

Mai.
2018

ETUDE DES RISQUES DE COLMATAGE ET OPTIMISATION DES PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DOUBLETS GÉOTHERMIQUES

Projet Geoclogging
Guide d'aide à la décision

Livrable Tâche 5

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

En partenariat avec : Université Rennes 1, Antea Group, Sanfor

UNIVERSITÉ DE
RENNES 1


anteagroup

Sanfor


Forage d'Eau & Géothermie

REMERCIEMENTS

Le consortium Géoclogging remercie Mme Astrid Cardona-Maestro qui a été la correspondante ADEME du projet.

CITATION DE CE RAPPORT

Burté Luc, Baranger Catherine, Aquilina Luc, Le Borgne Tanguy, Farasin Julien, Gérard Marie-Françoise, Quentin Courtois, Tristan Babey, Sancier Gérald. 2018. Etude des risques de colmatage et optimisation des processus de traitement des doublets géothermiques. 72 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2013/30/010

Étude réalisée par Burté Luc, Baranger Catherine, Aquilina Luc, Le Borgne Tanguy, Farasin Julien, Gerard Marie-Françoise, Quentin Courtois, Tristan Babey, Sancier Gérald pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Luc Aquilina
Appel à projet de recherche : INTOPNER 2013-30

Coordination technique - ADEME : Cardona-Maestro Astrid
Direction/Service : Réseaux et Energies Renouvelables



TABLE DES MATIERES

1.	Contexte et objectifs.....	6
2.	Architecture du guide	6
3.	Synthèse des connaissances sur le risque de colmatage des doublets géothermiques sur nappes superficielles.....	7
3.1.	Typologie des phénomènes de colmatage recensés.....	7
3.1.1.	Colmatage biochimique (oxydation du fer et du manganèse)	8
3.1.2.	Colmatage biologique	11
3.1.3.	Colmatage chimique (précipitation de carbonate de calcium CaCO_3)	12
3.1.4.	Colmatage physique (ou particulaire)	13
3.1.5.	Synergie entre processus de colmatage principal et secondaire	15
3.2.	Impacts des processus de colmatage sur le fonctionnement de la boucle géothermale.....	17
3.2.1.	Impacts du colmatage biochimique (Fer/Manganèse).....	17
3.2.2.	Impacts du colmatage biologique	19
3.2.3.	Impacts du colmatage chimique par précipitation de carbonate de calcium	19
3.2.4.	Impacts du colmatage physique	20
3.3.	Les facteurs de risque contrôlant l'apparition des phénomènes de colmatage	22
3.3.1.	Colmatage biochimique (fer - manganèse).....	22
3.3.1.1.	Facteur de risque relatif aux échanges masse d'eau superficielle/aquifère en nappe alluviale	23
3.3.1.2.	Facteur de risque relatif à la stratification redox initiale de l'aquifère.....	24
3.3.1.3.	Facteur de risque relatif à l'existence d'une pollution anthropique de l'aquifère.....	24
3.3.1.4.	Facteur de risque relatif aux échanges atmosphère – eau souterraine dans le forage de pompage.....	25
3.3.1.5.	Facteur de risque relatif à la conception	26
3.3.2.	Colmatage biologique	26
3.3.3.	Colmatage chimique lié au carbonate de calcium	26
3.3.4.	Colmatage particulaire	27
3.3.4.1.	Facteur de risque relatif à l'hétérogénéité de l'aquifère et à la vitesse de circulation	27
3.3.4.2.	Facteur de risque relatif aux caractéristiques de la charge particulaire	27
3.3.4.3.	Facteur de risque relatif au pompage discontinu	27
4.	Présentation de l'outil d'aide à l'évaluation et la gestion des risques de colmatage ARCADE	29
4.1.	Méthodologie de l'évaluation qualitative.....	29
4.2.	Méthodologie de l'analyse semi-quantitative.....	30
4.3.	Présentation de l'interface ARCADE	31
4.3.1.	Evaluation qualitative	31
4.3.2.	Evaluation semi-quantitative	32
5.	Préconisations relatives à l'acquisition des données pour l'évaluation des risques de colmatage	35
5.1.	Caractérisations des paramètres physico-chimiques et chimiques ainsi que de la charge particulaire de l'eau.....	35



5.1.1.	Paramètres à déterminer et méthodologie	35
5.1.2.	Méthodologie de détermination des hétérogénéités géochimiques verticales du forage de pompage	37
5.1.2.1.	Etape 1 : Mesures en condition dynamique (en pompage).....	38
5.1.2.2.	Etape 2 : Mesures en condition statique (après période de repos de quelques heures)	39
5.2.	Caractérisations des paramètres bactériologiques	41
5.3.	Caractéristiques hydrogéologiques à considérer pour l'évaluation du risque de colmatage ...	41
5.4.	Caractéristiques hydrodynamiques des ouvrages à considérer pour l'évaluation du risque de colmatage	41
6.	Prévention des risques de colmatage des doublets géothermiques sur nappes superficielles.....	42
6.1.	Prévention des risques de colmatage au stade des études de faisabilité.....	42
6.2.	Prévention des phénomènes de colmatage au stade de la conception.....	43
6.3.	Prévention des phénomènes de colmatage lors des travaux, des essais et en phase d'exploitation.....	46
6.4.	Les principales techniques préventives.....	49
6.4.1.	Système de rétro-lavage des forages d'injection.....	50
6.4.2.	Mise en place d'un système de prélèvement sous packer au niveau du forage de production	53
6.4.3.	Installation d'un système de microfiltration autonettoyant	55
6.4.3.1.	Filtres HECTRON (filtration de surface)	56
6.4.3.2.	Filtre AMIAD AMF (Filtration en profondeur).....	56
6.4.4.	Dispositif électromagnétique.....	59
7.	Les recommandations pour le suivi du doublet géothermique en phase d'exploitation	61
7.1.	Suivi des paramètres hydrodynamiques	61
7.2.	Suivi chimique et bactériologique de l'eau du circuit primaire de la boucle géothermale	63
8.	Récapitulatif des bonnes pratiques pour chacune des typologies de colmatage	64
9.	Conclusion - Perspectives.....	66
	Références bibliographiques	67
	Index des tableaux et figures	70
	Sigles et acronymes	72



RESUME

La pérennité des doublets géothermiques sur aquifères superficiels qui jouent un rôle important en France pour le chauffage, le rafraîchissement et la production d'eau chaude sanitaire des bâtiments est conditionnée entre autres par la possibilité de pouvoir garantir dans le temps la production puis la réinjection de l'eau souterraine. Le colmatage de la boucle géothermale en particulier des échangeurs et des forages, notamment d'injection, est un problème majeur qui affecte de nombreuses installations sur l'ensemble du territoire français et remet en cause leur viabilité technico-économique. Le projet Geoclogging, s'inscrit dans le cadre de cette problématique et a pour objectifs d'identifier les processus en jeu, d'en caractériser les paramètres influents, de construire un outil d'analyse des risques et de définir des recommandations et méthodes préventives à l'usage des professionnels. Les connaissances acquises dans le cadre de ce projet ont permis de construire un outil d'analyse du risque ARCADE réservé à l'usage des professionnels qui intègre deux niveaux du risque, l'un qualitatif et l'autre semi-quantitatif. En complément, le projet a permis d'aboutir à la définition de recommandations et mesures préventives basées sur les résultats des travaux scientifiques, la littérature, les pratiques dans le domaine du forage d'eau et du stockage de chaleur en aquifères ainsi que sur les retours d'expérience des partenaires du projet. L'ensemble des résultats du projet est valorisé dans ce rapport qui constitue un guide d'aide à la décision. Ce guide complet qui comprend à la fois un outil d'analyse des risques ainsi que des recommandations et méthodes préventives intégrant les contraintes technico-économiques et environnementales des projets de géothermie sur aquifères superficiels est un véritable outil d'aide à la décision qui donne aux professionnels les clés pour juger de la viabilité technico-économique d'un projet à tous les stades de sa vie. L'outil ARCADE sera disponible en ligne sur la plateforme web Géothermie-Perspectives (www.geothermie-perspectives.fr), site de référence exclusivement dédié à la géothermie. L'outil ARCADE a vocation à être évolutif et s'enrichir avec les retours d'expérience des utilisateurs qui pourront s'ils le souhaitent mutualiser leurs données.

ABSTRACT

The sustainability of geothermal systems using shallow aquifers for heating, cooling and hot water production depends on the possibility to ensure, over long time-scales, the production and the reinjection of groundwater in the aquifer. Clogging of the geothermal loop, in particular the exchanger and the wells (mainly injection one) is a main issue for numerous operations in France affecting their technical and economic viabilities. The Geoclogging project aims at 1) characterizing the different clogging processes, 2) defining the main parameters which control them, and 3) building a risk analysis tool and defining recommendations and specific preventive methods. The knowledge gained during the project allowed building a specific clogging risk analysis tool called ARCADE devoted to sector professionals. It is based on two types of risk evaluation, a qualitative one and a semi-quantitative one. Furthermore, the different tasks of Geoclogging led to the definition of some recommendations and preventive methods based on the results of the project, the literature, the good practices, but also on the feedbacks and expertise of the project partners. All the results of Geoclogging are valorized in this document which is decision-making guide. This complete guide including a clogging risk analysis tool but also some recommendations and preventive methods integrating the technical, economic and environmental constraints of geothermal operations on shallow aquifers, is indeed a real decision-making tool giving all the keys to evaluate the technical and economic feasibility of a project at all its stages. ARCADE will be available on the French web site Géothermie-Perspectives (www.geothermie-perspectives.fr), dedicated to geothermal energy. This tool is built to be upgraded and to evolve over time with the feedback of the users who will have the opportunity to share their data.



1. Contexte et objectifs

La géothermie très basse énergie (profondeur inférieure à 100 m) joue un rôle important pour le chauffage et le rafraîchissement des maisons individuelles, de l'habitat collectif et du tertiaire. Plusieurs technologies sont envisageables parmi lesquelles celle sur nappes superficielles avec pompes à chaleur qui peut être mise en œuvre sur tout le territoire français lorsque la ressource en eau est disponible. En puissance installée, cette forme de géothermie représente en 2015 22,4 % du marché de la géothermie très basse énergie toutes techniques confondues (AFPG, 2015). La pérennité des installations de pompes à chaleur sur aquifères superficiels est conditionnée entre autres par la possibilité de pouvoir garantir dans le temps la production puis la réinjection de l'eau souterraine. Le colmatage de la boucle géothermale en particulier des échangeurs, des forages, notamment d'injection, est un problème majeur qui affecte de nombreuses installations sur l'ensemble du territoire français et remet en cause leur viabilité technico-économique. Le projet Geoclogging s'inscrit dans le cadre de cette problématique et a pour objectifs d'identifier les processus en jeu, d'en caractériser les paramètres influents, de construire un outil d'analyse des risques et de définir des recommandations et méthodes préventives. L'ensemble de ces éléments est récapitulé dans un guide d'aide à la décision, objet de ce rapport.

Ce guide d'aide à la décision, destiné à l'usage des professionnels a pour objectif de donner aux porteurs de projet, aux bureaux d'études et exploitants, des recommandations visant à fiabiliser et pérenniser les installations à toutes les étapes de leur vie depuis l'étude de faisabilité jusqu'à leur exploitation en passant par l'ingénierie de conception. Il intègre la présentation d'un outil d'analyse du risque de colmatage spécifiquement développé dans le cadre de ce projet et qui sera mis en ligne sur la plateforme Géothermie Perspectives co-animée par le BRGM et l'ADEME. Ce guide complet qui comprend à la fois un outil d'analyse des risques ainsi que des recommandations et méthodes préventives intégrant les contraintes technico-économiques et environnementales des projets de géothermie sur aquifères superficiels est un véritable outil d'aide à la décision qui donne aux professionnels les clefs pour juger de la viabilité technico-économique d'un projet à tous les stades de sa vie.

2. Architecture du guide

Dans une première partie, le guide d'aide à la décision dresse une synthèse des connaissances sur le risque de colmatage des doublets géothermiques sur nappes superficielles. Cette synthèse expose les différentes typologies des phénomènes de colmatage recensés ainsi que les facteurs de risque. Il permet ainsi de définir les différents contextes favorables ou sensibles vis à des phénomènes de colmatage.

En seconde partie, l'outil d'analyse des risques de colmatage ARCADE est présenté. Cet outil propose deux niveaux d'évaluation du risque. Le premier, qualitatif, se base sur l'analyse de retours d'expériences en France dans différents contextes hydrogéologiques. Le second, semi-qualitatif, évalue le risque au regard des paramètres chimiques, bactériologiques, hydrogéologiques et des conditions d'exploitation propres à chaque projet.

En troisième partie, sont présentées des préconisations pour l'acquisition des données nécessaires à l'évaluation des risques de colmatage.

En quatrième partie, ce guide expose les méthodes et préconisations pour la prévention des risques de colmatage pouvant s'appliquer aux différentes étapes du projet (études, réalisation des forages, exploitation).

En cinquième partie, sont formulées des recommandations pour le suivi d'un doublet géothermique sur nappe superficielle en phase d'exploitation.



Enfin, la dernière partie dresse une synthèse des bonnes pratiques à mettre en œuvre pour chacune des typologies de colmatage.

3. Synthèse des connaissances sur le risque de colmatage des doublets géothermiques sur nappes superficielles

Cette synthèse fait le point des connaissances sur les phénomènes de colmatage recensés dans le cadre du projet Geoclogging. Ces connaissances sont issues :

- Des retours d'expérience de fonctionnement des doublets géothermiques dans différents contextes hydrogéologiques ;
- De la synthèse de la littérature internationale sur la problématique de colmatage des forages d'eau (production d'eau potable, recharge artificielle de nappe, géothermie sur nappe, ...).

3.1. Typologie des phénomènes de colmatage recensés

Les problèmes de colmatage impactant le fonctionnement des doublets géothermiques sur nappes superficielles (Figure 1) font appel à différents processus physiques ou biochimiques variables suivant la typologie de l'aquifère rencontré :

- Biochimique (précipitation chimique du fer et/ou du manganèse pouvant être activée par des processus bactériens) ;
- Biologique (formation de biofilm lié à l'activité des bactéries) ;
- Chimique (précipitation chimique de carbonate de calcium) ;
- Physique (colmatage particulaire).

Les colmatages d'installations liés à la formation d'autres phases minérales telles que la halite (Hesshaus et al., 2013), la barite (Bozau et al., 2015; Regenspurg et al., 2015) ou l'anhydrite (Wagner et al., 2005), ne sont pas traités dans ce guide car non rencontrés dans le contexte de la géothermie très basse énergie sur nappes superficielles.

