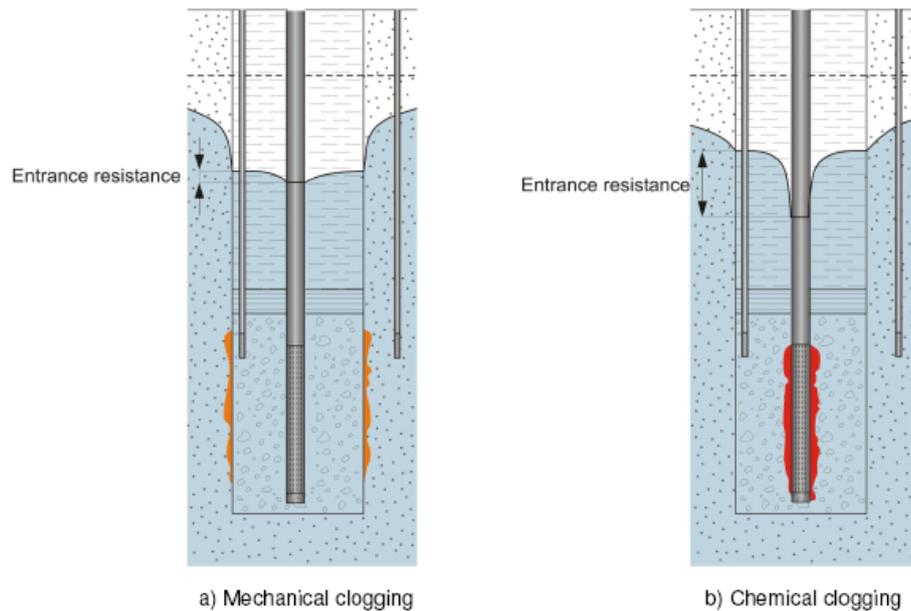


Fig. 10: Types de colmatage; A. Colmatage mécanique; B. Colmatage chimique [KWR 2009]

Les trois puits sélectionnés étaient en service pendant 3 jours conformément à un programme d'exploitation de 24 heures de marche suivies de 3 heures d'arrêt. Les puits à proximité ne devaient pas être mis en service pendant ce temps, avec une seule exception afin d'examiner la conséquence de la commutation. Les concentrations particulières et leur distribution granulométrique dans les eaux captées ont été enregistrées, ainsi que la charge hydraulique, le débit du puits et le mode d'opération des puits avoisinants. Les résultats de ces expérimentations furent ensuite analysés et comparés aux résultats d'études semblables sur les puits (néerlandais) mécaniquement colmatés.

Résultats

Les premières tentatives pour mieux comprendre le rôle des particules dans les eaux de captage de puits connaissant un colmatage biologique et/ou chimique a conduit aux conclusions suivantes:

- Les concentrations particulières dans les puits chimiquement colmatés réagissent instantanément et fortement aux commandes de mise en marche (de pompe) dans les puits de captage. Une heure après une mise en marche, les concentrations se stabilisent à de faibles taux;
- Dans le cas d'un puits, les concentrations particulières ont réagi également à l'arrêt de la pompe. Une réaction semblable est envisageable dans les deux autres puits mais ceci n'a pas pu être enregistré en raison de contraintes techniques;
- Les concentrations maximales enregistrées après une mise en service sont bien plus élevées que les concentrations dans les puits néerlandais mécaniquement colmatés. Les concentrations maximales varient entre 2,400 et 4,000 mL⁻¹ pour les puits de Tegel, et entre 16,000 et 36,000 pour STOborg19-/90V (les puits néerlandais accusent des concentrations entre 200 et 2000 mL⁻¹);
- La mise en service de puits avoisinants n'a pas eu d'effets, ou seulement négligeables, sur les concentrations particulières dans les puits d'intérêt;

- La provenance des particules est inconnue. Il est fort probable que les 'particules' recensées soient des bactéries ou des précipités ferriques qui se détachent de la pompe et/ou de la crépine.

Un des objectifs de cette expérience était de voir si la fréquence de commutation de la pompe peut servir à la prévention du colmatage biologique et/ou chimique. À l'évidence, des matières sont éliminées lors de l'actionnement de la pompe, ce qui a été montré par la concentration particulaires élevée.

On ne peut pas actuellement évaluer dans quelle mesure l'accumulation de peuplement bactérien et/ou de précipités ferriques sont prévenus par ces processus. Toutefois, pour en assurer une bonne évaluation, plus de données sont nécessaires quant à la provenance des particules, la quantité éliminée, et le taux de formation des bactéries et/ou précipités.

4.1.5 Analyse de l'état du puits

Méthodes

Les méthodes suivantes ont été appliquées sur chaque puits abandonné et le puits d'exploitation du transect avant et après le traitement H₂O₂:

- Essais de débit par trois paliers
- Inspections télévisuelles
- Diagraphies gamma-gamma et neutron-neutron pour évaluer l'état du filtre à gravier
- Débitmètre et débitmètre à packer pour jauger les conditions hydrauliques

Résultats

L'évaluation de la performance de puits par **essai de pompage en trois paliers** dans des conditions stationnaires pour chaque palier a permis d'établir:

- Le débit spécifique Qs à comparer au Qs et son évolution par rapport au temps de service et la situation avant/après les mesures de régénération
- La composante de perte de charge due à l'aquifère et la composante perte de charge due au puits dans le rabattement de la nappe
- L'importance de Δh pour définir l'emplacement et l'étendue du colmatage dans le filtre à gravier

Les **débits spécifiques (Qs)** établis montrent une détérioration significative des quatre puits étudiés qui conservent entre 25 et 74% de leur débit initial. L'abaissement total se compose d'une partie d'aquifère (linéairement, écoulement laminaire dans le secteur de l'entonnoir de prélèvement) et d'une partie de puits (non-linéaire, écoulement turbulent dans le secteur de filtre du puits). Toutefois, la perte du puits a pu être calculée pour un puits seulement.

Le **calcul des valeurs Δh** n'a décelé aucune différence de niveau d'eau sur les piézomètres internes et externes pour trois des quatre puits, ce qui indique l'absence de dépôts colmatants entre la crépine et les premiers centimètres du filtre à gravier (voir Fig. 10). Seul le puits STOborg19 présentait un Δh de 12 cm. C'est aussi le puits qui accuse la chute de performance la plus élevée.

Les essais de pompage et les analyses d'état de puits (inspections télévisuelles et diagraphies de sondages géophysiques) varient dans leur corrélation pour les quatre puits étudiés.

Dans l'ensemble, les **inspections télévisuelles** n'ont fourni aucun indice au sujet des dépôts colmatants le long des tamis. Dans tous les puits étudiés, les dépôts se situaient entre le niveau dynamique de l'eau et la partie supérieure du filtre avec la plus grande accumulation constatée à proximité des tamis d'admission de la pompe. Ceci étant, la couleur et structure des dépôts le long du tubage étaient variables entre les puits à tubage en acier et en PVC. Fig. 11 présente les résultats des inspections télévisuelles d'un puits en acier (images A à C) et, pour comparaison, d'un puits en PVC (images D à F).

Alors que le puits en acier, assaini la dernière fois en 2003, présentait seulement de légères incrustations en haut de la crépine, le puits en PVC, assaini la dernière fois en 2007, présentait clairement plus de dépôts. L'on note, en particulier, le colmatage partiel à l'intérieur de la crépine, alors que le tubage présente des dépôts dans toutes les directions.