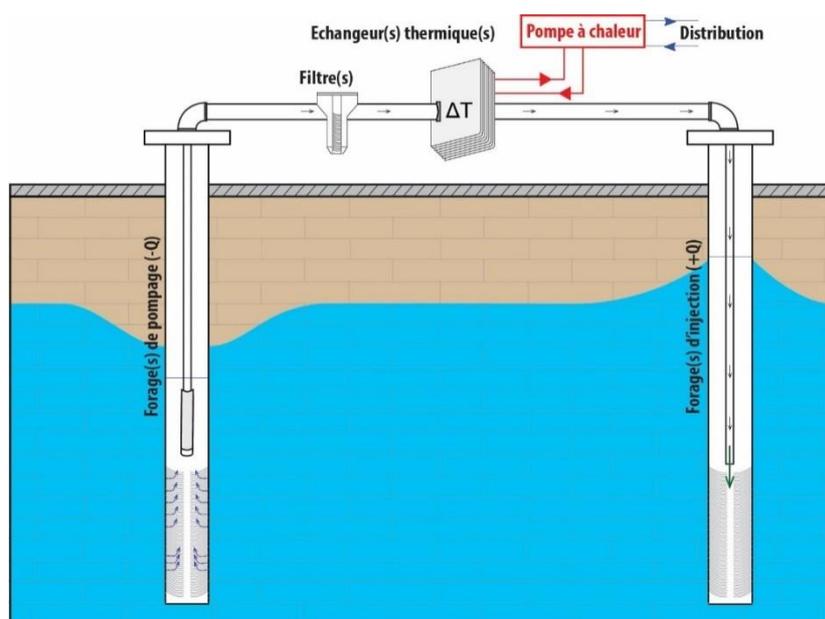
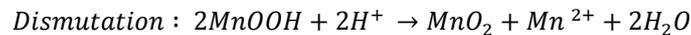
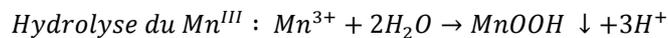
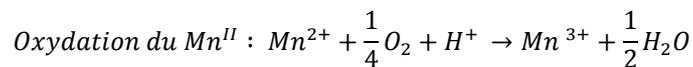
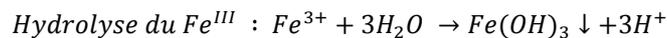
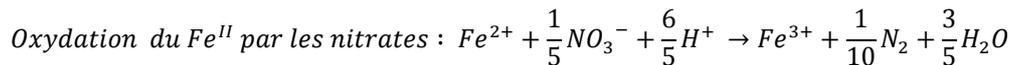
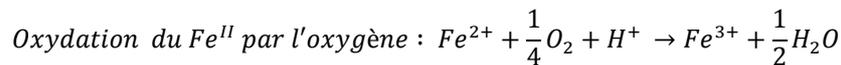


Figure 1 :Schéma conceptuel d'un doublet géothermique sur nappe superficielle. Le rejet peut également être effectué en surface (rivière ou lac)

3.1.1. Colmatage biochimique (oxydation du fer et du manganèse)

L'accumulation de dépôts induit par les processus biochimiques de précipitation d'oxydes de fer et de manganèse est le type de colmatage le plus observé en forage d'eau (Bustos Medina et al., 2013; Houben, 2004, 2003; Menz, 2016; van Beek et al., 2017; Weidner, 2016) et en particulier pour les doublets géothermiques (Possemiers et al., 2016; Vetter et al., 2012).

Les phénomènes d'oxydation font appel très généralement à des processus chimiques qui surviennent lorsque les ions fer et/ou manganèse, existant naturellement à l'état réduit (Fe^{2+} et Mn^{2+}) dans l'eau souterraine, sont mis en contact avec des espèces oxydantes (oxygène O_2 , nitrates NO_3^-).



Les oxyhydroxydes générés par ces réactions sont insolubles et présentent un pouvoir colmatant important. En milieu neutrophile et microaérophile, et en présence d'ions fer (Fe^{2+}) et manganèse (Mn^{2+}), des bactéries (FeOB = Bactéries ferro-oxydantes, MnOB = Bactéries mangano-oxydantes) peuvent activer les processus d'oxydation du fer et du manganèse et participer à la production de dépôts colmatants riches en exopolysaccharides (EPS) qu'elles sécrètent conférant aux dépôts un aspect mucilagineux. Parmi les nombreuses espèces de bactéries capables d'oxyder le fer, les bactéries FeOB de type *Gallionella sp.*, reconnaissables par les structures en forme de gaine torsadée d'oxydes de fer ainsi que les bactéries de type *Leptothrix sp.* reconnaissables par les structures en forme de tube allongé (Figure 2) sont les plus rencontrées et étudiées (Kappler et al., 2016). En consommant l'oxygène qu'elles utilisent comme accepteur d'électrons, ces deux types de bactéries tirent leur énergie en oxydant le fer réduit (Fe^{2+}) en fer ferrique (Fe^{3+}) conduisant à la formation d'hydroxydes de fer $Fe(OH)_3$ amorphes et forment un biofilm constitué de ces gaines d'hydroxydes de fer et d'EPS (Figure 3). La formation de ce biofilm induit alors un colmatage significatif des organes de la boucle (Figure 4). Les récentes études démontrent que certaines bactéries sont capables d'oxyder le fer par réduction des nitrates (Klueglein and Kappler, 2013; Wang et al., 2017). Ces bactéries se retrouvent principalement dans les dépôts et sont souvent non décelées dans les échantillons d'eau car elles sont sessiles et se fixent préférentiellement sur les surfaces.

Les études de différents cas confrontés à la problématique d'oxydation du fer montrent :

- À divers degrés d'implication, une présence systématique des FeOB quel que soit le contexte hydrogéologique étudié (Sables de Cuise de l'Yprésien, Calcaire grossier du Lutétien, Alluvions du Rhin, du Rhône, etc.) ;
- Que les ferro-bactéries sont systématiquement détectées dans les dépôts s'accumulant au niveau des différents points clés de la boucle primaire (surfaces pleines et crépinées des forages de pompage et d'injection, pompes, surface interne des canalisations, filtres et échangeurs). Les conditions sont ainsi propices à leur développement le long de la boucle primaire. Leur présence en aval des forages de pompage est aussi le résultat de la mobilisation des dépôts par la circulation de l'eau géothermale.



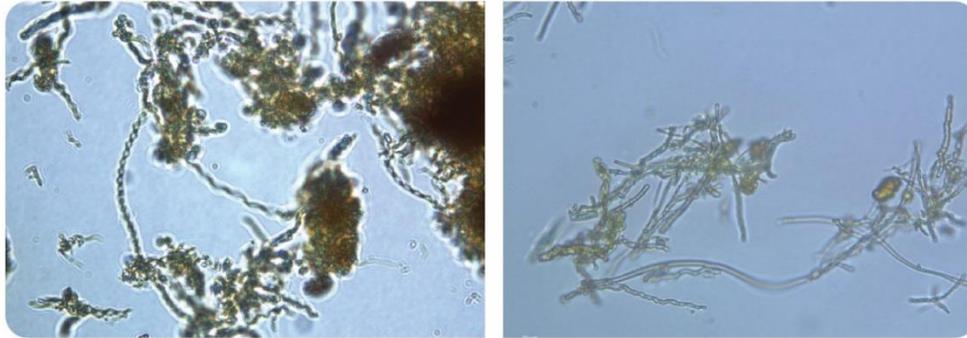


Figure 2 : A gauche, bactéries ferro-oxydantes présentes dans un dépôt colmatant un échangeur à plaques d'une installation exploitant l'aquifère de la Craie du Montien (x600). A droite, bactéries ferro-oxydantes présentes dans un dépôt colmatant une colonne captante d'un forage de pompage exploitant les alluvions du Rhône (x600)

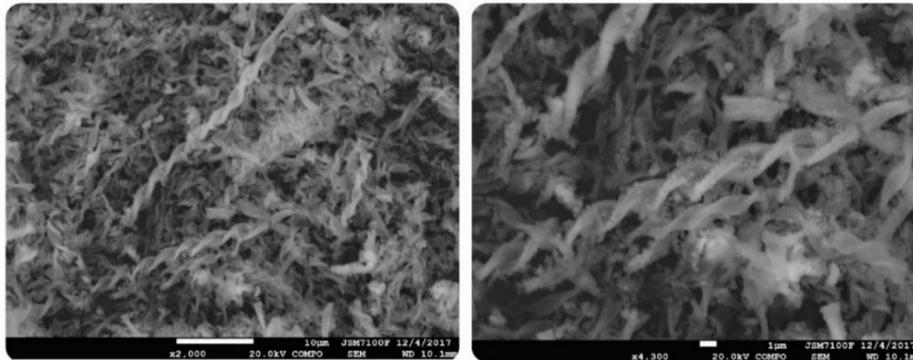


Figure 3 : Observations au microscope électronique à balayage d'un dépôt exclusivement formé par des gaines d'oxydes de fer formées par les bactéries ferro-oxydantes de type Gallionella sp.

La réaction d'oxydation du fer et du manganèse est autocatalytique (catalyse hétérogène). En effet, la formation des oxydes métalliques catalyse les réactions de précipitation par adsorption des ions Fe^{2+} et Mn^{2+} sur les nouvelles surfaces d'oxydes générées et par processus de précipitation de « surface » (Stumm and Lee, 1961; Tamura et al., 1976). L'adsorption rapide de ces ions permet une meilleure biodisponibilité de ces éléments pour les FeOB et MnOB, stimulant l'impact de leur activité. En d'autres termes, lorsque les conditions nécessaires à l'oxydation des ions métalliques sont présentes, l'accumulation progressive de dépôts (sur les tubages pleins et crépinés, autour des grains du massif de graviers et sur les surfaces des canalisations) augmente le taux de précipitation des dépôts et ainsi, la vitesse de colmatage. Les dépôts générés impactent rapidement les organes de la boucle primaire nécessitant dès les premières années d'exploitation des nettoyages des filtres, des échangeurs et des forages. Les clichés des vidéos inspection des forages montrent quasi-systématiquement la présence de dépôts dès le forage de pompage confirmant que les conditions nécessaires à la précipitation de dépôts d'oxydes et d'hydroxydes de fer et/ou de manganèse sont réunies en amont des échanges thermiques.



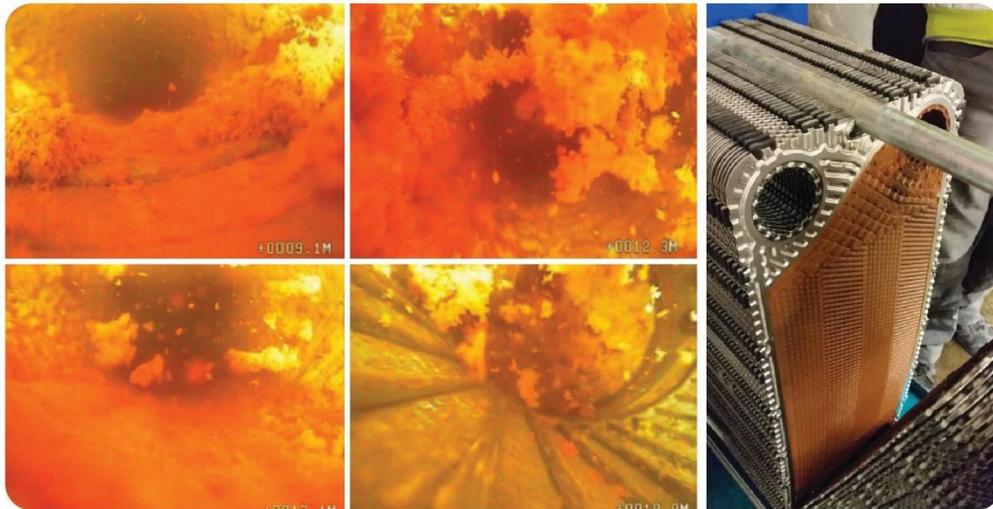


Figure 4 : Forage d'injection et échangeur colmatés par des oxydes de fer d'origine biologique (Sables de l'Yprésien, Ile-de-France)

Les installations sont rarement confrontées à un colmatage conjoint des oxydes de manganèse et des oxydes de fer. Cela s'explique par le fait que le colmatage par oxydation du manganèse est visible uniquement quand les ions ferreux Fe^{2+} sont en très faible concentration ou absents de l'eau géothermale. Les ions Fe^{2+} ont la capacité de réduire les oxydes de manganèse sous forme d'ions Mn^{2+} (Burdige et al., 1992; Johnson et al., 2016; Postma and Appelo, 2000). Malgré des concentrations notables en manganèse dissous dans les eaux, le processus d'oxydation du fer sera la composante principale du colmatage tant que les ions Fe^{2+} seront disponibles pour les réactions d'oxydation. La formation de dépôts d'oxydes de manganèse sera alors le processus déterminant en absence de concentration notable en ions Fe^{2+} ou lorsque les ions Fe^{2+} auront été entièrement oxydés.

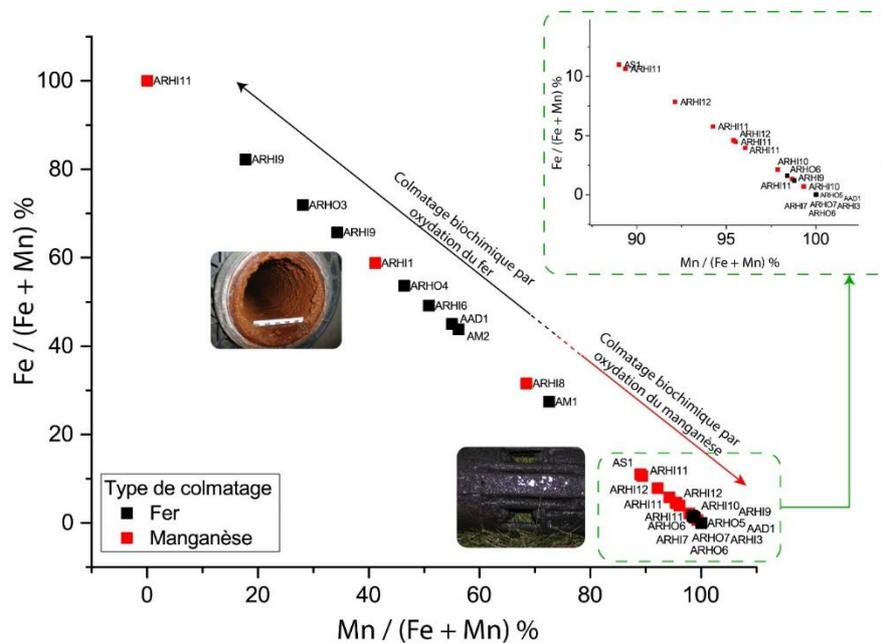


Figure 5 : Ratios Fer/Manganèse calculés pour les doublets géothermiques impactés par un processus d'oxydation (bio)chimique du fer et/ou du manganèse en nappe alluviale (Alluvions du Rhin, du Rhône, de la Seine, de la Moselle et de l'Adour)

La représentation graphique du rapport $[Fe^{2+}] / ([Mn^{2+}] + [Fe^{2+}])$ en fonction du rapport $[Mn^{2+}] / ([Mn^{2+}] + [Fe^{2+}])$ pour les eaux produites par les doublets géothermiques en nappe alluviale référencés dans cette étude (Figure 5) confirme que la majorité des doublets concernés par des problématiques de colmatage liées au manganèse présente un faible ratio $[Fe^{2+}] / ([Mn^{2+}] + [Fe^{2+}])$ (inférieur à 20%). Au-delà, le processus d'oxydation du fer devient la composante principale du processus de colmatage.

3.1.2. Colmatage biologique

Le type « colmatage biologique » est provoqué par l'activité de la biomasse présente dans les eaux de production (croissance d'algues et accumulation de floccs, production de polysaccharides par les bactéries, ...). Plus spécifiquement concernant l'exploitation des eaux souterraines, la formation de biofilm liée au métabolisme de bactéries se rencontre dans des environnements variés en termes de conditions d'oxydo-réduction et est souvent associée à la précipitation minérale (essentiellement oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse) induite par des mécanismes réactionnels chimiques pouvant être activés par ces bactéries (FeOB, MnOB). Ces processus sont traités dans la partie précédente « Colmatage biochimique ». Le colmatage biologique considéré dans cette partie est le résultat de la formation de biofilm liée à l'action conjointe de différentes communautés de bactéries du cycle du soufre de type bactéries sulfurogènes (sulfato-réductrices **BSR** et thiosulfato-réductrices **BTR**) et de bactéries filamenteuses oxydant l' H_2S (**BOS**) telles que *Thiothrix sp.* (Brigmon et al., 1997), *Beggiatoa sp.*).