La conclusion qu'une influence des matériaux existe bien, est étayée par l'expérience pratique de la BWB, qui confirme que les puits de cuivre sont moins susceptibles au vieillissement. De telles corrélations n'ont pu être mises en évidence par analyse statistique. Toutefois, elles devraient être prises en compte lors d'évaluations futures.

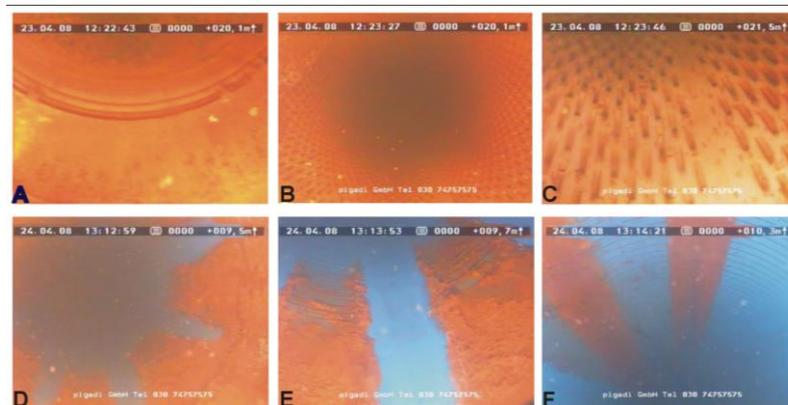


Fig. 11: Inspections télévisuelles des puits TEGhzk22 (A-C) en acier, et STOborg15 (D-F) en PVC [KWB 2009 se basant sur le Pigadi- compte rendu]

Outre les dépôts visibles sur le tubage, les **mesures gamma-gamma (GG.D)** indiquent pour les quatre puits une accumulation de matières fines dans les deux mètres au-dessus du filtre à gravier, qui se situe entre le haut de la crépine et le bouchon d'argile (vers le haut). Ainsi, la zone entre le niveau dynamique d'eau et le haut de la crépine semble subir des processus de vieillissement allant de l'intérieur du puits vers le filtre à gravier.

Une corrélation avec la situation géologique de l'aquifère pourrait être déterminée en fonction de la **distribution des débits d'extraction (FLOW)** qui correspond aux couches de l'aquifère à granulométrie variable. Les sections à gros sédiments accusent une perméabilité plus élevée que les sections de sédiments fins.

L'évaluation de la perméabilité du filtre à gravier grâce aux mesures faites avec le **débitmètre à packer** montre une corrélation entre avec les résultats de diagraphie gamma-gamma (GG.D) ou de débitmètre (Flow). Ainsi, elle donne une indication de la présence de dépôts dans le filtre à gravier lorsque corrélée avec les résultats de GG.D et pas avec les résultats du débitmètre. Une corrélation avec les données du débitmètre, mais pas avec celles de la GG.D, affine la corrélation avec les couches sédimentaires de l'aquifère. Pour tout autre cas de figure, une évaluation initiale est nécessaire à des fins de comparaison.

4.2 Conclusions et évaluation

4.2.1 Comparaison des méthodes

Dans l'ensemble, les **essais de débit par palier** recèlent un potentiel pour le dépistage précoce de détériorations de puits. Le niveau de débit reste cependant le facteur décisif pour que les essais de pompe soient significatifs en matière d'évaluation de performance de puits, comme l'ont également conclu les analyses statistiques.

Somme toute, les **méthodes géophysiques** d'évaluation de la porosité et perméabilité du filtre à gravier et de la distribution des écoulements (par débitmètre et débitmètre à packer) se sont révélées insuffisantes pour caractériser de façon nette les processus de vieillissement. Pour ces méthodes indirectes, on ne peut émettre des constats que par comparaison avec l'état initial.

Afin d'évaluer définitivement les méthodes standards, des carottages devront être réalisés pour comparer l'emplacement et l'étendue des dépôts dans le filtre à gravier avec les indices de valeur Δh , de perte de débit spécifique, d'inspections télévisuelles, de diagraphie de puits et de comptage particulaire.

Comparé aux analyses de qualité de l'eau de routine, les **recherches hydrochimiques** menées sur les 21 puits n'ont présenté aucun avantage supplémentaire dans le diagnostic des processus de vieillissement.

Dans l'ensemble, l'analyse des paramètres physicochimiques de l'eau (pH, potentiel redox, teneur en O_2 , conductivité et température), des cations principaux (calcium, magnésium, potassium, sodium, fer, manganèse), des anions (chlorure, brome, floride, sulfate, phosphate, nitrate) et des nutriments (COD) permet d'évaluer :

- (1) la présence de matières premières du colmatage chimique et
- (2) les conditions de vie des bactéries à l'origine du colmatage biologique.

Toutefois, comme les prélèvements ont été réalisés dans de l'eau brute mélangée au préalable, il n'est pas possible d'identifier les processus redox et le potentiel de précipitation des dépôts. Ici, un échantillonnage basé sur la profondeur serait utile afin d'évaluer

- (1) les indices de saturation (par ex. par le fer ou les carbonates) et
- (2) les zones de transition redox

et conclure sur les sites privilégiés de dépôts (voir chapitre 2.2 du rapport circonstancié de l'état de la technique).

Les différentes **méthodes de recherche biomoléculaire** appliquées se sont avérées adéquates et fiables pour l'identification et détection de bactéries causant les dépôts ocreux. Malgré tout, la diversité de ces bactéries est plus élevée que prévu à partir des travaux d'autres groupes de chercheurs au fil des siècles derniers. Les bactéries, identifiées sous grossissement et classifiées uniquement par leur morphologie, peuvent désormais être plus précisément spécifiées grâce aux nouveaux procédés. Ces nouvelles méthodes permettront de corréliser les groupes spécifiques de bactéries causant les dépôts ocreux avec des conditions environnementales dans les puits et procédés d'exploitation respectifs.

L'évaluation de la signification des essais **BART** dépendra de travaux biomoléculaires plus poussés, où l'on appliquera la méthode d'identification DGGE, lorsque les bactéries cultivées sur kits BART correspondront aux indices IRB évocateurs du colmatage. La poursuite de la méthode BART n'est, par conséquent, pas recommandée dans l'immédiat.

L'avantage et la signification des **mesures de particules** ne peuvent être définitivement évalués car l'on n'a pas encore prélevé de carottes horizontales. Pour autant, le comptage particulaire a bien pu être appliqué pour évaluer les puits physiquement colmatés aux Pays-Bas. Par conséquent, cette méthode pourrait être employée en France sur des puits connus dont on suppose qu'ils sont affectés par le colmatage.

Ceci devrait être lié avec un échantillonnage et une caractérisation de particules extraites pour distinguer les bactéries, les précipités des processus de colmatage chimique et les sédiments fins à potentiel de colmatage physique et de rétention.

4.2.2 Processus biochimiques menant au vieillissement de puits

Le colmatage de puits est associé à des propriétés différentes des dépôts résultants. Non seulement la quantité mais aussi la composition, la structure et l'emplacement varient.

D'après les **résultats d'analyses microbiologiques et biomoléculaires** obtenus dans le cadre de *WELLMADNA*, l'on peut conclure que les bactéries potentiellement ferrugineuses et /ou mangano-oxydantes étaient en présence dans tous les puits étudiés.

Les premiers essais de corrélation des paramètres physico-chimiques d'un puits avec les bactéries en présence, réalisés à partir d'une analyse par grappes des données chimiques en conjonction avec les profils de bande d'essais DGGE, ont livré des résultats prometteurs puisqu'ils indiquent une **corrélation entre le morphotype prédominant des ferrobactéries et les conditions chimiques** dans le puits (Fig. 12).

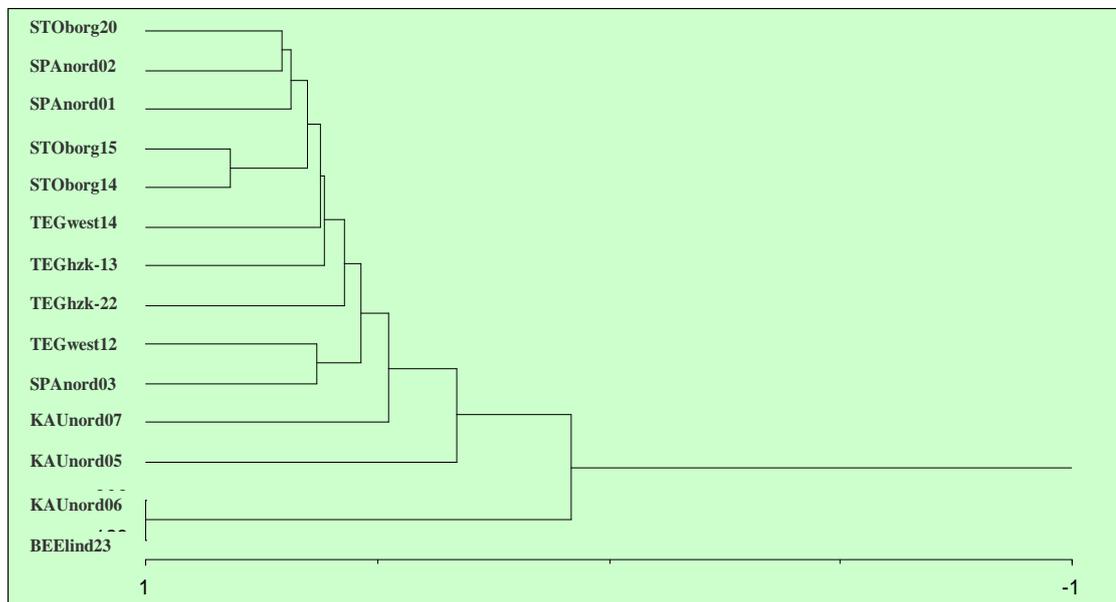


Fig. 12: Analyse par grappes des puits STM (surveillance de courte durée) à base de paramètres hydrochimiques et bandes DGGE [TUB 2009]

De plus, la corrélation du ratio de bêtaprotéobactéries (bactéries ferrugineuses) avec le compte total des cellules du ratio fer/manganèse montre qu'un ratio fer/manganèse faible correspond à un ratio de bêtaprotéobactéries élevé (Fig. 13).

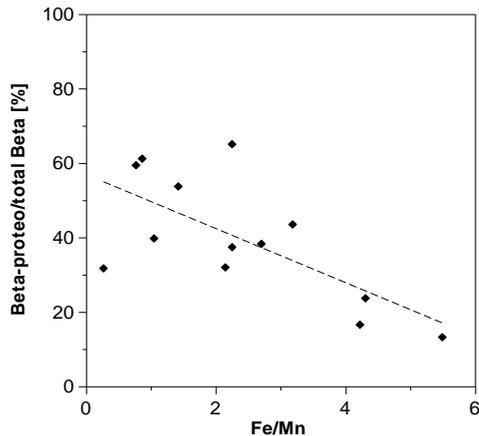


Fig. 13: Correlation du ratio bêta-protéobactéries et du compte total de cellules du ratio [TUB 2009]

Ceci étaye l'hypothèse de travail qui veut que le **peuplement bactérien des puits** respectifs soit **corrélé avec l'état chimique** et caractérise l'**occurrence de processus de colmatage biologique**.

Alors que la présence de ferrobactéries dans les échantillons d'eau, de dépôts et biofilms et leur corrélation avec les conditions géochimiques du site a pu être démontrée, il est moins clair:

- (1) que le colmatage biologique soit réellement le processus prédominant au niveau de la **composition de dépôts abondants**, ou quelle est la part de la précipitation chimique et des processus physiques (rétention) dans le colmatage, et
- (2) dans quelle mesure la **chute de performance de puits** est **due à des dépôts visibles** (inspection télévisuelle) ou causée par des processus invisibles dans le gravier.

Par conséquent, des recherches plus poussées sur les sites sélectionnés devraient comprendre une évaluation détaillée des **échantillons de dépôts colmatants prélevés à différents endroits** dans le puits (pompe, tubage, crépine), par exemple en utilisant

- la perte au feu pour déterminer la part des matières organiques par rapport à la masse totale
- les analyses par fluorescence aux rayons X pour déterminer l'abondance de minerais argileux, silicates, carbonates etc.

Afin de différencier l'impact sur la performance du puits de dépôts situés à des endroits distincts, une combinaison d'essais de pompage et de mesures de nettoyage est recommandée.

Chapitre 5

Premières recherches sur le terrain sur les puits berlinois pour évaluer les impacts de la fréquence de commutation (Option O₂) et traitements H₂O₂ sur les processus de vieillissement (Option H₂O₂)

5.1 Méthodes

5.1.1 Sites expérimentaux

Pour évaluer les effets du mode d'exploitation, 21 puits, parmi eux 1 transect, 3 puits pour démantèlement et 17 puits de BWB, qui présentaient des propriétés différentes, furent soumis à un examen des conditions géochimiques et de colonisations microbiologique pendant leur état de fonctionnement et leur état de repos.

De plus, un puits était équipé d'un transect de cinq puits-témoins à plusieurs niveaux pour assurer un réseau d'observation à haute résolution permettant d'étudier les impacts des procédés d'exploitation et de maintenance à proximité du puits (voir Fig. 14).

Chaque puits-témoin multi-niveau consiste en 3 piézomètres de 2 pouces avec des tamis de filtre à 5-7m, 11-13m et 14-16m en dessous de la surface et équipés d'une paire d'optodes O₂ pour mesurer la distribution de l'oxygène. D'autres optodes furent installés à diverses profondeurs du puits d'exploitation (voir Fig. 14).