Les études des doublets concernés par cette problématique indiquent que les milieux anoxiques et présentant une forte concentration en sulfates (400 - 1000 mg/L) sont favorables aux BSR et BTR qui réduisent les sulfates en hydrogène sulfuré (H_2S) (détectable aisément grâce à l'odeur caractéristique d'œuf pourri) et sont activatrices des processus de corrosion des aciers (Kleyböcker et al., 2017). L'exploitation de la nappe peut entraîner l'apport d'oxygène nécessaire au développement des bactéries filamenteuses BOS qui oxyde l'hydrogène sulfuré produit par les bactéries sulfurogènes et forment des biofilms denses sur les surfaces des tubages et équipements (Lerm et al., 2011; Vetter et al., 2012; Würdemann et al., 2016) où les conditions physico-chimiques et de flux sont propices à leur développement (Figure 6). Ce processus de colmatage résulte donc de l'interaction des communautés de bactéries sulfato-réductrices et des communautés de bactéries oxydant l' H_2S . Il a été démontré que l'augmentation de la température initiale du fluide impacte l'abondance des communautés bactériennes et stimule leur métabolisme (Bonte et al., 2013; Vetter et al., 2012). La coexistence des bactéries sulfato-réductrices et oxydant l' H_2S et leur interaction sont observées sur une large gamme de températures. Ainsi, les variations de température à l'échelle du fonctionnement d'un doublet géothermique ne semblent pas impacter la viabilité de ce consortium bactérien (Lienen et al., 2017). L'observation de ces biofilms bactériens formés des communautés de BSR/BOS en amont des échangeurs thermiques (forage de pompage, sur le corps et crépines de la pompe, filtres) confirme cette affirmation.

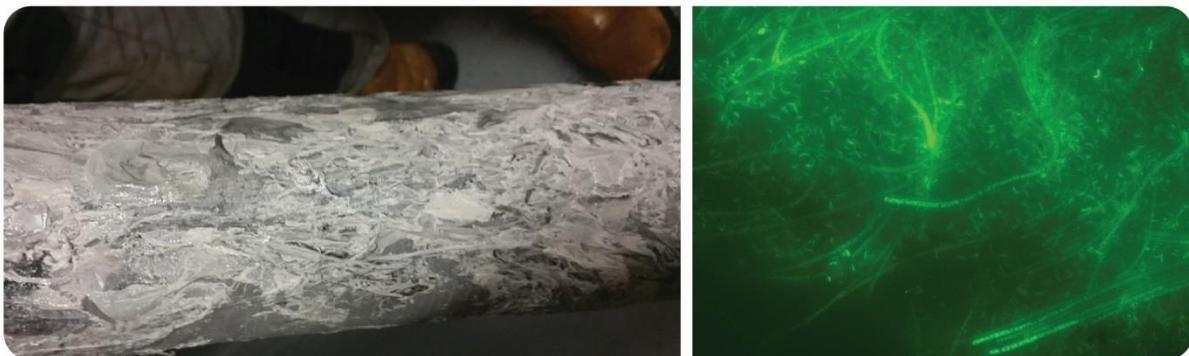
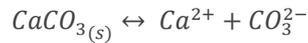


Figure 6 : A gauche, filtre colmaté par un biofilm constitué en majorité de bactéries filamenteuses du cycle du soufre (*Beggiatoa*, *Thiothrix*). A droite, observation du biofilm au microscope à fluorescence (Sables de l'Yprésien, Ile-de-France)

3.1.3. Colmatage chimique (précipitation de carbonate de calcium CaCO_3)

Le colmatage chimique induit par la précipitation de carbonate de calcium est le résultat de la déstabilisation de l'équilibre calco-carbonique. L'équilibre calco-carbonique d'une eau relie le système acide carbonique-bicarbonate avec la précipitation/dissolution du carbonate de calcium. Les ions Ca^{2+} et carbonates CO_3^{2-} sont à l'équilibre avec le carbonate de calcium.



$$\text{Avec } [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = K_s$$

Cet équilibre régit le potentiel de solubilisation ou de précipitation des carbonates. La contribution des carbonates et des hydrogénocarbonates dans l'eau est fonction des conditions d'équilibre, où la pression partielle en CO_2 et la température jouent un rôle important (Palmer and Cherry, 1984; Plummer et al., 1978). Les eaux souterraines, lorsqu'elles sont extraites, sont susceptibles de conduire à la formation de précipités de carbonate de calcium CaCO_3 soit par élévation de la température ou diminution de la concentration en CO_2 (pouvant être provoqué par une baisse de pression ou un échange gazeux avec l'atmosphère). La précipitation de la calcite intervient alors lorsque le produit des activités des ions calcium et carbonates **IAP** est plus important que le produit de solubilité K_s .

$$\Omega = \frac{IAP}{K_s} = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]}{K_s} = e^{\frac{\Delta G}{RT}}$$

$$IS = \log_{10} \Omega$$

Où ΔG est l'énergie libre de Gibbs de la réaction, R la constante des gaz parfait, T la température et IS l'indice de saturation.

Plusieurs références (Massmann and Sültenfuß, 2008; Roy and Ryan, 2010; Wang et al., 2014) attestent que les fluctuations du niveau piézométrique durant le pompage de l'eau souterraine peuvent provoquer des variations dans la teneur en gaz dissous (O_2 , CO_2) et que la circulation de l'eau géothermale dans la boucle primaire peut contribuer au dégazage des gaz dissous tels que le CO_2 (Banks, 2012). Ce dégazage provoque une augmentation du pH de l'eau et modifie l'équilibre calco-carbonique induisant la formation de dépôts carbonatés (Eppner et al., 2017). Il est souvent fait référence dans la littérature au dégazage induit par les flux turbulents dans l'environnement local du forage de pompage (Georg Houben and Christoph Treskatis, 2007a). Cependant, van Beek, 2010 conclut dans son étude que les flux turbulents ne sont généralement pas initiateurs de dégazage du CO_2 et donc responsables de la précipitation de carbonate de calcium induite.

La sursaturation de l'eau vis-à-vis des espèces carbonatées peut également être induite par le mélange d'eau ayant des pressions partielles en CO_2 différentes (i.e entre l'eau issue du forage de pompage et l'eau du forage d'injection, Possemiers et al., 2014).

Le fonctionnement de la pompe à chaleur en mode climatisation entraîne l'augmentation de la température de l'eau au sein de la boucle primaire (réinjection de l'eau géothermale à une température supérieure à la température naturelle de l'aquifère) et favorise la précipitation de carbonate de calcium. L'augmentation de la température entraîne par ailleurs une augmentation des vitesses de réaction et donc du taux de formation de dépôts carbonatés. La présence de particules minérales ou d'impuretés organiques dans l'eau géothermale peut également influencer la germination-croissance des phases carbonatées (MacAdam and Jarvis, 2015).

Les particules minérales formées par ces processus colmatent progressivement les plaques des échangeurs thermiques et s'agglomèrent in fine au sein des forages d'injection (Figure 7), diminuant ainsi les capacités d'absorption du débit de production. Les retours d'expérience et la littérature scientifique montrent que le colmatage chimique lié à la précipitation des carbonates de calcium est toutefois moins rencontré au regard des autres typologies de phénomènes de colmatage recensés.



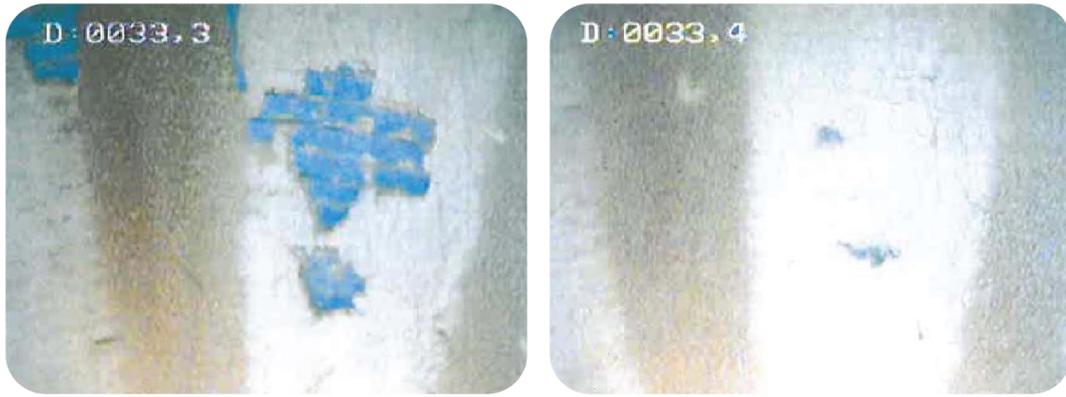


Figure 7 : Crépines PVC d'un forage d'injection (doublet géothermique au Calcaire Grossier du Lutétien, Ile-de-France) colmatées par des dépôts de carbonate de calcium CaCO_3 (Martin, 2013)

Ce risque de précipitation et son incidence peut être ainsi appréhendé par le calcul de la solubilité de la calcite CaCO_3 . La solubilité des minéraux est régie par les lois de la thermodynamique et l'application de ces lois à l'aide de codes géochimiques permet de déterminer les conditions d'équilibre chimique des eaux considérées et ainsi, d'évaluer le risque de colmatage.

3.1.4. Colmatage physique (ou particulaire)

L'exploitation d'un aquifère composé de matériau détritique non consolidé se traduit potentiellement par une mobilisation et la mise en suspension de particules minérales fines (caractéristiques de la matrice minérale de l'aquifère) au sein de l'eau géothermale (Timmer et al., 2003; van Beek et al., 2009). Ryan and Elimelech, 1996 ont identifié que les particules mobiles ayant un potentiel de colmatage du milieu poreux naturel sont de diamètre compris entre 0.11 et 100 μm . Ces particules sont généralement de diamètre inférieur au seuil de filtration des filtres installés sur la boucle géothermale (en général entre 150 et 200 μm).

La charge particulaire mobilisable est fonction de la lithologie traversée par le forage (cohésion du milieu poreux, distribution granulométrique du matériau de l'aquifère) et du débit de pompage dont dépendent les vitesses de circulation porales et les forces d'érosion mobilisant les particules. Par analogie avec les processus d'érosion interne des sols, Tang et al., 2017 indiquent que la mobilisation de particules est favorisée dans les milieux où la distribution en taille des éléments qui composent le matériau est étalée (coefficient d'uniformité $d_{60}/d_{10} > 10$). Ils postulent que l'érosion interne est plus facilement observable dans un milieu hétérogène présentant différentes interfaces aux perméabilités variables.

Au cours de l'injection d'un fluide, le milieu poreux est capable de faire transiter la charge particulaire sans rétention sous un seuil défini par le ratio du diamètre de la particule sur le diamètre de l'entrée du pores (De Zwart, 2007; van Leerdam and Appelman, 2014). La réponse des forages d'injection en termes de baisse de performance dépend donc de la charge particulaire réceptionnée (concentration et distribution granulométrique), des caractéristiques hydrodynamiques du milieu poreux de l'aquifère (distribution des zones perméables, porosité du milieu) et des caractéristiques techniques des ouvrages (diamètre des tubages crépinés et du forage, volume et granulométrie du massif de gravier, ...), cet ensemble de paramètres contrôlant les vitesses d'infiltration. Dans le cadre de ces expérimentations, Agbangla et al., 2012 a démontré que la vitesse d'infiltration de la charge particulaire à l'entrée du milieu poreux contrôle sa capacité de filtration, les particules s'agrégeant à l'entrée des pores lorsque la vitesse de filtration dépasse des valeurs critiques (explicitées dans la partie « Evaluation du risque particulaire »).



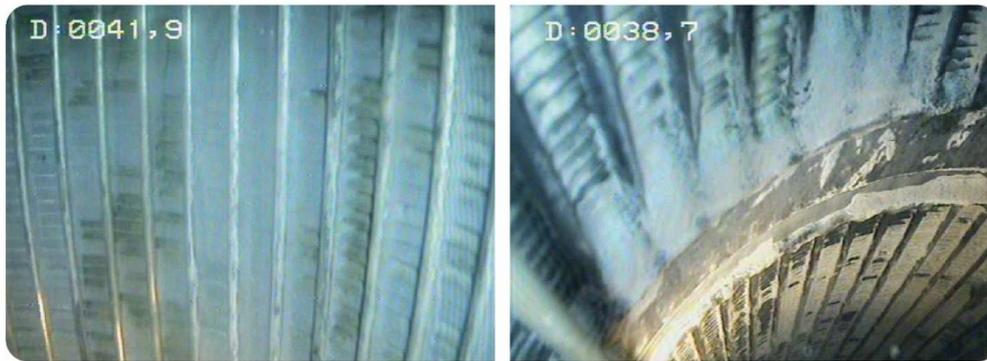
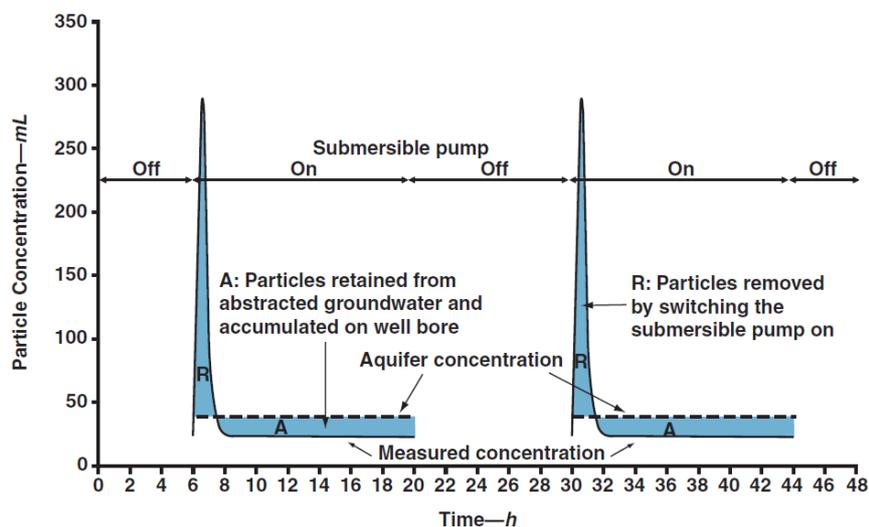


Figure 8 : Crépines d'un forage d'injection colmatées par des particules issues de l'aquifère des Sables de l'Yprésien (Ile-de-France)

Le colmatage physique se rencontre principalement dans les aquifères détritiques de type sable et grès (Aquifère des sables de Cuise de l'Yprésien, des sables de Fontainebleau, des sables de l'Albien et du Grès du Portlandien) et dans une moindre mesure en aquifères alluviaux. Le processus de colmatage particulaire engendre une perte rapide des performances à l'injection en lien avec l'obstruction de l'entrée des crépines (Figure 8) et du colmatage du milieu poreux proche puits. Cette baisse de performance est généralement décelable dès les premiers mois après le lancement de l'installation. En revanche, aucune perte de productivité des forages de pompage n'est observée lorsque cette problématique est identifiée. En production, van Beek, 2010 a identifié que le pic de concentration de la charge particulaire mobilisée par l'écoulement s'effectue lors du redémarrage des pompes d'exploitation. Il démontra que les forages de pompage étudiés fonctionnant en régime continu subissaient une chute de performance liée à l'accumulation des particules dans l'environnement du puits alors qu'au contraire, ceux fonctionnant en régime discontinu (nombreux cycles d'arrêts/marches) montraient une résilience importante au processus de colmatage physique. Les observations réalisées tendent à démontrer que le démarrage de la pompe permet une accélération suffisante pour mobiliser le stock de particules accumulées dans le massif de gravier durant le précédent cycle de fonctionnement empêchant ainsi le colmatage du forage de pompage (Figure 9).



A—particles accumulated on the well bore, R—particles mobilized by switching the well on

Figure 9 : Schéma conceptuel de la variabilité de la concentration en particules au cours du cycle de pompage (Beek et al., 2009)

L'effet bénéfique d'un fonctionnement en intermittence pour le forage de pompage est par contre néfaste pour les forages d'injection, recevant ces eaux chargées en particules. D'autres sources de particules solides ne provenant pas du réservoir aquifère (par exemple endommagement des équipements du puits et de surface par corrosion des matériaux) peuvent entraîner une charge particulaire impactant la pérennité de l'exploitation.