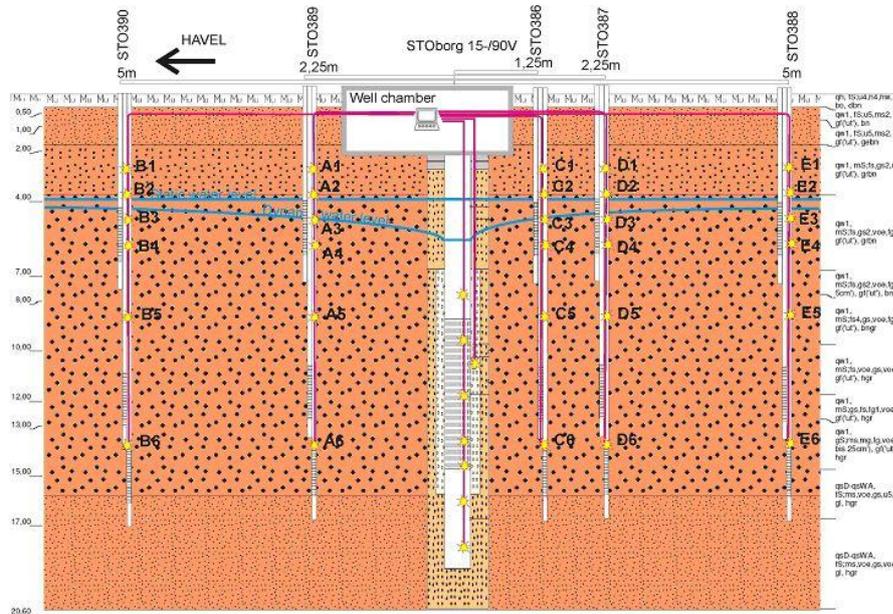


Fig. 14: Coupe transversale schématique du transect. Les points jaunes désignent les optodes installées pour mesurer l'oxygène [FUB 2008]

Les recherches sur le transect consistaient à une inspection télévisuelle, un essai de débit par paliers et une diagraphie géophysique de sondages sur le puits d'exploitation avant et après traitement au H₂O₂, et aussi de prélèvements hydrochimiques et microbiologiques du puits et des piézomètres.

5.1.2 Impacts de la fréquence de commutation (Option O2)

Surveillance à court terme des conditions géochimiques dans les puits d'exploitation

L'on a évalué l'impact de la fréquence de commutation en surveillant les variations à court terme des paramètres hydrochimiques pendant la phase initiale de pompage. Tous les 21 puits examinés étaient inclus. Pour assurer la comparabilité, l'on a mis au point un procédé d'échantillonnage fixe prévoyant:

- (1) L'arrêt du puits et les deux puits avoisinants pendant au moins une semaine avant la campagne de prélèvement
- (2) Le début des prélèvements et la mise en service du puits simultanés
- (3) L'intervalle de prélèvement d'un échantillon par minute pour les dix premières minutes, ensuite à 15, 20, 30 min, et enfin toutes les demi-heures
- (4) Poursuite des prélèvements jusqu'à ce que les conditions physicochimiques soient atteintes pour: pH (± 0.05), potentiel redox (± 10), O_2 ($=0$), conductivité (± 10), température (± 0.5), (variations sur une heure).

Conformément à ce procédé, les échantillons représentent:

- (1) L'état du puits à l'arrêt
- (2) La phase immédiate de démarrage
- (3) Les conditions après les premiers changements rapides dus à l'écoulement turbulent et au rabattement
- (4) L'état constant pendant la phase de service normale.

Résultats

En résumé des résultats de la surveillance à court terme, presque tous les puits accusaient des variations élevées pour plusieurs paramètres immédiatement après la mise en marche du puits. La teneur en particules et en fer dissous ainsi que les paramètres de terrain pH, potentiel redox, teneur en O_2 , conductivité et température semblent être particulièrement influencés par le nombre de commutations de la pompe.

Apport d'oxygène à proximité de puits

Les premiers travaux sur le transect se sont focalisés sur l'apport d'oxygène provoqué par l'oscillation de la nappe due à la mise en service du puits. C'est pourquoi l'on a réalisé un essai de pompage court (débit unique pour une durée de 3,5 h) sur le transect avec un relevé par optodes à l'intérieur de tous les puits d'exploitation et d'observation.

L'on a choisi une optode à 1.25 m de distance du puits à 5m de profondeur en dessous de la surface qui sera approfondi par la suite (optode C3 dans Fig. 14). Elle se trouve dans la zone saturée de la nappe dans des conditions hydrauliques statiques. En cours de phase de service du puits, elle s'assèche en raison de la formation du cône de dépression.

Résultats

Fig. 15 présente la concentration observée d'oxygène et le rabattement à l'optode C3 par rapport au temps après le début de l'essai de pompage. Pendant le pompage, la saturation en oxygène était constante à environ 70 % de saturation de l'air (par rapport à la saturation de l'air) ce qui correspond au développement d'une zone insaturée à proximité de l'optode.

Après l'arrêt de la pompe, le contenu en oxygène se baisse à un niveau de 10% environ. Cela correspond à une quantité d'oxygène résolue d'environ 1mg/l dans les eaux souterraines pouvant être détectée à proximité du puits encore trois heures après l'arrêt de la pompe.

Dans ces conditions hydrochimiques, la précipitation du fer résolu dans l'eau est encouragée. On peut donc supposer que la commutation fréquente des puits conduit à une entrée d'oxygène et peut ainsi contribuer au colmatage.

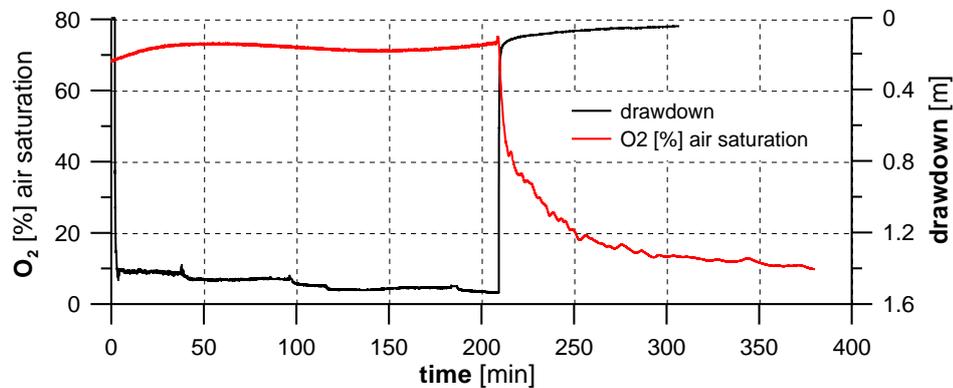


Fig. 15: Relevé de saturation en oxygène et de rabattement pendant essais de pompage courts au puits STOborg15 [FUB 2009]

Calcul de bilan massique pour les concentrations de fer:

Pour arriver à une estimation du potentiel de colmatage, l'on a quantifié la précipitation de l'ocre en comparant les concentrations de fer dans le puits de production avec celles de points de mesure sur la base d'un bilan théorique.

L'on a calculé les concentrations Fe pour le filtrat des berges et les eaux de la nappe pénétrant dans le puits de production. Dans un premier temps, l'on a déterminé les débits pour chaque sous zone du profil d'aquifère à partir des conductivités hydrauliques (voir

Fig. 16 à gauche). Ensuite, l'on a ajouté le ratio de mélange de différents types d'eau basé sur l'analyse des conductivités électriques et des données stables d'isotope.

Résultats

La caractérisation des concentrations Fe dans le puits et aux alentours est présentée à la

Fig. 16. Le ratio de mélange de filtrat de berges et d'eaux souterraines est 2:1. Les concentrations de fer mesurées dans les eaux de puits captées sont de l'ordre de 1.6 mg/l, alors que les concentrations de fer calculées s'écoulant vers le puits sont, elles, de l'ordre de 1.75 mg/l.

On constate que le calcul de bilan indique une perte d'environ 10%. Ce qui correspond à peu près à 7g de Fe par heure avec un débit total admis à 50m³/h.