3.1.5. Synergie entre processus de colmatage principal et secondaire

Le colmatage des doublets géothermiques peut résulter de l'implication de plusieurs des processus précédemment décrits (Vetter et al., 2012). Cette synergie de processus rend parfois difficile la détermination de la cause principale à la problématique de colmatage. La Figure 10 présentant les résultats d'analyses des dépôts solides colmatant différentes installations géothermiques illustre la diversité de la composition chimique des dépôts et atteste que la cause du colmatage d'une installation n'est la plupart du temps pas unique. En ce qui concerne les doublets géothermiques exploitant les aquifères non consolidés confrontés à un processus d'oxydation du fer ou du manganèse (notamment ARHI12, AS1), la présence de particules minérales provenant du réservoir est fréquemment mise en évidence par les observations visuelles du dépôt et par la détection de quantité notable de silice dans les analyses (Figure 11). Il est toutefois délicat d'établir si le processus de mobilisation des particules, seul, aurait un impact sur la pérennité de l'installation sans l'action des dépôts d'oxydes et des biofilms. De la même manière, des cristaux de calcite peuvent former une partie des dépôts (AS1) constitué en majorité d'oxydes biogéniques (matrice formée conjointement d'oxydes et d'EPS) et inversement. De ce constat, les notions de processus de colmatage dit « principaux » et de processus annexes dit « secondaires » peuvent être établies.

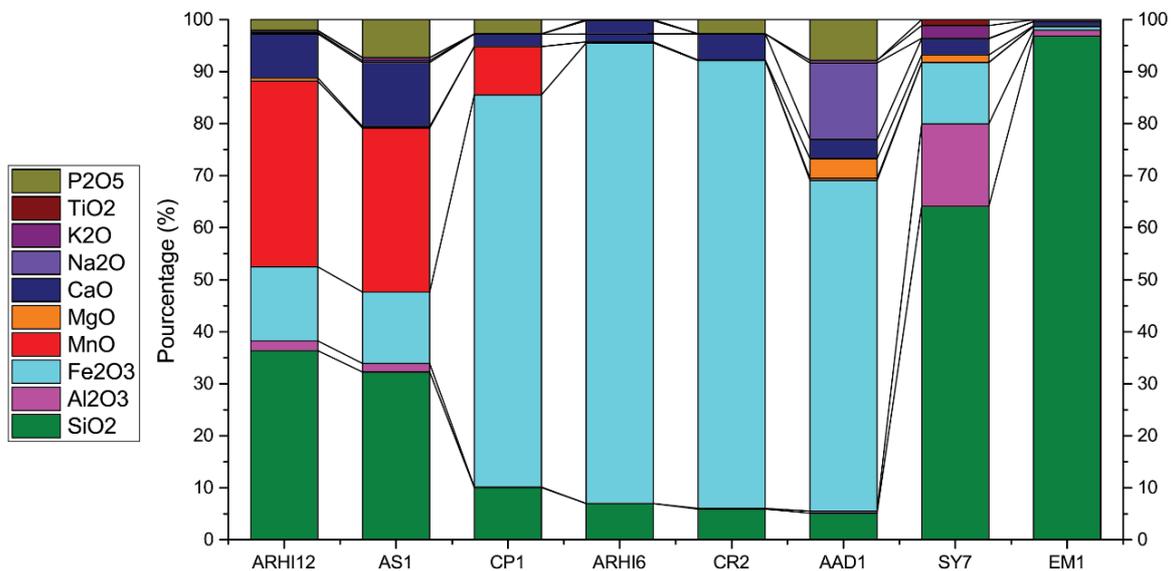


Figure 10 : Analyses élémentaires des dépôts colmatant différents organes de la boucle primaire (filtre, échangeur, forage d'injection...) d'installations géothermiques en France.

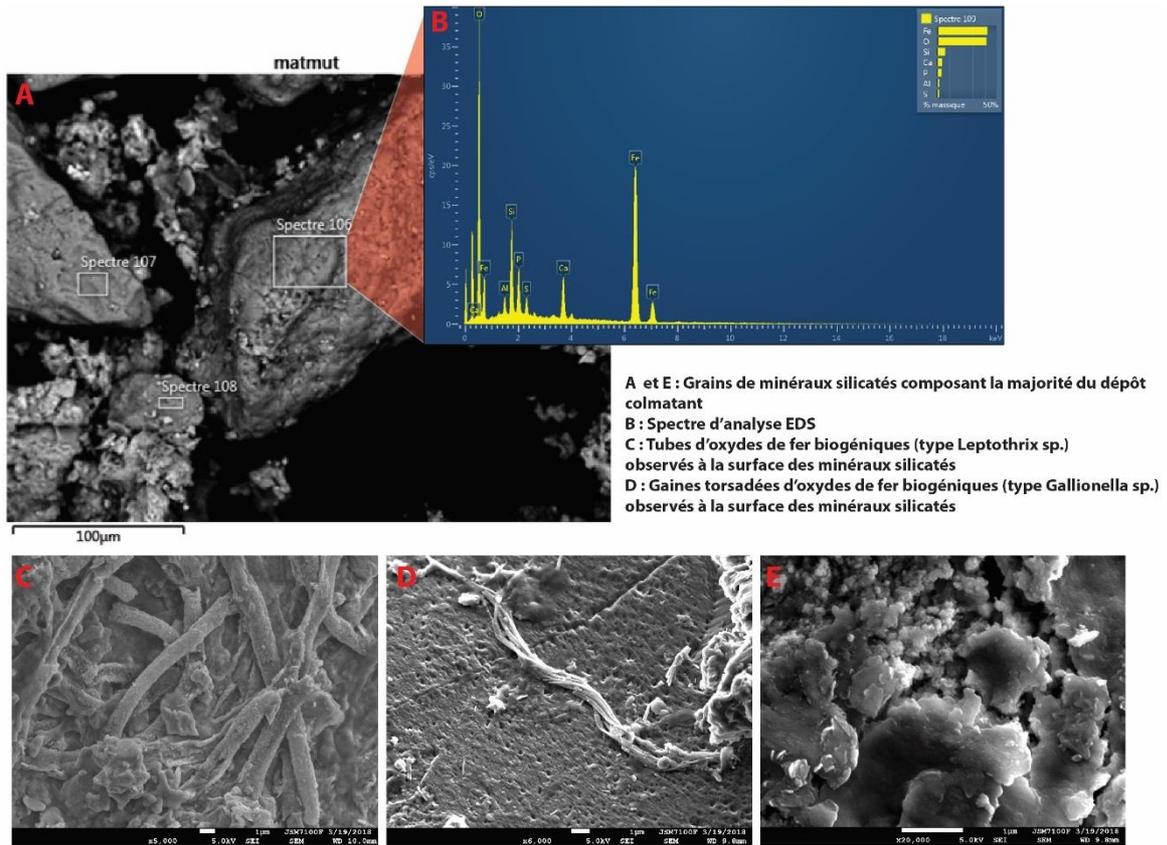


Figure 11 : Analyse MEB/EDS d'un dépôt colmatant les filtres d'un doublet géothermique au Grès du Portlandien



3.2. Impacts des processus de colmatage sur le fonctionnement de la boucle géothermale

Les processus de colmatage présentés dans la précédente partie peuvent induire des problèmes opérationnels sévères nécessitant, si les mesures préventives ne sont pas engagées, une maintenance importante et coûteuse. En fonction du type de colmatage, les différents organes de la boucle ne sont pas touchés de façon équivalente. La Figure 18 résume la sensibilité au colmatage des différents organes de la boucle primaire en fonction du type de colmatage.

3.2.1. Impacts du colmatage biochimique (Fer/Manganèse)

Le colmatage (bio)chimique (Fer/Manganèse) impacte la boucle primaire à différents niveaux. Son action se traduit de façon générale par l'accumulation de dépôts sur les parois pleines, au sommet des crépines du forage de pompage, à l'aspiration de la pompe d'exhaure (Figure 12), ainsi que sur les surfaces internes (réduction progressive du diamètre interne des canalisations) et externes de la colonne d'exhaure en contact avec l'eau géothermale. Ces dépôts, mélanges d'hydroxydes et d'EPS colmatent ensuite rapidement les filtres, échangeurs et forages d'injection (Figure 13, Figure 14, Figure 15).



Figure 12 : Pompe d'exhaure recouverte d'hydroxydes amorphes de fer

Le redémarrage du pompage après une phase d'arrêt mobilise les dépôts présents sur les surfaces en amont du système de filtration et peut conduire au colmatage rapide (quelques minutes) des filtres en amont échangeur. Concernant les forages du doublet géothermique, les injecteurs sont généralement les premiers à subir des problèmes rapides d'exploitation liés à une baisse importante de leur performance en injection. La faible cinétique de colmatage des forages de pompage s'explique en partie par la mobilisation constante des dépôts en phase de pompage, ralentissant l'obstruction des crépines et de la porosité du massif de gravier. La partie sommitale des crépines est toutefois plus sensible au colmatage en raison de son exposition potentielle à des conditions oxydantes. A terme, une baisse des performances des forages de pompage peut être tout de même observée. La prévention du processus de colmatage biochimique des forages est d'autant importante que les retours d'expérience rendent compte de la difficulté de retrouver les performances initiales des forages à la suite des travaux de réhabilitation.





Figure 13 : Filtre à manchon colmaté par des oxydes métalliques

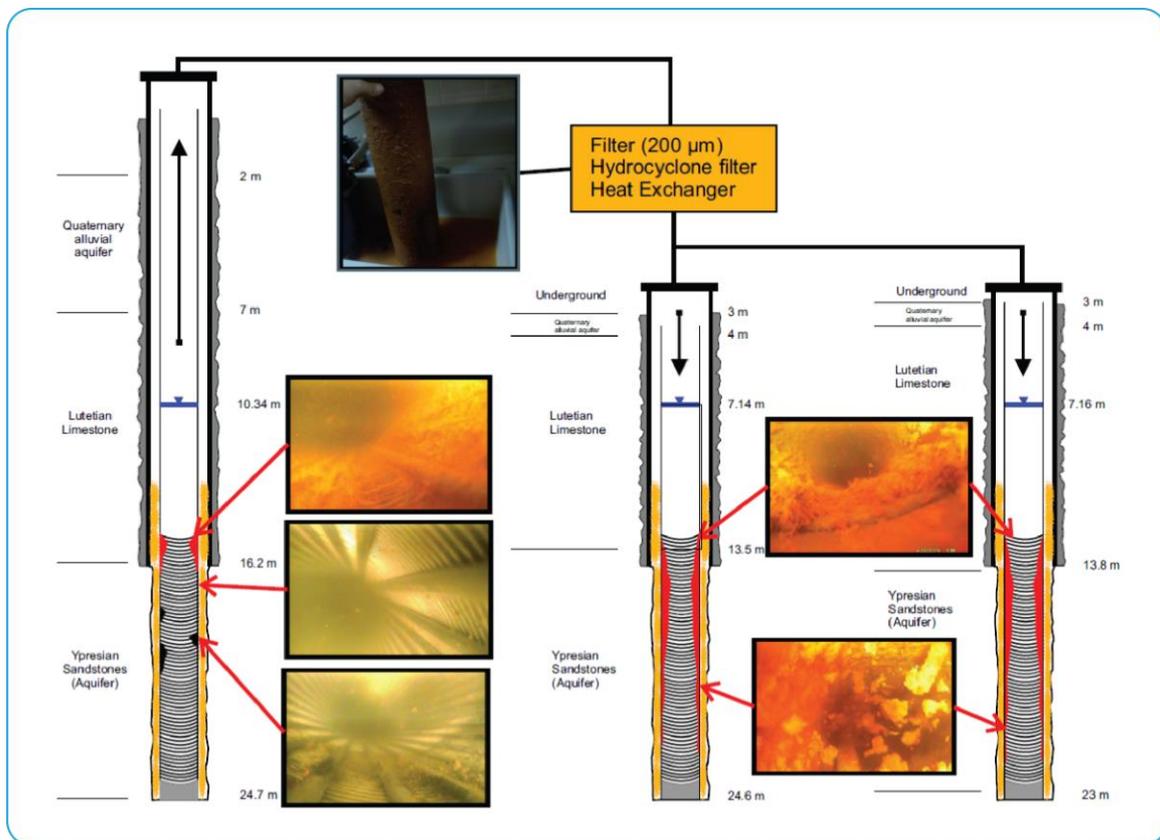


Figure 14 : Doublet géothermique impacté par un processus de colmatage lié à l'oxydation du fer



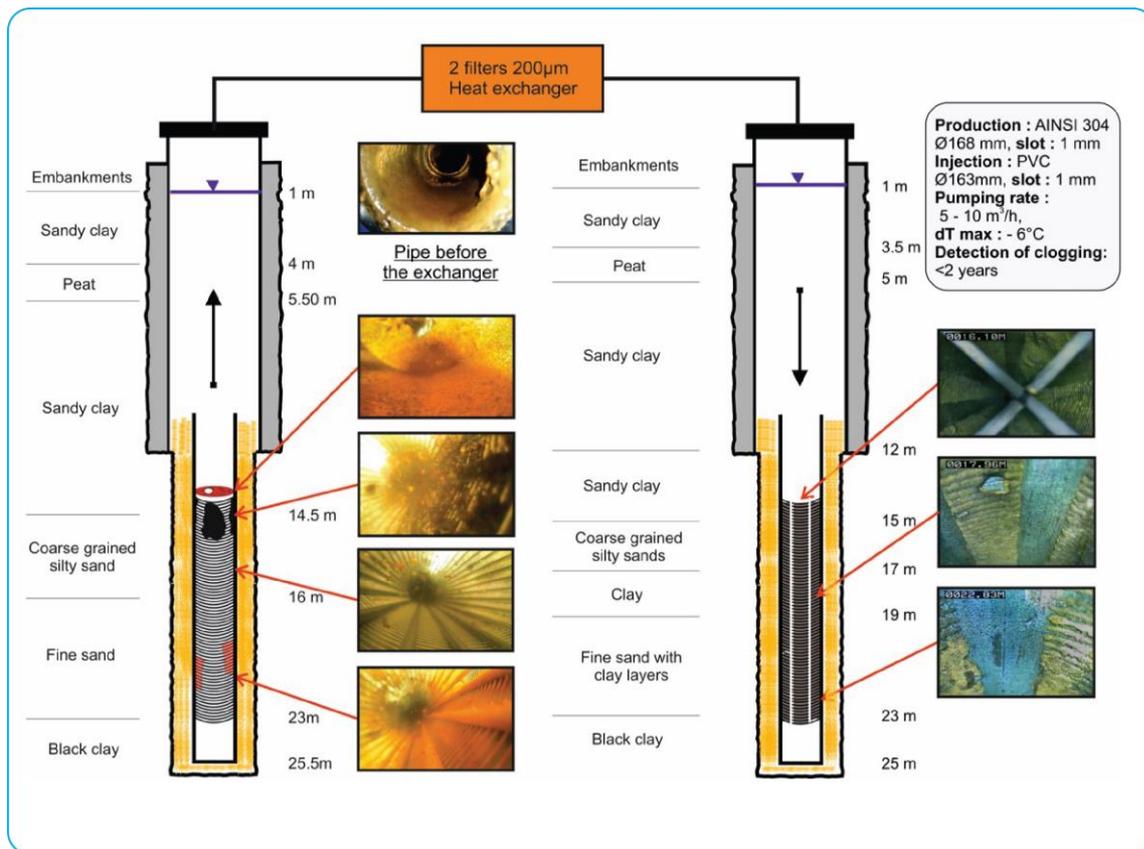


Figure 15 : Doublet géothermique impacté par un processus de colmatage lié à l'oxydation du manganèse

3.2.2. Impacts du colmatage biologique

Le colmatage biologique lié à l'activité des bactéries du cycle du soufre impacte les forages de pompage et d'injection ainsi que le système de filtration et potentiellement l'échangeur thermique. L'action mécanique induite par la circulation de l'eau géothermale à partir du forage de pompage entraîne la mobilisation d'amas de biofilm qui s'agglomèrent par la suite sur les filtres (Figure 6). Une maintenance quasi-journalière de ces derniers peut être nécessaire pour assurer leur fonctionnement optimal en amont des échangeurs thermiques.

3.2.3. Impacts du colmatage chimique par précipitation de carbonate de calcium

Le colmatage chimique par précipitation de carbonate de calcium affecte essentiellement les parties de la boucle géothermale en contact avec l'eau réchauffée (échangeur, conduite de transport en aval de l'échangeur et forage de réinjection) dans le cas d'un fonctionnement en mode climatisation. Ce processus peut entraîner une chute rapide des performances des forages conduisant à une augmentation de la pression de réinjection pouvant aller jusqu'à l'impossibilité de réinjecter avec débordement du puits (Figure 16). Une maintenance fréquente des injecteurs devient nécessaire si aucun dispositif préventif n'est mis en place.



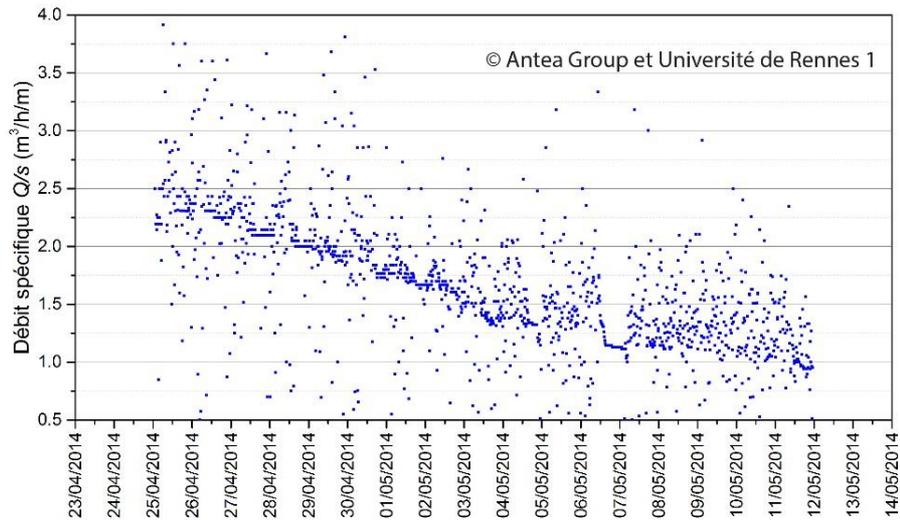


Figure 16 : Illustration de la décroissance du débit spécifique (Q/s) d'un forage d'injection (Calcaire grossier du Lutétien, Ile-de-France) provoquée par un colmatage chimique lié à la précipitation des carbonates de calcium

3.2.4. Impacts du colmatage physique

Le colmatage physique ou particulaire entraîne des difficultés d'exploitation des filtres et des forages d'injection. Si le seuil de filtration est dimensionné au regard de la distribution granulométrique de la charge particulaire, le filtre peut être rapidement colmaté par rétention de ces fines, entraînant alors une maintenance fréquente si aucun dispositif de rétrolavage n'est employé. Les particules non retenues par le filtre sont mobilisées jusqu'à l'exutoire final que sont les forages d'injection. L'accumulation progressive de ces particules à l'entrée des crépines (Figure 8) dans la porosité du massif de gravier et de l'aquifère proche puits entraîne une perte de performance progressive des forages d'injection (Figure 17).

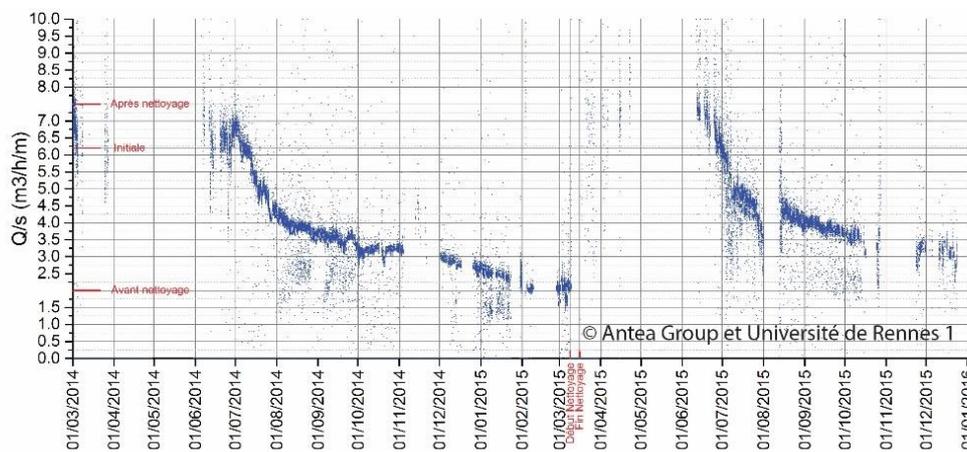


Figure 17 : Illustration de la baisse de performances (Q/s) d'un forage d'injection provoquée par un colmatage particulaire (Sables de l'Yprésien, Ile-de-France)

Les travaux de réhabilitation des forages d'injection permettent de revenir à des performances proches de l'état initial. Cependant, comme cela est visible en Figure 17, ces maintenances ponctuelles ne permettent pas de pérenniser les performances des forages d'injection.



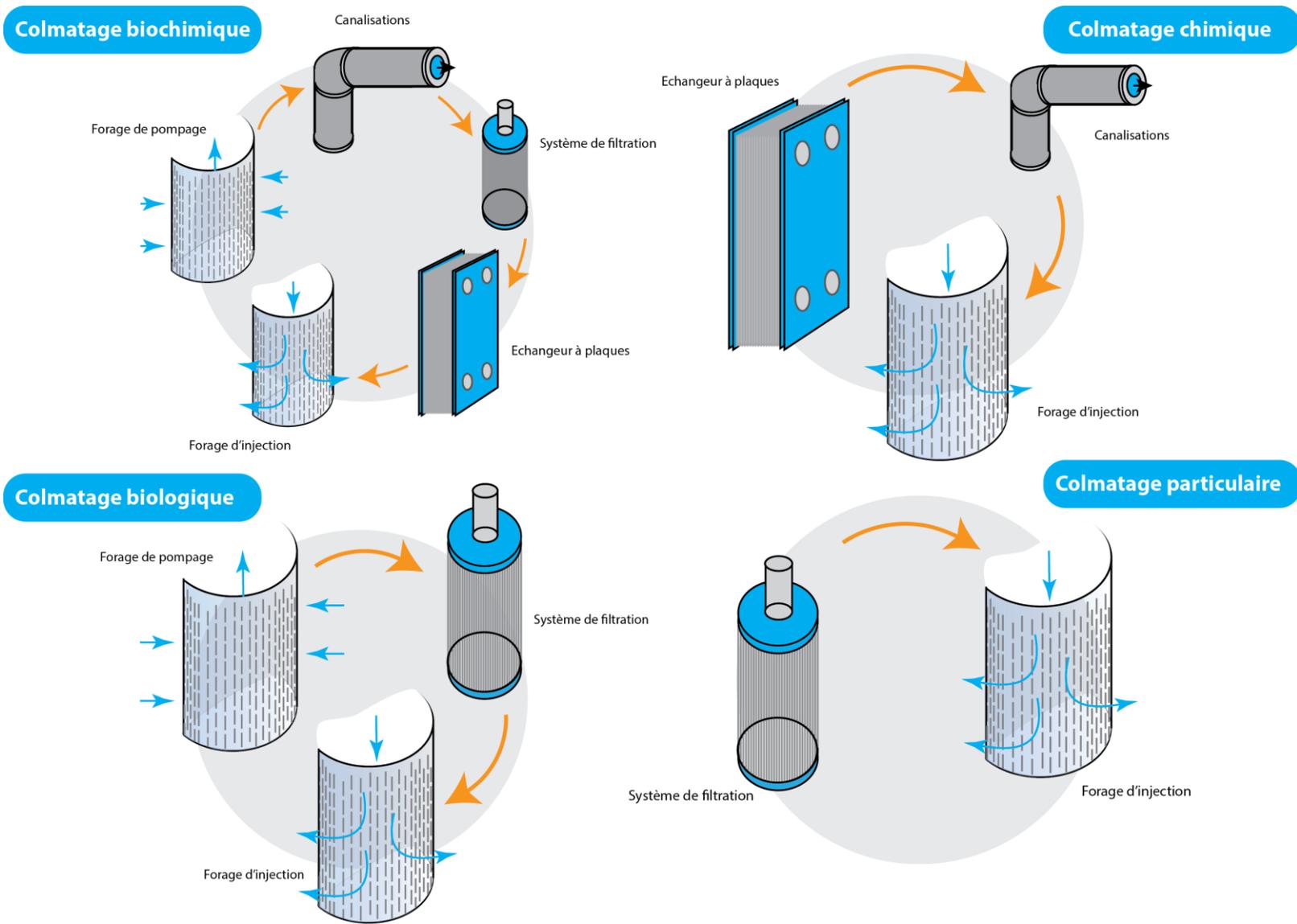


Figure 18 : Organes de la boucle primaire impactés par les processus de colmatage



3.3. Les facteurs de risque contrôlant l'apparition des phénomènes de colmatage

La littérature scientifique fait état de facteurs de risques influençant l'apparition des phénomènes de colmatage. L'étude des caractéristiques intrinsèques à chacun des doublets recensés a permis de confirmer l'importance de ces facteurs de risques propres à chacun des types de processus de colmatage. Ces facteurs de risques sont exposés ci-après et Figure 25.

3.3.1. Colmatage biochimique (fer - manganèse)

L'enjeu principal lors de l'exploitation d'un forage de pompage alimenté par des flux d'eau anoxique et contenant des espèces réduites telles que Fe^{2+} et Mn^{2+} est de garantir l'absence d'intrusion d'oxygène ou d'apport d'une eau oxydante pouvant induire une réactivité chimique. Comme indiqué précédemment, les clichés des vidéos inspection des forages montrent généralement l'incrustation de dépôts sur les surfaces du forage de pompage avec des conditions nécessaires à la précipitation de dépôts d'oxydes et d'hydroxydes de fer et/ou de manganèse. Menz, 2016 a identifié les deux principales sources d'oxygène dans les eaux souterraines en lien avec l'exploitation des forages d'eau.

- Flux d'eau oxygène provenant d'une masse d'eau superficielle et captée par le forage de pompage (aquifère libre ou semi-captif) ;
- Flux d'oxygène provenant du piégeage des gaz (« air entrainement ») lors des oscillations de la nappe d'eau souterraine (aquifère libre).

Outre ces processus d'oxygénation liés à des conditions hydrogéologiques, l'installation peut, de par sa configuration et son dimensionnement, favoriser des entrées d'air dans la boucle primaire. C'est notamment ce qui se produit en cas d'arrêt d'exploitation si le circuit n'est pas doté d'un dispositif de maintien de pression, alors la vidange d'une partie du réseau primaire se produit et induit l'entrée d'air dans la boucle primaire. En fonctionnement, dans le cas où le réseau de surface n'est pas en charge, l'oxygénation de l'eau géothermale peut se produire au cours de son transport entre le forage de production et celui de réinjection et conduire à l'injection de bulles d'air dans le forage d'injection (Figure 19).



Figure 19 : Oxygénation de l'eau géothermale en raison d'une boucle primaire non en charge. L'injection de bulles d'air est visible sur les extraits des inspections vidéo (Gauche : Base de la colonne d'injection, Droite : surface de l'eau en tête du forage d'injection)

Les facteurs de risque pouvant conduire à un processus de colmatage de type biochimique sont récapitulés ci-après.



3.3.1.1. Facteur de risque relatif aux échanges masse d'eau superficielle/aquifère en nappe alluviale

Le positionnement d'un doublet géothermique en nappe alluviale à proximité de l'interface aquifère/masse d'eau superficielle peut constituer un risque pour la pérennité de l'installation. En fonctionnant à cette interface, le doublet géothermique est susceptible d'induire des flux en partance de la masse d'eau (rivière, lac) et ainsi d'être alimenté en partie par cette dernière et l'aquifère. Cette distribution des flux a été décrite à de multiples reprises comme vectrice de la modification de la biogéochimie locale (Griseck and Paufler, 2017; Medihala et al., 2012) et de processus de colmatage pour les forages d'eau alimentés par « filtration sur berge » (Bustos Medina et al., 2013; Majkic-Dursun et al., 2015; Menz, 2016; van Beek et al., 2017). Ces zones particulières sont aussi soumises aux variations saisonnières de la température. Ces variations induisent des différences dans la consommation microbienne de l'oxygène et de la matière organique provenant de l'infiltration de la masse d'eau superficielle (Kohfahl et al., 2008). Cela peut se traduire par une variation de la distribution des conditions redox. En effet, lors des températures basses (hiver), les processus biologiques sont ralentis, entraînant un front de propagation de l'eau oxygène plus étendu qu'en été où les métabolismes bactériens sont stimulés par les plus fortes températures (Henzler et al., 2016).

Ainsi, l'exploitation du forage de pompage du doublet géothermique superficiel est susceptible de générer un mélange entre (Figure 20) :

- Des eaux récentes provenant de l'infiltration des masses d'eaux superficielles dans la nappe alluviale et chargées en oxygène ;
- Des eaux provenant de l'aquifère, plus anciennes, plus réductrices et porteuses d'espèces réduites du fer/manganèse.

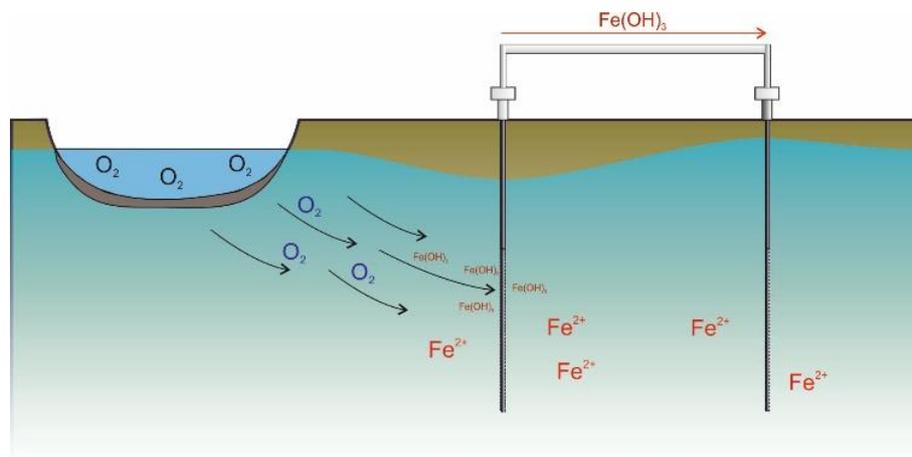


Figure 20 : Interactions avec une masse d'eau superficielle

Ce mélange « réactif » entraîne, in fine, la précipitation biochimique d'oxydes de fer et de manganèse. Toutefois, des exploitations à proximité directe (< 200 m) du Rhin ou de Rhône ne connaissent aucun désordre lié à des phénomènes de colmatage. Les données chimiques concernant ces doublets indiquent des concentrations en fer et manganèse en dessous des seuils de quantification ou de quelques $\mu\text{g/L}$. L'absence de colmatage atteste de l'absence de mélange réactif et probablement de l'absence de variation temporelle des concentrations du fer et du manganèse au niveau de ces zones exploitées. Des connexions hydrauliques entre aquifère sédimentaire et aquifère alluvial quaternaire sus-jacente peuvent exister lorsqu'aucune couche imperméable n'isole ces deux niveaux. Les caractéristiques physico-chimiques respectives des deux nappes peuvent être hétérogènes (McMahon et al., 2011, p. 589) en raison des interactions de la nappe alluviale avec la masse d'eau superficielle. Le pompage peut avoir comme effet de mettre en communication des flux provenant de ces deux masses d'eau souterraines et de générer un mélange réactif.