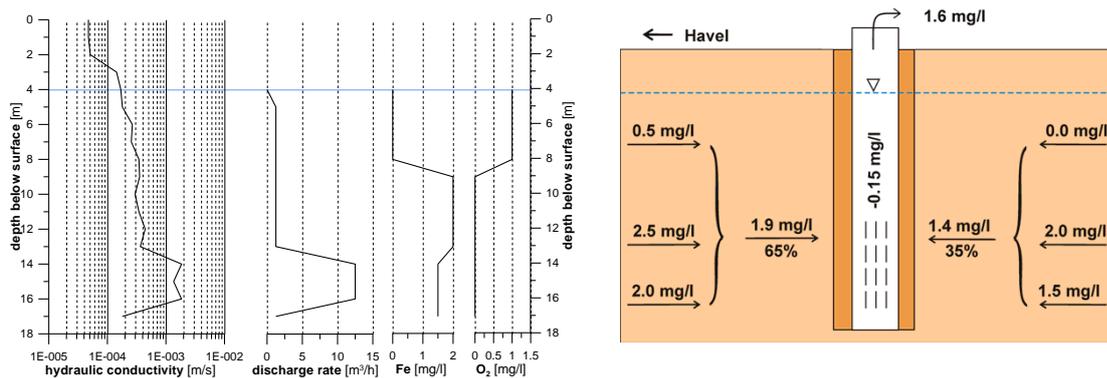
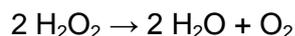


Fig. 16: Caractérisation de concentrations Fe des différentes couches de la nappe mélangées dans le puits STOborg15 [FUB 2009]

5.1.3 Impact du traitement H₂O₂

Méthode

Le peroxyde d'hydrogène est stable dans des conditions normales. Toutefois, la vitesse de réaction augmente soudainement en raison de la présence de catalyseurs Fe³⁺, Mn⁴⁺ ou Cu²⁺ dans la nappe. Dans le puits suite à une réaction catalytique, le peroxyde d'hydrogène inséré se dissocie en oxygène et eau.

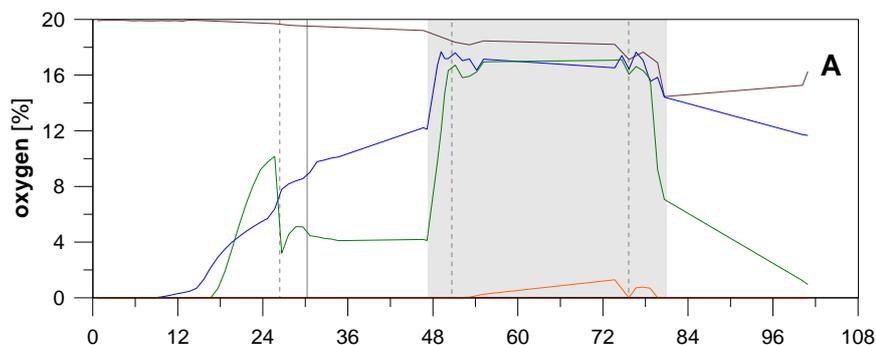


L'on a observé l'impact du H₂O₂ pendant et après le traitement dans le puits d'exploitation et les puits-témoins du transect. La quantité d'oxygène dégagée par la dissociation du H₂O₂ dans la zone saturée a été déterminée grâce aux optodes à oxygène.

Résultats

L'étude a mis en évidence un fort impact du traitement H₂O₂ sur les conditions physico-chimiques aux alentours du puits traité.

Toutes les optodes dans la zone saturée accusent une augmentation soudaine d'oxygène peu après l'intervention. Dans le puits d'exploitation on atteint jusqu'à 100% de saturation de l'air en quelques minutes après l'adjonction de H₂O₂ pour ensuite revenir peu à peu à un état partiellement stable. Dans les puits-témoins (Fig. 17), les relevés mettent en évidence des concentrations d'oxygène qui augmentent avec la durée de contact. Le démarrage des pompes a provoqué une baisse de l'oxygène par rapport au temps de marche.



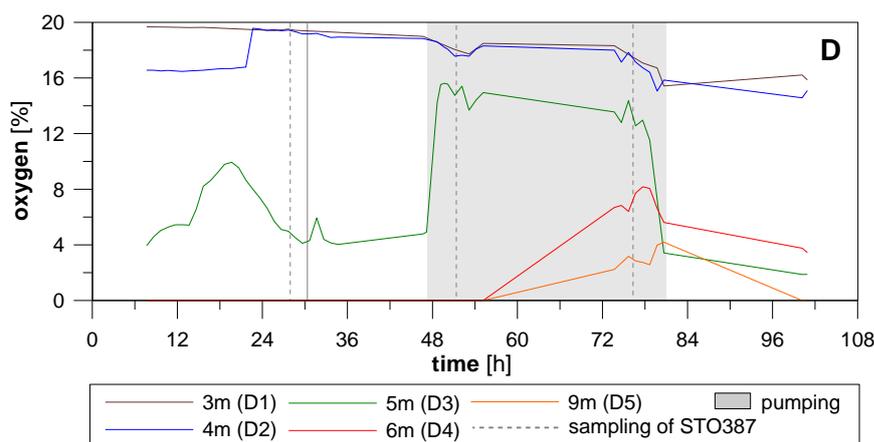


Fig. 17: Concentrations d'oxygène dans les puits-témoins A (2.25m vers le fleuve Havel) et D (2.25m vers la terre) [FUB 2009]

5.2 Conclusions et évaluation

5.2.1 Impact de la fréquence de commutation

Grâce à la **surveillance à court terme** il est apparu clairement que les conditions physicochimiques stables dans les puits n'étaient pas atteintes avant 120 minutes après le début de la mise en marche.

A des fins de comparaison des différents états et sites de puits, des prélèvements de puits en deux temps sont recommandés:

- Pour la caractérisation des conditions hydrochimiques initiales juste après le début du pompage, un échantillon devrait être prélevé pendant les cinq premières minutes de marche.
- Pour la caractérisation de conditions stables, un second échantillon devrait être prélevé après un minimum de 120 minutes de marche.

Les travaux sur le transect ont abouti à l'élaboration d'un modèle théorique **d'apport en oxygène lié à la mise en marche** décrit à la Fig. 18:

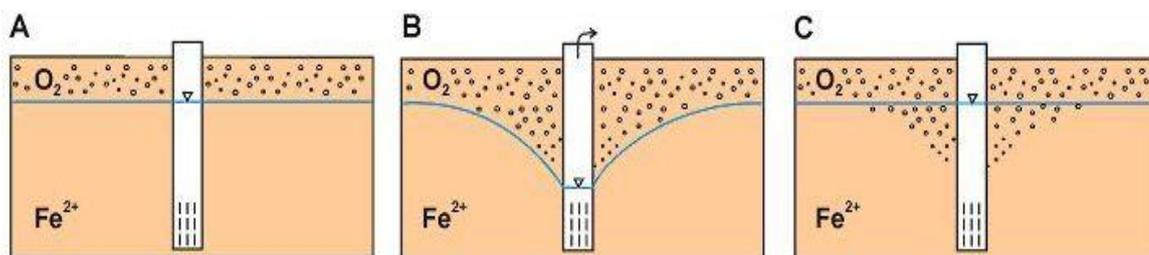


Fig. 18: Schéma de l'apport d'oxygène dû à l'occlusion d'air résultant de l'exploitation du puits [FUB 2009]

En phase de rabattement résultant de la mise en marche de la pompe, l'air pénètre le cône de dépression non saturé (Fig. 18B). Après l'arrêt de la pompe, le cône de dépression se remplit une fois de plus en capturant des bulles d'air qui subsistent dans les porosités (Fig. 18C). Désormais les gaz de ces bulles peuvent se dissoudre dans les eaux souterraines et pénétrer dans le puits pendant la prochaine mise en marche.