3.3.1.2. Facteur de risque relatif à la stratification redox initiale de l'aquifère

Plusieurs paramètres contrôlent la géochimie des nappes comme la nature des matériaux de l'aquifère, les conditions de recharge ou encore les différents processus biologiques. Du fait de la variabilité spatiale de ces paramètres, des conditions redox hétérogènes peuvent être présentes dans l'environnement direct des forages d'eau (Beek et al., 2009; Possemiers et al., 2016). Comme illustré Figure 21, le forage de pompage peut être amené à capter des eaux ayant des conditions redox assez éloignées dans la séquence redox présentée par Stumm and Morgan, 1996. (Réduction de l'oxygène → dénitrification → réduction du manganèse^{IV} → réduction des nitrates → réduction du fer^{III}...). Il est par ailleurs difficile de connaître l'incidence (en termes de colmatage) du mélange de ces deux eaux au sein des forages d'injection, cette problématique n'ayant pas clairement été identifiée.

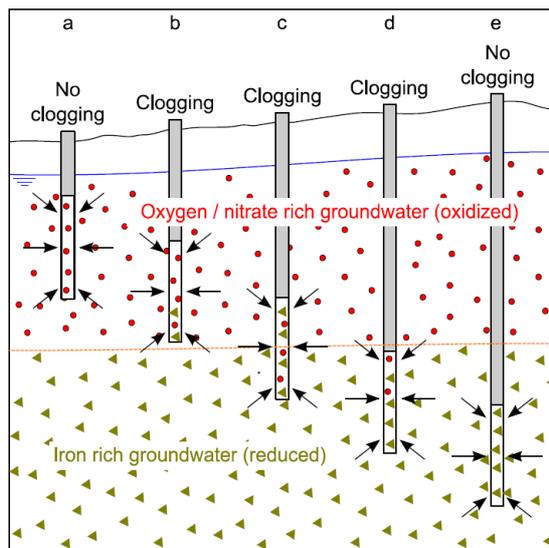


Figure 21 : Vue schématique d'un forage exploitant un aquifère dans différentes conditions redox (a = forage alimenté par des venues d'eau oxygène. b, c et d = forage alimenté par un mélange d'eau oxygène et anoxique. e = forage alimenté uniquement par des venues d'eau anoxique riche en Fe²⁺) extrait de Possemiers et al., 2016

3.3.1.3. Facteur de risque relatif à l'existence d'une pollution anthropique de l'aquifère

La contamination anthropique d'un aquifère par une pollution organique (notamment hydrocarbures aromatiques polycycliques) conduit à des processus biochimiques modifiant durablement les conditions redox de la nappe. En nappe oxygène, l'oxygène est consommé lors du processus de dégradation bactérienne de ces polluants organiques, induisant localement des conditions anoxiques pouvant favoriser l'apparition de processus de respiration anaérobies tels que la réduction du fer^{III} et du manganèse^{IV} (Martirani-Von Abercron et al., 2016), conduisant à la mise en solution de ces éléments. La distribution des écoulements au sein d'un aquifère hétérogène introduit une variabilité de l'extension du panache de pollution. Un forage peut donc être amené à capter conjointement des venues d'eau contaminées par la pollution anthropique (oxygène) ainsi que des venues d'eau non contaminées et anoxiques (Figure 22). Le mélange de ces eaux peut alors conduire à une réactivité chimique et induire un risque de colmatage pour l'installation.



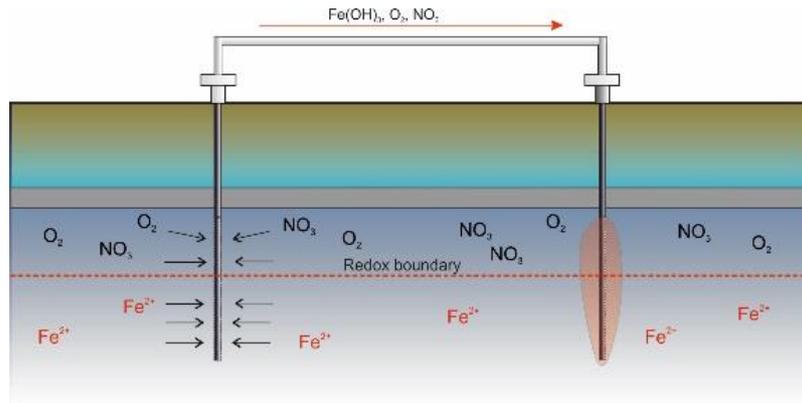


Figure 22 : Stratification chimique initiale de l'aquifère

3.3.1.4. Facteur de risque relatif aux échanges atmosphère – eau souterraine dans le forage de pompage

L'impact des oscillations sur l'oxygénation des aquifères libres a été étudié à plusieurs reprises (Kohfahl et al., 2008; Massmann and Sültenfuß, 2008; Williams and Oostrom, 2000). Les oscillations de la nappe induisent des cycles de saturation/désaturation du milieu poreux ayant pour conséquence la dissolution de l'oxygène lors de la remise en eau (Figure 23). Ce phénomène est naturel lorsqu'il est induit par les battements de nappe relatifs aux variations de la recharge de l'aquifère ou anthropique lorsqu'il est induit par les oscillations de la nappe en raison des cycles marches-arrêts du forage de pompage.

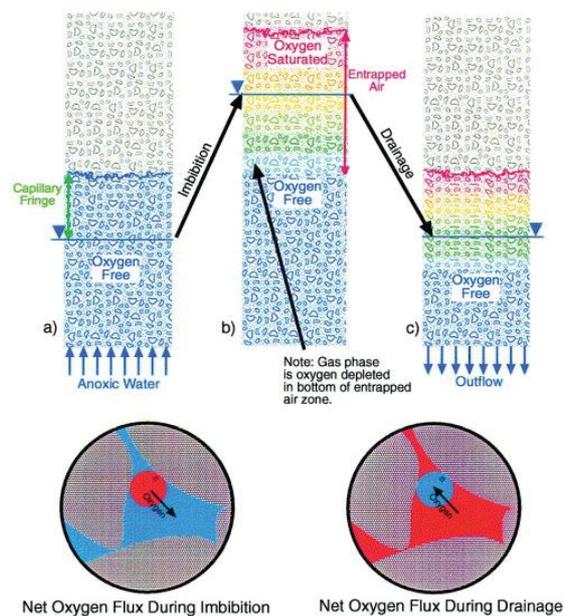


Figure 23 : Dynamique du niveau d'eau et échange d'oxygène entre phases aqueuse et gazeuse. Les différentes couleurs représentent les différents degrés de saturation en oxygène dissous (Williams and Oostrom, 2000)

En exploitation, plus le niveau de rabattement sera proche des niveaux producteurs ou du sommet des crépines, plus le forage de pompage sera susceptible de capter cette eau présentant cet excès d'air (Massmann and Sültenfuß, 2008; Menz, 2016) et de générer un mélange avec une eau porteuse des phases réduites du fer et du manganèse (Figure 24).

Dans le forage, le contact entre l'eau et l'atmosphère constitue une interface où des échanges gazeux se produisent (Roy and Ryan, 2010), échanges probablement favorisés par le dénoyage des surfaces internes (casing, massif de gravier). Bonte et al., 2017, atteste du risque lié au positionnement de la



pompe à une profondeur trop faible par rapport à cette interface et notamment inférieure à la profondeur maximale d'intrusion de l'oxygène dans la colonne d'eau. Celle-ci a été évaluée dans leur étude à 12 mètres de profondeur sous le niveau d'eau. Le positionnement de la pompe doit aussi prendre en compte le rabattement de la nappe en fonction du débit maximal d'exploitation envisagé.

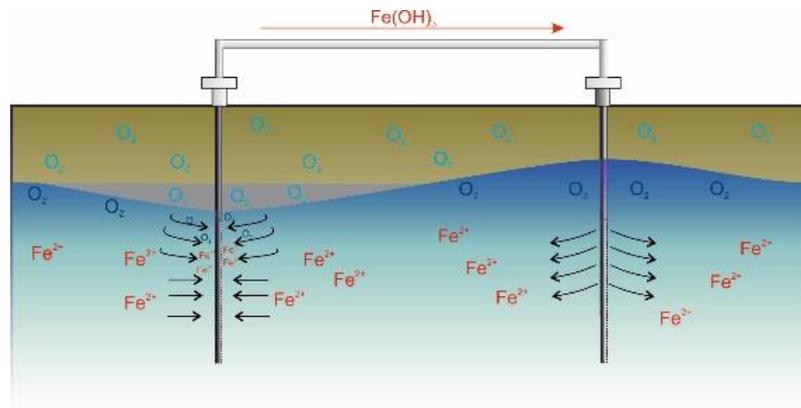


Figure 24 : Oxygénation liée aux fluctuations de la nappe induites par l'installation

3.3.1.5. Facteur de risque relatif à la conception

Comme indiqué précédemment, l'installation peut, de par sa configuration et son dimensionnement, favoriser des entrées d'air dans la boucle primaire. Deux causes principales sont identifiées :

- Absence de dispositif de maintien de pression permettant la vidange de la boucle primaire ;
- Réseau primaire non en charge entraînant le contact de l'eau avec l'air.

3.3.2. Colmatage biologique

La formation de biofilm lié à l'action de différentes communautés de bactéries du cycle du soufre est une problématique caractéristique d'un milieu réducteur, anaérobie et présentant une forte concentration en sulfates (400 - 1000 mg/L). Ces conditions se rencontrent particulièrement dans l'aquifère des Sables de Cuise (Yprésien) en Ile-de-France. L'apport d'une faible quantité d'oxygène, permet d'initier l'oxydation bactérienne des produits issues de l'activité des bactéries sulfato-réductrices BSR/BTR. Les modalités d'apport en oxygène peuvent être comparables à celles induisant le colmatage par bio-oxydation du fer/manganèse (formation de biofilm lié à l'activité de ferro-bactéries et de dépôts d'oxydes de fer) explicitées précédemment. Un fonctionnement par intermittence des forages semble également favoriser le détachement du biofilm des surfaces et accélérer le colmatage des filtres.

La croissance bactérienne est directement dépendante de la présence d'une source de carbone inorganique ou organique et de nutriments dans l'eau souterraine. La présence d'une forte concentration en matière organique (naturelle ou induit par une pollution anthropique) assimilable par la biomasse peut induire aux niveaux des installations un risque accru de colmatage de nature « biologique ».

3.3.3. Colmatage chimique lié au carbonate de calcium

Le type de formation exploitée est déterminant pour cette typologie de colmatage. En effet, cette dernière n'a été rencontrée qu'en aquifère constitué d'un matériau carbonaté (matériau principal ou ciment d'une matrice détritique) où l'eau souterraine, suite à sa lente circulation à travers le milieu poreux, présente un excès en pression partielle de CO₂ par rapport à l'atmosphère et est devenue saturée au regard du carbonate de calcium.

Comme explicité précédemment, la déstabilisation de cette eau sursaturée est liée à trois facteurs :

- L'augmentation de température de l'eau géothermale en raison d'un fonctionnement de l'installation en mode « climatisation » ;



- Le dégazage du CO₂ entraîné par la circulation (variations pressiométriques) dans la boucle primaire ;
- L'hétérogénéité chimique de l'aquifère.

Tandis que l'impact sur l'équilibre chimique de l'eau, de l'élévation de sa température ou du mélange d'eaux hétérogènes peut être facilement quantifié via la modélisation géochimique, celui lié à l'impact des variations hydrodynamiques (variation de la pression du fluide, écoulements localement turbulents) dans la boucle géothermale est plus difficile à appréhender. Ces variations de conditions hydrodynamiques pouvant induire le dégazage du CO₂ se traduisent en effet par une évolution de plusieurs paramètres chimiques clés (pression partielle de CO₂, pH, concentration en calcium, ...) complexifiant l'étude de l'équilibre chimique de l'eau par la modélisation géochimique.

3.3.4. Colmatage particulaire

Comme pour le colmatage chimique, le type de formation exploitée est déterminant pour cette typologie de colmatage. En effet, cette dernière n'a été rencontrée qu'en aquifère constitué d'un matériau détritique. Les facteurs principaux contrôlant la mobilisation d'une charge particulaire dommageable à l'exploitation (De Zwart, 2007) sont explicités ci-dessous.

3.3.4.1. Facteur de risque relatif à l'hétérogénéité de l'aquifère et à la vitesse de circulation

La mobilisation de particules est favorisée dans les milieux où la distribution en taille des éléments qui composent le matériau de l'aquifère est dispersée (fort coefficient d'uniformité). L'érosion interne s'effectuera donc plus généralement dans un milieu hétérogène.

A l'approche de l'interface aquifère/massif de gravier, la vitesse de circulation peut toutefois être plus importante. Les hétérogénéités lithologiques verticales (alternances de niveaux à sables fins et de niveaux argileux imperméables, ...) conduisent à une segmentation importante des zones productives et des zones imperméables. Cette segmentation entraîne une concentration des flux sur quelques portions de l'aquifère face à l'équipement crépiné et en conséquence, des vitesses de circulation localement élevées peuvent générer l'érosion du milieu poreux et la mobilisation de fines. Un raisonnement similaire peut être réalisé pour le forage d'injection. En effet, de fortes vitesses d'infiltration peuvent être rencontrées localement, réduisant la capacité du milieu poreux à faire transiter la charge particulaire (Agbangla et al., 2012).

3.3.4.2. Facteur de risque relatif aux caractéristiques de la charge particulaire

Plus la concentration de la charge particulaire et le volume injecté seront importants, plus le milieu poreux dans l'environnement proche du forage d'injection sera confronté à un colmatage interne. Concernant la distribution granulométrique de la charge particulaire, plus le ratio du diamètre de la particule sur le diamètre de l'entrée du pore sera élevé, plus le milieu poreux sera sensible au colmatage entraînant une diminution de perméabilité.

3.3.4.3. Facteur de risque relatif au pompage discontinu

Dans le cas d'un fonctionnement discontinu, chaque démarrage de la pompe, induit la mobilisation des particules accumulées dans l'environnement proche du forage de pompage (Beek et al., 2009). Cette charge particulaire est réinjectée dans la formation via les forages d'injection alors exposés au colmatage physique.



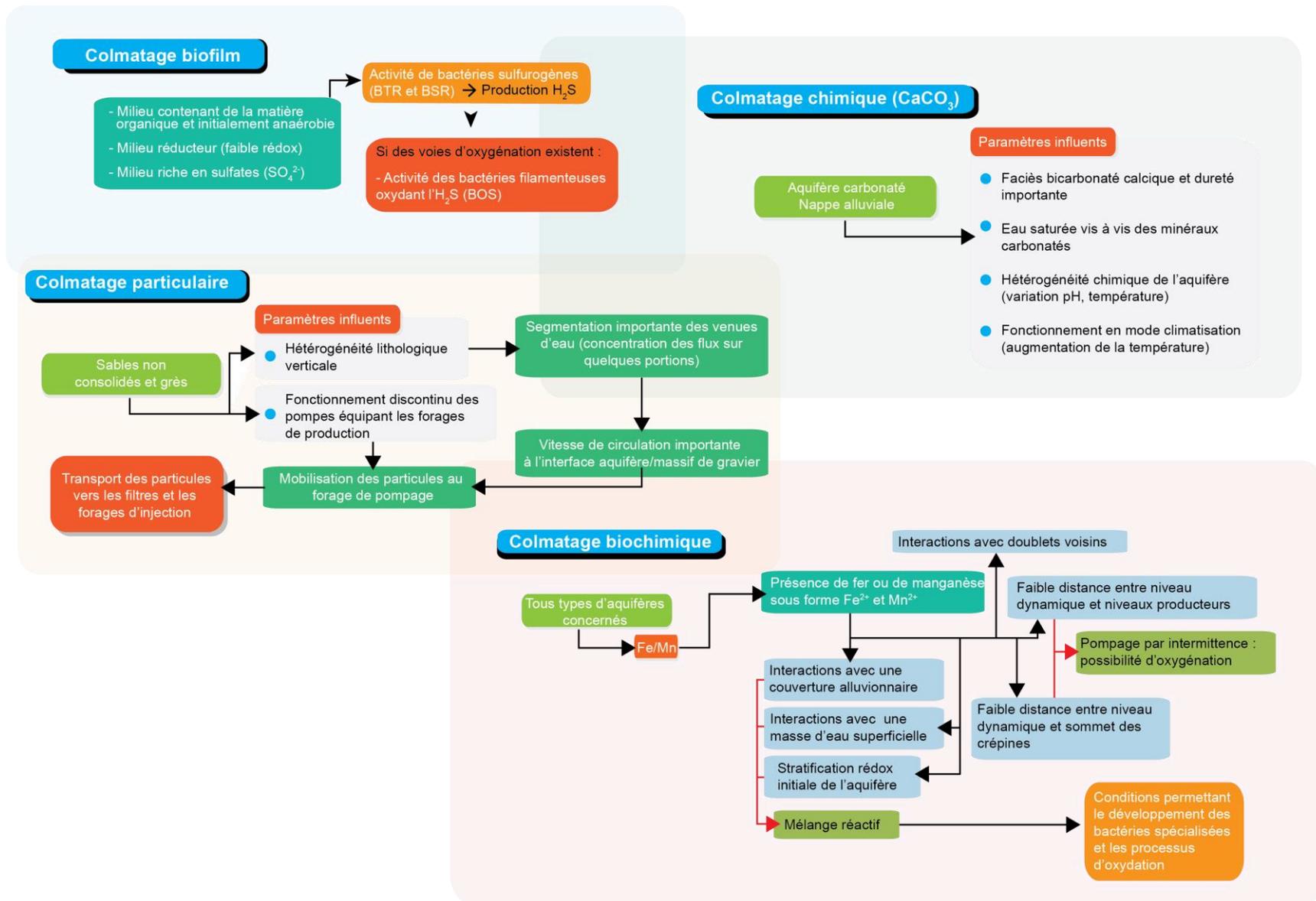


Figure 25 : Facteurs de risque contrôlant l'apparition des phénomènes de colmatage



4. Présentation de l'outil d'aide à l'évaluation et la gestion des risques de colmatage ARCADE

Dans le cadre du risque de colmatage des doublets géothermiques sur nappes superficielles, l'outil d'évaluation et de gestion du risque : ARCADE (**A**nalyse des **R**isques de **C**olmatage et **A**ide à la **D**écision) a été conçu d'une part pour évaluer le risque et d'autre part pour informer l'utilisateur averti des bonnes pratiques et moyens préventifs. Il n'est pas adapté aux projets de géothermie exploitant des aquifères plus profonds (> 200m de profondeur) et des eaux à des températures plus élevées que 28°C. L'outil informe aussi de l'état des connaissances actuelles sur les phénomènes de colmatage rencontrés en géothermie très basse énergie sur aquifères superficiels. ARCADE constitue le premier outil disponible d'analyse et d'aide à la gestion des risques de colmatage des doublets géothermiques sur aquifères superficiels. Cet outil n'a toutefois pas vocation à se supplanter à l'expertise des bureaux d'études spécialisés dans le domaine.

L'outil s'articule autour de deux méthodes d'évaluation du risque :

- Une évaluation qualitative (Figure 26) ;
- Une évaluation semi-quantitative (Figure 27).

4.1. Méthodologie de l'évaluation qualitative

Au stade des études faisabilité et de l'ingénierie de conception du projet, il est difficile d'évaluer précisément le risque de colmatage d'une installation en raison de la variabilité locale des paramètres physico-chimiques et hydrogéologiques. Le référencement des cas de colmatage existants (secteur géographique, typologie, caractéristiques techniques) permet de construire une première approche d'analyse guidant vers les bonnes pratiques et moyens préventifs permettant d'anticiper les risques connus.

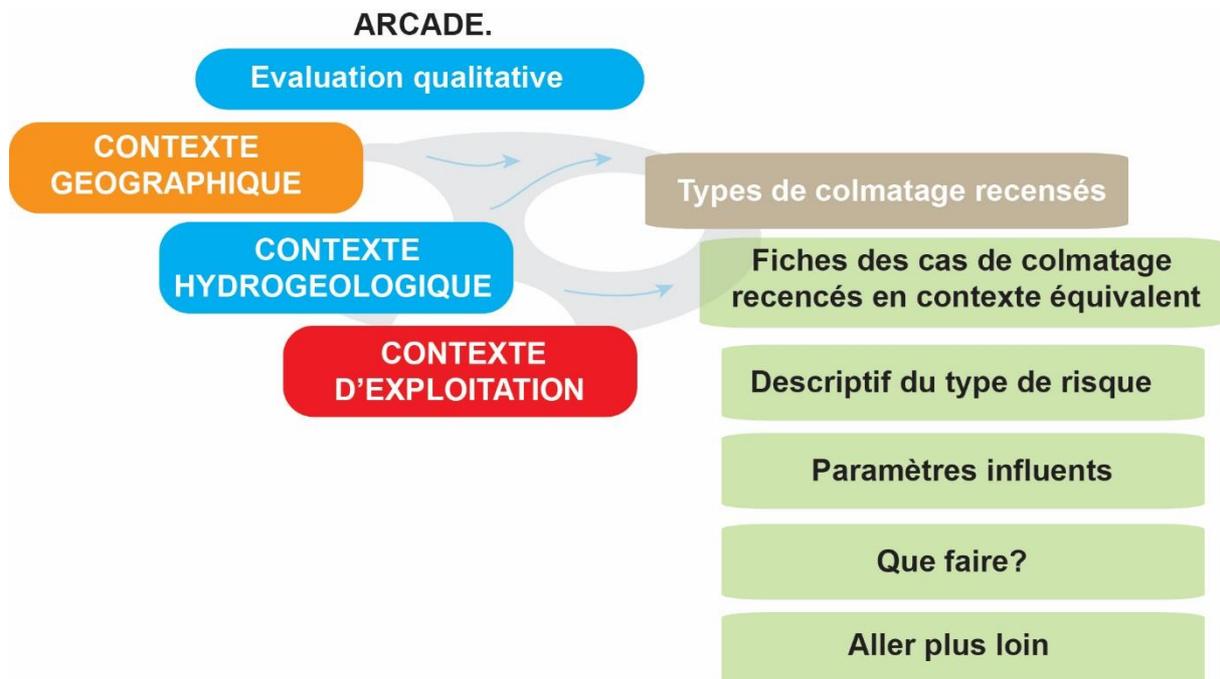


Figure 26 : Logigramme de la méthode d'évaluation qualitative



Cette première phase permet à l'utilisateur d'avoir connaissance des bonnes pratiques et des moyens préventifs à mettre en œuvre au regard des risques de colmatage référencés dans le contexte qu'il renseigne (géographique et hydrogéologique). Si l'aquifère ciblé par l'utilisateur n'est pas référencé (absence de cas de colmatage connus), celui-ci pourra se référer aux cas de colmatage référencés dans des contextes géologiques similaires. Pour chaque type de colmatage recensé (physique, chimique, biochimique et biologique) et dans le contexte hydrogéologique renseigné, l'outil fournit les informations suivantes :

- Les recommandations ainsi que les moyens préventifs pouvant être mis en œuvre
- La description du type de colmatage
- Les fiches descriptives des cas recensés
- Les paramètres influents contrôlant le phénomène de colmatage
- Des références bibliographiques permettant d'approfondir le sujet

Afin de faire évaluer l'état des connaissances sur la problématique de colmatage des doublets géothermiques, l'outil ARCADE permet à un utilisateur confronté à cette problématique d'enrichir la base de données sur laquelle s'articule cette première phase. L'animation réalisée autour de cet outil incitera les professionnels du secteur de la géothermie à participer à cette base de données en renseignant leurs cas de colmatage recensés, l'intérêt étant d'établir un outil évolutif et collaboratif.

4.2. Méthodologie de l'analyse semi-quantitative

L'approche semi-quantitative permet à l'utilisateur d'évaluer les risques de colmatage dans le contexte de son projet. Celle-ci s'effectue soit :

- Après la réalisation d'un forage de reconnaissance et obtention des résultats des différentes investigations (essais de puits, analyses d'eau, diagraphies)
- À l'aide de données de forages d'eau dans la zone géographique d'étude et l'aquifère ciblé et par le projet.

L'analyse semi-quantitative peut également être utilisée dans le cadre du diagnostic d'une installation présentant déjà des problèmes de colmatage et pour identifier les bonnes pratiques et mesures préventives à mettre en œuvre.

L'analyse semi-quantitative est une approche multicritère se basant sur des fonctions codées en Python 3 indépendantes et spécifiques à chacune typologie de colmatage.

Ainsi, l'outil ARCADE est composé de 4 modules Python :

- Module Risque biochimique (évaluation du risque lié à la précipitation biochimique du fer et du manganèse) ;
- Module Risque chimique (évaluation du risque lié à la précipitation du carbonate de calcium) ;
- Module Risque particulaire (évaluation du risque lié à l'entraînement particulaire) ;
- Module Risque biofilm (évaluation du risque engendré par la formation de biofilm lié à l'activité des bactéries du cycle du soufre).



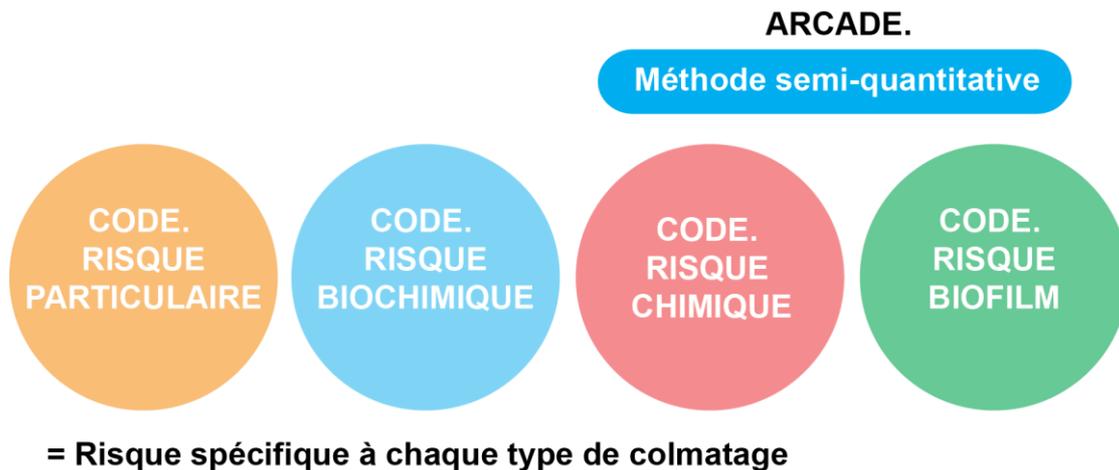


Figure 27 : Logigramme de la méthode d'évaluation semi-quantitative

Les différents modules calculent un indice échelonnant le degré de risque (Tableau 1). Un commentaire présentant les résultats de l'évaluation pour chaque type de risque est généré et délivré à l'utilisateur.

Echelle du risque	Sortie module Python
Risque non évaluable	-1
Risque absent (SI < 0	0
Risque moyen (SI > 0 mais...)	1
Risque fort (SI > 0 et...)	2

Tableau 1 : Echelle utilisée par l'outil ARCADE

L'évaluation semi-quantitative déclenche les différents modules uniquement si les paramètres « obligatoires » spécifiques à chacune des évaluations sont renseignés par l'utilisateur. Si un des paramètres obligatoires est manquant, le risque n'est pas évaluable (-1).

Les risques sont évalués à partir de méthodes décrites en Annexe. Une simplification des approches de modélisation est nécessaire pour permettre leur déploiement sur un outil en ligne mais aussi pour assurer une analyse rapide permettant à l'utilisateur d'avoir une première évaluation des risques. L'identification d'un risque à l'aide d'ARCADE ne signifie pas un « no go » mais traduit la nécessité d'établir une démarche complète permettant de valider le risque et d'envisager les méthodes préventives correspondantes.

4.3. Présentation de l'interface ARCADE

L'outil ARCADE est dédié aux professionnels du secteur de la géothermie très basse énergie. L'interface graphique, développé par Geohyd (www.geo-hyd.com), filiale d'Antea Group, sera accessible sur la plateforme web Géothermie-Perspective (www.geothermie-perspectives.fr), site de référence exclusivement dédié à la géothermie. Cette plateforme est coanimée par l'ADEME et le BRGM. L'accès à l'outil s'effectuera avec un login.

4.3.1. Evaluation qualitative

La Figure 28 présente l'interface correspondante à l'évaluation qualitative d'ARCADE. En possession des éléments de contexte de son projet (localisation géographique, choix de l'aquifère, etc.), l'utilisateur sélectionne l'évaluation qualitative (1). Le renseignement des différents items demandés par l'analyse (2) permet de connaître les types de colmatage spécifiques au contexte sélectionné par l'utilisateur (3). Le but est d'informer l'utilisateur sur les bonnes pratiques, les méthodes de caractérisation du risque et les moyens préventifs pour pérenniser l'installation.



4.3.2. Evaluation semi-quantitative

La Figure 29 présente l'interface correspondante à l'évaluation semi-quantitative d'ARCADE. En possession des éléments requis et définis en annexe, l'utilisateur sélectionne l'évaluation semi-quantitative (1). Chaque fonction codée sous Python est appelée lorsque les données obligatoires sont entièrement renseignées (2). Après avoir rentré les données à sa disposition, l'utilisateur est informé des modules d'analyse exécutables (3). Il est ensuite capable d'enregistrer son formulaire de données et d'y accéder à tout moment sur son espace personnel.

L'analyse indique ensuite, pour chacun des processus, le niveau de risque évalué (4) : faible, probable, fort. Un commentaire spécifique à chaque risque et informant l'utilisateur des résultats de l'analyse est automatiquement généré. Pour chacun des risques évalués, l'utilisateur est informé des démarches complémentaires pour valider l'analyse de risque ainsi que les moyens préventifs et les bonnes pratiques à mettre en œuvre.