Ce processus se répète à chaque fois que le puits est mis en service et ensuite est arrêté. Ainsi, une mise en service fréquente des puits encourage, dans des conditions hydrochimiques décrites ci-dessus, la précipitation de fer dissous et le colmatage des puits.

Les résultats du **calcul de bilan massique du fer** donne une indication précieuse de l'ordre de grandeur des taux de précipitation Fe. La perte calculée de concentration de fer est en toute probabilité due à la précipitation d'hydroxydes de fer dans le puits et aux alentours.

5.2.2 Impact du traitement H₂O₂

Les relevés indiquent une dispersion en forme de champignon de l'oxygène dissocié de l'H₂O₂ (Fig. 19) lorsque le puits n'est pas exploité. L'allumage de la pompe provoque apparemment le déplacement d'oxygène dans les zones plus profondes de l'aquifère provoquant ainsi un changement des conditions physicochimiques.

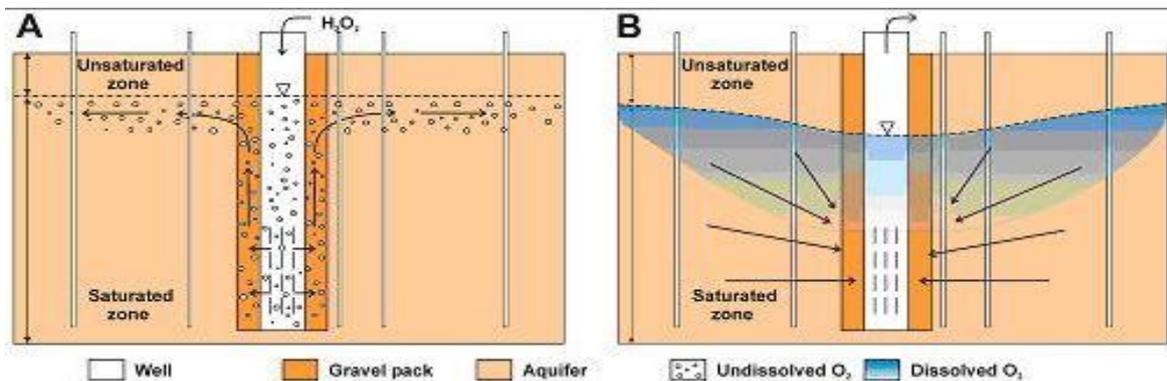


Fig. 19: Schéma de dispersion et distribution d'oxygène pendant (A) et après (B) traitement H₂O₂ [FUB 2009]

L'apport supplémentaire d'oxygène pourrait renforcer le colmatage biologique et chimique ce qui annule les bienfaits de la désinfection. Des travaux plus poussés, en particulier concernant le dosage et la fréquence de la mise en marche, seront nécessaires pour prouver cette thèse.

5.3 Recommandations

La fréquence de commutation de la pompe semble être un des facteurs cruciaux conduisant au processus de mélange, de fixation d'oxygène et donc à un potentiel accru de vieillissement. Ceci a déjà été pris en compte par la BWB qui partage les puits à partir de la survenance de dépôts visibles (inspection télévisuelle) entre ceux qui sont exploités en continu et ceux qui sont exploités périodiquement.

Toutefois, une quantification des effets des mises en marche et arrêts du puits dans le sens d'une évaluation du volume d'apport en oxygène et la cinétique des réactions suivantes n'a jamais été faite. Par conséquent, les travaux futurs dans le cadre du projet WELLMA2 devraient inclure:

- Des échantillonnages basés sur la profondeur pour évaluer les limites d'oxydoréduction
- Relevés d'optodes en ligne pendant le temps d'arrêt pour évaluer la distribution d'oxygène et la consommation ultérieure
- Calcul des indices de saturation et modélisation géochimiques pour quantifier les taux de précipitation
- Etudes hydrochimiques et microbiologiques pour comparer les puits mis en service régulièrement et les puits exploités en continu.

Par ailleurs, il faut envisager que les changements de mode d'exploitation peuvent entraver un processus et en encourager d'autres. Par conséquent, l'évaluation des impacts de commandes de marche/arrêt doit également tenir compte des avantages éventuels, par ex.:

- Modélisation des pointes maximales de vitesse d'écoulement pendant les commandes de marche/arrêt pour évaluer les efforts de cisaillement qui affectent (1) l'adhérence de biofilms aux surfaces et (2) la mobilisation particulaire

De plus, les avantages possibles de l'emploi de **pompes submersibles à commande de fréquence** devraient être évalués, sachant qu'elles peuvent éventuellement prévenir les fluctuations soudaines de la nappe phréatique. Grâce à ce genre de pompes, les changements de volume total capté dans une galerie de puits peuvent être distribués sur tous les puits d'une galerie, donnant seulement des variations mineures du niveau de la nappe dans les puits individuels. Ceci devrait être objet des travaux de recherche supplémentaires.

Pour obtenir une **analyse de concentration d'oxygène** fiable, des sondes d'oxygène basées sur les principes de mesure optique sont recommandées.

Ici les optodes installées sur le transect pourraient servir pour des mesures comparatives et permettre l'évaluation de la survenue d'impacts négatifs de l'exposition à long terme, par ex. le colmatage du capteur optique.

Particulièrement dans le cas du **traitement préventif au H₂O₂** , il semble qu'il y ait un écart entre la théorie et les observations dans la pratique.

Comme dit tantôt, le H₂O₂ est un désinfectant, mais il est aussi source d'oxygène. Pour évaluer plus avant les avantages du traitement préventif au H₂O₂, les recherches suivantes sont recommandées:

- Recherches en laboratoire avec des échantillons de dépôts et du H₂O₂: essai de dissolution
- évaluation en laboratoire de l'effet du H₂O₂ sur les microorganismes: efficacité de désinfection
- études en citerne et sur le terrain (transect) avec des concentrations et quantités différentes de H₂O₂: corrélation avec la gamme de distribution de l'oxygène

Par ailleurs, des puits de production de la BWB devraient être inclus, par ex. pour obtenir une comparaison de puits autrement identiques, avec un puits sous traitement et l'autre pas, ou bien évaluer l'impact d'interruption de traitement sur un ou deux puits aux schémas et paramètres d'exploitation identiques.

Chapitre 6

Recommandations pour une gestion de puits améliorée

6.1 Surveillance des puits

Comme dit dans tous les chapitres précédents, la gestion de puits repose sur une stratégie de surveillance et de diagnostic intégrée. Pour cette raison, les recommandations les plus importantes visent l'optimisation de la **surveillance et du diagnostic**:

- les campagnes de mesure régulières conformément à une procédure standardisée (stratégie de surveillance),
- le traitement et l'analyse de données, et
- la mise à jour de la stratégie de surveillance

Seulement une surveillance bien projetée avec un traitement des données et l'analyse subséquent permet de comprendre les processus, les interactions et de découvrir les options pour une exploitation de puits améliorée.

Une telle stratégie de surveillance doit être développée conjointement avec d'autres évaluations statistiques en coopération étroite avec les opérateurs de puits.

Les résultats de l'analyse statistique réalisée dans le cadre de WELLMA1, résumé au chapitre 3, confortent ce constat:

En général, il est utile de réduire la variabilité des données en effectuant **des mesures plus précises et comparables**. Certes, il ne sera pas toujours possible de transformer les stratégies de mesure dans le court terme. Mais, dans le long terme, il s'avèrera précieux d'appliquer la même technique de mesure pour tous les paramètres. A titre d'exemple, prenons le relevé automatique des heures de service et le débit total.

Par ailleurs, il semblerait utile d'entreprendre une **validation finale des paramètres** d'exploitation, Δh , heures de service, et débit total. La réduction de variabilité des données augmentera le degré de comparabilité et, ainsi, le lien avec la tendance au colmatage.

Il est fortement recommandé d'élaborer une **matrice détaillée pour évaluer l'état du puits par inspections télévisuelles**, car ceci permettra une description systématique de l'état du puits comme paramètre précieux pour des analyses de données comparables futures. A l'heure actuelle, le classement se fait en quatre stades de colmatage et ne permet pas de distinguer les types et les emplacements d'incrustations. On peut supposer qu'un code plus détaillé révélerai une meilleure corrélation avec les données de performance de puits. Nous recommandons une matrice avec classement de l'intensité des dépôts visibles combiné avec un classement des emplacements des dépôts en distinguant les trois possibilités: tamis, pompe ou colonne montante, et tubage du puits. Ces classements doivent être évalués une fois sur le terrain. Le rapport de travail inclut plus de détails comme la couleur et la structure des dépôts, tandis que la banque de données n'a pu enregistrer qu'un index des classements. Le développement définitif d'une matrice doit se faire en coopération avec des experts des services techniques, c'est à dire les agents responsables de l'exécution des inspections télévisuelles.

Le paramètre Q_s est encore considéré comme le meilleur paramètre de surveillance opérationnel mais sa mesure pourrait être améliorée pour qu'il soit comparable.

Dans le cadre de WELLMA-1, KWB et FU Berlin ont préconisé **l'enregistrement numérique des essais de pompages initiaux** pour les données de puits berlinois. A l'avenir, ces données seront disponibles et permettront une évaluation plus détaillée du débit spécifique Q_s des puits individuels. En outre, cela permet de vérifier après coup si les conditions hydrauliques dans l'aquifère sont captives ou non. L'examen des données françaises met en évidence la valeur d'une telle évaluation.

Dans le meilleur des cas, **les essais de pompage** doivent se faire **pendant la même période et à débit égal** pour être comparable. Qui plus est, des mesures plus régulières de Q_s pour les puits berlinois – comme en France - serait un atout. Les variations de valeurs singulières peuvent ensuite être compensées par une analyse des tendances pendant la période correspondante.

L'idée est de **combinaison des mesures Q_s avec une matrice de classement moyennant des inspections télévisuelles** pour obtenir à l'avenir un bilan de puits optimisé.

Les essais sur le terrain réalisés dans le cadre du projet WELLMA1 ont montré que seule une combinaison de méthodes permet un dépistage et diagnostic précoces des processus de vieillissement. L'application des méthodes décrites ci-dessus a mis en évidence qu'il existe encore les possibilités suivantes d'améliorer les approches méthodologiques de la surveillance de puits:

- Outre les essais de débit par palier, le bilan initial du puits (en début de service) doit comprendre des analyses GG.D, FLOW et Packer-FLOW pour établir l'état initial du filtre à gravier et faciliter une évaluation ultérieure de la porosité et perméabilité afin de différencier les distributions d'extraction d'eau induites par des facteurs géologiques et la détérioration liée aux processus de vieillissement du puits (dépôts dans le filtre à gravier).
- Les essais de pompage courts sont appropriés dans le cadre d'un suivi de routine de la performance du puits à condition qu'ils soient faits à débit et durée constante (par puits).
- Les essais de pompage par paliers enchaînés apportent les informations nécessaires pour contrôler les méthodes d'assainissement. Ils doivent être réalisés à des taux et durée de pompage spécifiés pendant la série d'essais initiaux qui ont suivi la construction.

Seuls le relevé continu ou périodique et le traitement de données bien projeté assurent un dépistage précoce des détériorations.

Avant toute chose, il faut fixer une valeur de référence qui déclenche une intervention. Celle-ci pourrait correspondre, soit à un rabattement du niveau d'eau toléré maximal (pour un débit spécifique), Δh ou recul de performance, soit simplement à la présence de dépôts colmatants (ou corrosion etc.) décelés pendant une inspection télévisuelle.

Plus on commence tôt avec les contre-mesures, plus les chances de réussir et la durabilité seront grandes. C'est pourquoi, un **programme de surveillance** doit être mis au point en tenant compte de la **valeur de référence** identifiée (s'il n'y a pas de relevé continu) pour déterminer la **performance du puits** ainsi que des examens supplémentaires périodiques afin d'évaluer **l'état du puits**.

6.2 Exploitation des puits

Vu les résultats de l'analyse des données du schéma et d'exploitation de puits, il est recommandé d'**éviter de construire des puits avec des filtres de moins de 20 m en dessous de la surface supérieure du sol.**

Par ailleurs, **des heures de service et un débit total moyen moins élevés** semblent favorables à la réduction des charges de fer, manganèse et nutriments pour le puits individuel. De plus, cela restreint la variabilité des conditions d'exploitation.

Toutefois, les relations observées méritent un examen plus poussé.

6.3 Construction des puits

Pour ce qui est du **schéma et de la construction de puits**, l'analyse statistique a livré une recommandation:

- La partie supérieure de la crépine devrait se situer à 20m en dessous de la surface.

Cette mesure contribue, en outre, à une meilleure protection contre la contamination par agents pathogènes, comme le conclut l'étude bibliographique pour la tâche n° 4 (voir le rapport circonstancié sur la contamination bactérienne). Voilà pourquoi ceci a déjà été prévu dans les critères de conception de puits développés par la BWB.

Lors du récent examen de littérature, l'on a relevé des approches intéressantes concernant (1) le schéma de puits et (2) une meilleure accessibilité des méthodes d'assainissement qu'il s'agit d'évoquer à ce stade:

1. Le recours aux billes de verre dans les massifs filtrants (Ochs Bohr GmbH, Nürnberg): les avantages sont une distribution granulométrique et, ainsi, une porosité homogènes, une meilleure résistance à l'abrasion et à la fracturation, l'absence d'impuretés (particules trop petites, composés organiques), des surfaces plus lisses inhibant l'adhésion de biofilms ou de précipités

Il faudra examiner plus avant les avantages et faire une évaluation des propriétés colmatantes et comportement des billes pendant l'assainissement.

Il faudra discuter avec le personnel technique de BWB and Veolia de l'inclusion éventuelle de travaux sur le terrain pour mettre ces méthodes à l'épreuve dans le cadre de WELLMA2.

2. L'utilisation de la chambre d'équilibre dite à double symétrie (Symmetrical double surge chamber, GCI et Pigadi, Berlin): Un dispositif nouveau d'aménagement de puits et de dessablage a été développé à partir de résultats d'essais de modélisation de mécanique des fluides numérique et d'essais sur le terrain. Il a pour avantage d'améliorer le rayon d'action et d'obtenir des vitesses d'écoulement plus élevées et l'activation complète de filtres à gravier artificiel jusqu'à l'aquifère à proximité du puits.

Comme ce dispositif a été élaboré en collaboration avec Pigadi, il a déjà été mis à l'essai dans des puits de la BWB. Le transfert de résultats et un accompagnement scientifique éventuel d'essais sur le terrain plus poussés dans le cadre du projet WELLMA sont des thèmes à aborder avec la BWB et Pigadi.

3. L'aménagement des nouveaux puits avec des trous "satellites" dans le périmètre de l'aquifère proche pour injecter des agents chimiques à partir de l'extérieur du puits (HOWSAM 1995). L'avantage en est un plus grand gradient hydraulique vers le puits. Les agents chimiques s'attaqueront d'abord à des colonies colmatantes jeunes et, donc, moins résistantes à l'extérieur et pourront ensuite mieux progresser vers le puits.

Comme la BWB n'utilise pas de méthodes de régénération chimiques, cette approche ne sera pas retenue pour des travaux sur le terrain ultérieurs ou l'élaboration de consignes de construction de puits pour Berlin. Toutefois, cette possibilité serait envisageable dans le cadre de la construction d'un nouveau puits en France.

6.4 Transfert de R & D

Pour mieux cerner la problématique du colmatage de puits, il semble opportun d'observer tout particulièrement les paramètres de colmatage retenus: **profondeur du premier filtre, débit total moyen, concentrations de fer et âge du puits.**

Pour *WELLMA-2*, il est donc proposé

- (1) d'examiner si les puits peu profonds ont une tendance au colmatage plus grande. A cette fin, on analysera des puits de construction et d'exploitation similaires mais présentant des **différences de profondeur du premier filtre**. Une analyse de données complémentaire de cette corrélation est recommandée pour les cas déviants identifiés (c'est-à-dire, les puits qui ne présentent pas d'indices de colmatage malgré que leur filtre soit proche de la surface et vice versa).
- (2) Une seconde suggestion vise à sélectionner deux puits présentant une **différence significative de débit moyen** mais de construction et schéma de fonctionnement semblables. Pour vérifier l'hypothèse qui veut que les puits à débit moyen plus élevé tendent plus au colmatage, le puits à débit moyen moins élevé doit être *non colmaté* et celui à haut débit *colmaté*. Une analyse des cas déviants serait également opportune.
- (3) Troisièmement, il est proposé d'étudier les contraintes d'exploitation sur les puits liées à la **fréquence de commutation** (ndt : la fréquence de commutation correspond au cycle de commandes de marche/arrêt de la pompe). Pour ce faire, deux puits à débit égal seront sélectionnés. L'un sera mis en route très fréquemment et l'autre le moins possible. Celui à fréquence de commutation élevé est sensé subir un colmatage intense. Alors que l'autre ne doit pas présenter de colmatage. Ce travail sera accompagné d'une analyse des cas déviants.
- (4) Etant donné que les contraintes d'exploitation sont aussi provoquées par des vitesses d'écoulement élevées, qui, à leur tour, sont tributaires du ratio débit/aire d'alimentation (longueur de crépine), deux autres puits seront sélectionnés pour examiner les liens de causalité entre colmatage et les différentes vitesses d'écoulement.

Ici, des échantillons seront prélevés sur deux puits avec soit la même fréquence de commutation et le même débit moyen mais des longueurs de filtre, ou un rendement de la pompe différents. Le puits à filtre court (ou au débit de pompage élevé pour la même longueur de filtre) est supposé être plus susceptible au colmatage en raison de la vitesse accrue d'écoulement et, par là, de contraintes plus élevées que celui avec le filtre plus long.

- (5) De plus, un **enregistrement de la teneur en fer, manganèse, nitrate et en l'oxygène** en fonction de la profondeur dans le puits et son bassin versant : Ceci comportera des prélèvements en amont et dans le puits afin de pouvoir calculer les bilans massiques hydrochimiques.
- (6) Enfin, la pertinence de l'**âge du puits** doit être soumise à une analyse de données qui fournira des cohérences entre les matériaux de construction et le mode de fonctionnement.
- (7) A l'heure actuelle, les inspections télévisuelles systématiques ne livrent que des informations statiques datant de la dernière inspection. Pour aller plus loin, les **séries chronologiques de toutes les inspections télévisuelles** devraient être saisies dans la banque de données afin d'utiliser le taux de colmatage pour différencier les puits.

La présente analyse met en évidence qu'il est préférable de se concentrer sur un petit nombre de séries de données bien définies afin de réduire la variabilité des données. Par conséquent, il semble opportun d'inclure uniquement les puits pour lesquels de nombreuses données d'inspections télévisuelles sont disponibles. Par la suite, l'importance de toute tendance identifiée pourra être vérifiée par rapport à un ensemble de données plus vaste que cela n'a été le cas pendant nos présents travaux d'analyse.

On peut analyser ultérieurement si les différents facteurs de colmatage correspondent bien à des états type, à des schémas types de construction ou d'exploitation de site. Plus d'information précise sur les processus de colmatage et leur différenciation permettra d'améliorer le mode de gestion du puits.

Par ailleurs, les enregistrements des dépôts colmatants visibles peuvent être comparés aux mesures Qs, car l'inconvénient des inspections télévisuelles comme outil de diagnostic est que cela n'est utile que pour les dépôts visibles.

Une meilleure connaissance du contrôle du colmatage signifie moins d'interaction multivariable de tous facteurs déterminants. Ceci peut rivaliser avec les intérêts technico-commerciaux d'exploitation d'un puits. C'est pourquoi la mise en œuvre de toutes recommandations de surveillance, diagnostic et de recherches plus détaillées doit être examinée en étroite collaboration avec les opérateurs.

Des recherches plus poussées sur le terrain doivent porter sur:

(1) La validation de méthode

- L'évaluation de l'application de Δh et la combinaison de mesures Qs et inspections télévisuelles pour juger du degré de vieillissement et emplacement des dépôts
- Calculs d'entrées-sorties pour les concentrations de fer et d'oxygène dans le puits et les environs pour déterminer les taux d'accumulation ferrique

Le développement technique du dispositif de prélèvement de carottes horizontales devrait être continué, pour valider les méthodes géophysiques et mesures de particules à l'aide de ct-scans de ces carottes.

(2) L'élaboration de méthode

- Echantillonnage basé sur la profondeur pour calculer les zones de transition redox dans le puits avant le brassage

- Examen combiné par microscopie et méthodes moléculaires (DGGE et PCR) des échantillons de dépôts et biofilms pour mettre au point un outil moléculaire facile à utiliser et basé sur qPCR pour quantifier la présence de ferrobactéries
- Caractérisation minéralogique et microbiologique d'échantillons de dépôts pris à profondeur différente dans le puits (ex. pompe, tubage, haut du filtre, bas du filtre)
- Combinaison progressive des analyses Qs et l'élimination des dépôts pour déterminer leur part dans la perte de performance totale

Des essais de débit par paliers, ou, au moins, essais de pompage courts à débit fixe doivent être exécutés lors de relevés de routine dans tous les puits, afin que les données soient disponibles dans les fichiers de puits.

(3) Transfert de connaissance

- Corrélations entre les communautés de bactéries et conditions de vie dans le puits (caractérisation géochimique)
- Corrélations entre l'apparence et le degré de colmatage, et entre les matériaux de construction des puits ainsi que les différentes communautés de bactéries.