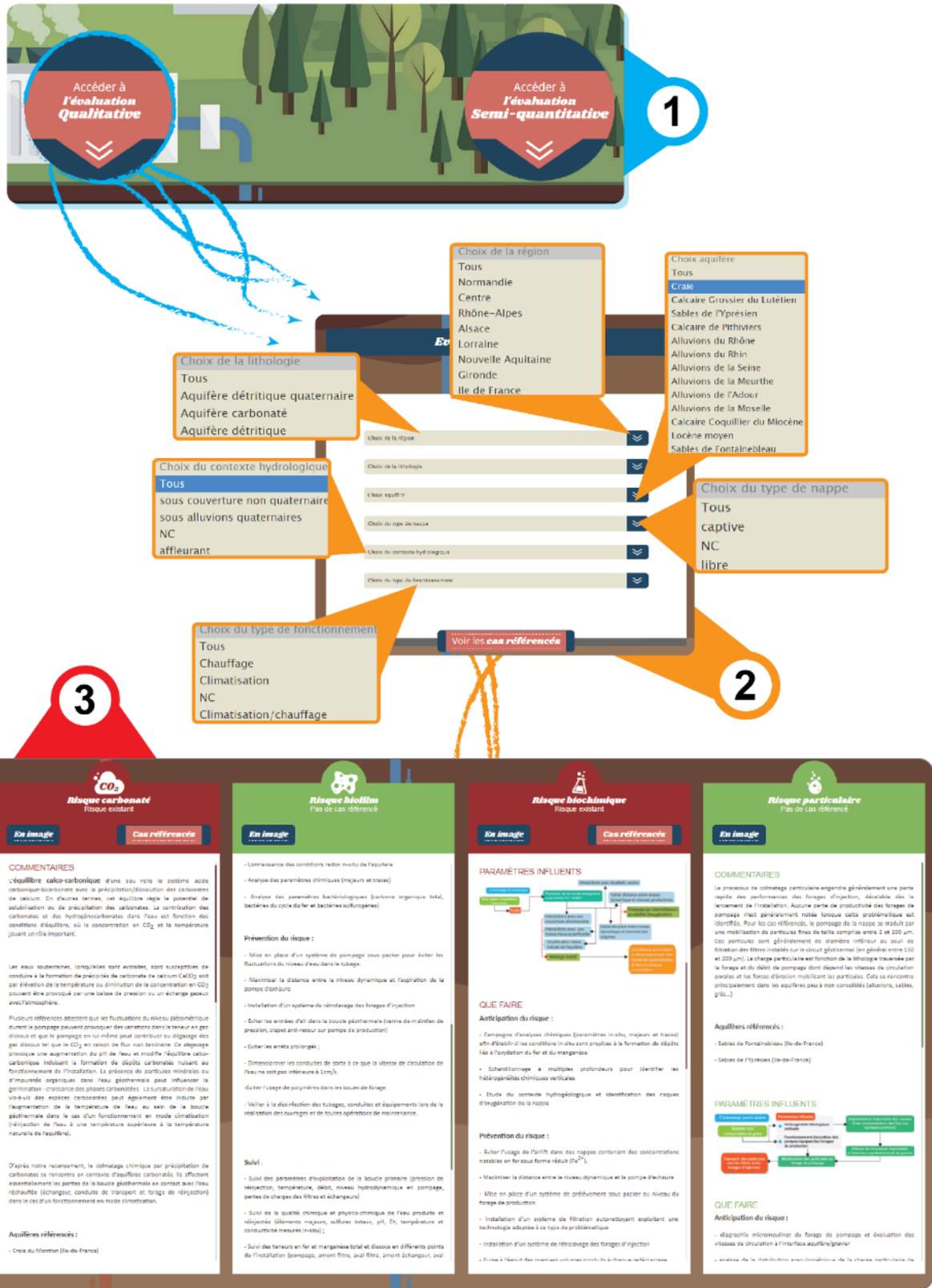


Figure 28 : Interface de l'analyse qualitative ARCADE



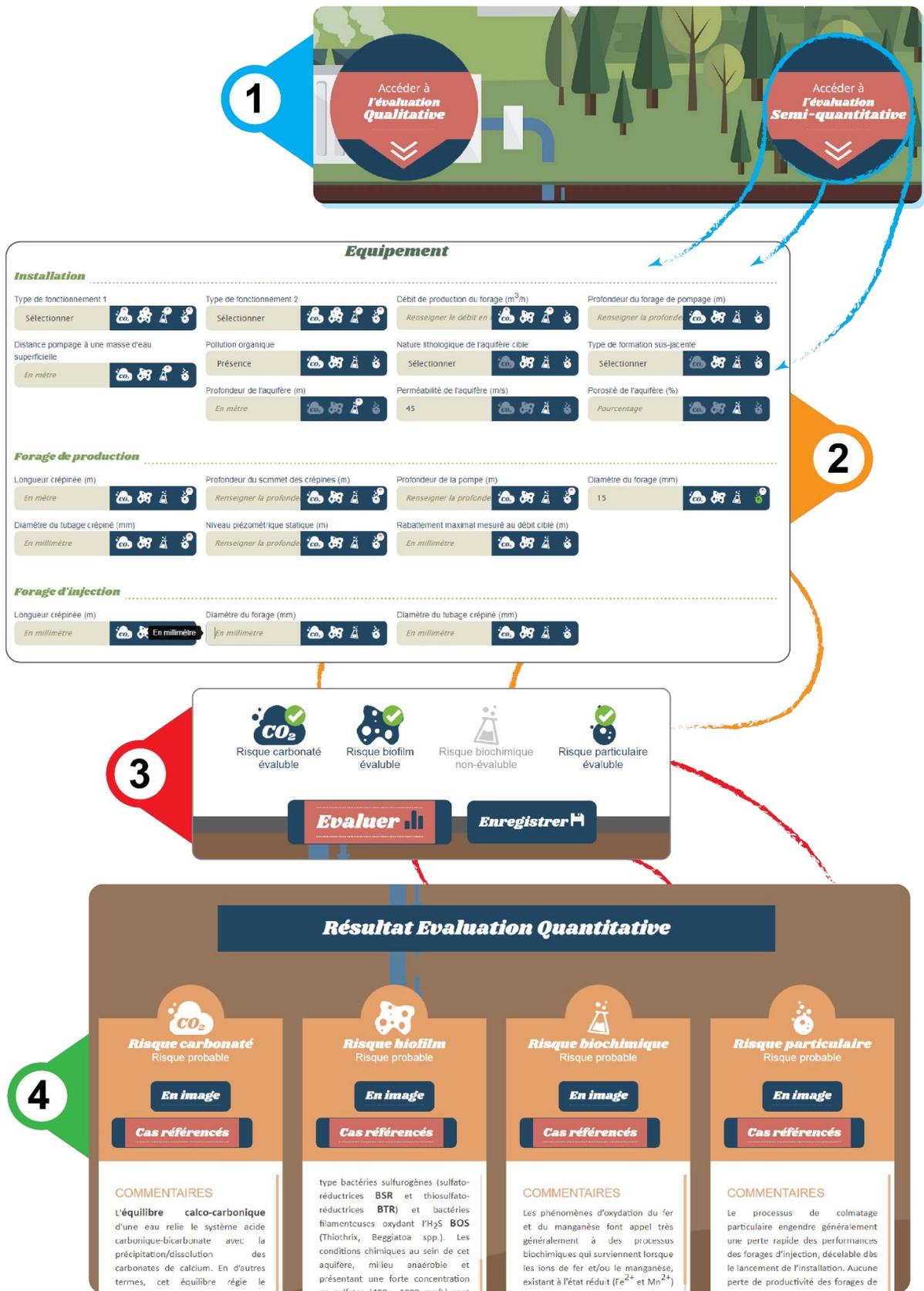


Figure 29 : Interface de l'analyse semi-quantitative ARCADE



5. Préconisations relatives à l'acquisition des données pour l'évaluation des risques de colmatage

L'acquisition des paramètres chimiques (y compris charge particulaire), physico-chimiques et bactériologiques de l'eau, des caractéristiques hydrogéologiques de la formation ainsi que des paramètres hydrodynamiques des ouvrages au stade de la réalisation des forages (de reconnaissance ou d'exploitation) est fondamentale pour l'analyse du risque de colmatage. Ce chapitre a pour objectif de récapituler les paramètres les plus importants à acquérir en vue d'une évaluation d'un risque de colmatage et de définir des méthodologies et des recommandations visant à assurer la représentativité et la fiabilité des données qui sont requises pour l'utilisation du code ARCADE.

5.1. Caractérisations des paramètres physico-chimiques, chimiques et de la charge particulaire de l'eau

5.1.1. Paramètres à déterminer et méthodologie

Les paramètres à déterminer sont les suivants :

- Paramètres physico-chimiques à mesurer sur site : Température, pH, Eh (potentiel redox), Oxygène dissous, Conductivité ;
- Analyses des anions et cations majeurs dissous : Ca, Mg, K, Na Cl, SO₄, HCO₃, CO₃, NO₃ ;
- Analyses des éléments traces dissous : CO₂ dissous, NO₂, NH₄, PO₄, SiO₂, F, Al, Br, As, Sr, Ba, Cu, Zn, Pb, I, Ni, Cr total, Cr⁶⁺, Fe dissous (Fe²⁺), Fe total, Mn dissous (Mn²⁺), Mn total, H₂S ;
- Analyse des paramètres organiques : Carbone organique dissous et total, hydrocarbures totaux, COHV, BTEX, HAP ;
- Analyse de la charge particulaire de l'eau : MES, distribution granulométrique des particules (comptages optiques de particules suivant ISO 21501-3).

Une bonne connaissance des paramètres chimiques du milieu aquifère cible et de leur variabilité est indispensable lors de la réalisation d'un projet de doublet géothermique sur nappe. Les investigations concernant la caractérisation physico-chimique de l'eau souterraine doivent être effectuées sans qu'il n'y ait de doutes sur la représentativité des échantillons prélevés. Par exemple, les phases de développement chimique (stimulation à l'acide ou autre composé) des forages peuvent perturber le fond géochimique dans l'environnement proche puits, malgré un renouvellement conséquent. Il est donc nécessaire de s'assurer du renouvellement suffisant de l'eau pour atteindre le fond géochimique représentatif de l'aquifère. Les prélèvements et mesures doivent être réalisés idéalement au plus proche du forage de production pour minimiser les altérations de la qualité liées à la circulation de l'eau dans un réseau de surface. Un piquage à la sortie de la colonne d'exhaure en tête du puits est donc idéal. Les mesures et les prélèvements doivent être réalisés en pompage après avoir renouvelé 2 à 3 fois le volume du puits. Si des essais par paliers de débit sont réalisés, les mesures et prélèvements doivent être réalisés au cours du dernier palier. Ce prélèvement est représentatif d'un mélange d'eau issues des différentes zones productrices du forage sollicitées au débit de l'essai du pompage longue durée. Les mesures et prélèvements doivent être réalisés sur chacun des forages de sorte à identifier une potentielle hétérogénéité chimique au sein de l'aquifère.

Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des récipients propres, rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser (s'il ne contient pas d'acide), et fermés hermétiquement. Pour l'analyse des majeurs, les flacons peuvent être en plastique (PE). Ils sont conservés à l'abri de la lumière et entre 2 à 4°C jusqu'au moment de l'analyse. Pour les cations, anions et traces dissous, l'échantillon est filtré sur un filtre à usage unique à 0,45 µm ou inférieur (à l'aide d'une seringue propre et un filtre préalablement rincé par le passage de quelques dizaines de millilitre) et acidifié avec HNO₃. Pour l'analyse des métaux totaux (dissous + précipités), comme le fer total et le manganèse total, le prélèvement ne doit pas être filtré mais uniquement acidifié avec HNO₃ pour atteindre un pH<2.



L'enregistrement des paramètres physico-chimiques (Eh, O₂, pH, conductivité, température) pendant la durée de l'essai longue durée permet d'obtenir des renseignements sur les variations temporelles à faible échelle pouvant être induites par la mise en pompage et permet de s'assurer aussi de la qualité de la mesure. L'enregistrement des paramètres in-situ peut être effectué de deux manières :

- Utilisation d'un boîtier enregistreur et sondes de mesures multi-paramètres (capteurs pH, Eh, O₂, conductivité, température calibrées et vérifiées) positionnées dans une cellule étanche à flux continu (Figure 30) empêchant toute contamination avec l'atmosphère. L'alternative à la cellule à flux continu est d'utiliser un seau alimenté en continu par l'eau provenant du forage (tuyau d'alimentation et sondes positionnées en fond du seau). Les prélèvements destinés aux analyses chimiques doivent être effectués en amont de cette cellule.



Figure 30 Exemple de cellule à flux continu destinée à la mesure des paramètres physico-chimiques des eaux de forage

- Utilisation d'une sonde multi-paramètres datalogger in situ (capteurs pH, Eh, O₂, conductivité, température calibrées et vérifiées) équipée d'un capteur pression et permettant la mesure des paramètres à une profondeur déterminée dans le forage (Figure 31 et Figure 32).



Figure 31 Sonde Hydrolab HL4 (OTT Hydromet) – Diamètre 4.44 cm, longueur 5.33 cm



Figure 32 Sonde Ocean SEVEN303plus (IDRONAUT) Diamètre 4.3 cm, longueur 7 cm

Garantir une analyse fiable de l'oxygène dissous et du Eh est primordial pour l'évaluation du risque de colmatage notamment de type biochimique et biologique. Cette mesure doit être effectuée sur site avec une sonde parfaitement calibrée et peut être réalisée à différents débits de pompage de sorte à pouvoir appréhender une éventuelle hétérogénéité verticale de ces paramètres (notamment ceux liés aux conditions d'oxydo-réduction : O₂ et Eh) liée à différentes venues d'eau. Toutefois la caractérisation de cette hétérogénéité verticale passe par la mise en œuvre d'une méthodologie spécifique présentée ci-dessous.



Une fois les résultats obtenus, le calcul de la balance ionique permettra de juger de la qualité de l'analyse des échantillons. Elle est calculée sur les 8 éléments majeurs à savoir pour les eaux superficielles :

- 4 cations Na, K, Ca, Mg
- 4 anions Cl, SO₄, NO₃, HCO₃

La balance ionique est calculée à partir de la somme des anions et cations majeurs (concentrations exprimées en meq/l) suivant la formule suivante.

$$BI (\%) = ((\Sigma \text{cations} - \Sigma \text{anions}) / (\Sigma \text{cations} + \Sigma \text{anions})) \times 100$$

$$\Sigma \text{cations} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]$$

$$\Sigma \text{anions} = [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{HCO}_3^-]$$

Pour respecter l'électroneutralité de l'eau, la balance ionique doit être équilibrée c'est à-dire égale à zéro.

Les résultats d'analyses chimiques sont considérés comme :

- Excellents lorsque $BI < 5\%$
- Acceptables lorsque $5\% \leq BI < 10\%$
- Douteux lorsque $BI \geq 10\%$

Le code « risque biochimique » dans l'évaluation semi-quantitative de l'outil ARCADE permet le calcul de la balance ionique.

Une erreur sur la balance ionique peut provenir d'une erreur analytique (résultats des analyses non valides) ou d'une minéralisation particulière (ions présents dans l'eau qui n'ont pas été analysés).

En ce qui concerne la caractérisation de la charge particulaire, la littérature fait souvent référence à l'indice de colmatage MFI (Modified Fouling Index). Cet indice se rencontre communément pour déterminer le potentiel de colmatage d'un système de filtration membranaire. La méthode se base sur la mesure de la vitesse à laquelle une membrane (0.45µm) se colmate durant la filtration à pression constante du liquide à tester. Cette méthode d'évaluation du potentiel de colmatage semble toutefois inappropriée en l'état pour l'évaluation du risque de colmatage des doublets géothermiques sur nappe. En effet, dans le cadre de ce projet, plusieurs essais ont été réalisées sur des doublets présentant des désordres liés à des processus biochimiques et chimiques sans colmatage décelable de la membrane au cours de l'essai et cela malgré une durée de test supérieure à celle recommandée.

L'analyse de la charge particulaire (MES) et de sa distribution granulométrique à différents débits stabilisés durant un test de pompage permet d'évaluer l'incidence du débit de production sur le nombre de particules produites et leur granulométrie. Dans des réservoirs peu ou mal consolidés cette information sera utile pour dimensionner les systèmes de filtration et éventuellement adapter le débit d'exploitation.

5.1.2. Méthodologie de détermination des hétérogénéités géochimiques verticales du forage de pompage

La détection d'oxygène et de fer dissous et/ou particulaire dans l'eau prélevée en tête d'un forage doit particulièrement alerter le bureau d'étude en charge du suivi des travaux. Sauf erreur (prélèvement mal réalisé, sonde mal calibrée, erreur analytique), cette combinaison peut en effet attester d'une hétérogénéité géochimique au sein de la colonne d'eau captée par le forage. Les hétérogénéités géochimiques des aquifères sont difficilement prévisibles au stade de l'étude de faisabilité. Seules les mesures au sein d'un forage de reconnaissance dans la zone d'intérêt du projet permettent de les identifier. Par ailleurs, les analyses des prélèvements réalisés en tête de puits ne permettent pas de caractériser une hétérogénéité chimique verticale.

Les tests hydrauliques (essais par paliers et longue durée) sont l'occasion de mettre en place une méthodologie spécifique qui a été mise au point et testée dans le cadre de ce projet. Cette méthodologie décrite ci-après a pour objectif d'identifier et de localiser des zones productrices oxydantes (O₂, NO₃) et



des zones productrices réductrices (Fe^{2+}) afin de définir les mesures correctives qui permettront une exploitation pérenne du doublet.

Les équipements nécessaires à la mise en œuvre de cette méthodologie sont les suivants (Figure 33) :

- Une pompe immergée permettant d'atteindre le débit de pointe recherché par l'exploitant, le but étant d'approcher les conditions d'exploitation ;
- Un micromoulinet pour la caractérisation des différents niveaux producteurs ;
- Des sondes de diagraphie in-situ (Oxygène dissous, pH, Température, Potentiel redox, Conductivité) ;
- Une pompe immergée destinée au prélèvement in situ (type MP1 2" Grundfos) en vue de réaliser des analyses chimiques des éléments majeurs et traces.

Le diamètre du forage doit être suffisant pour mettre en place les équipements de prélèvement et de mesure.

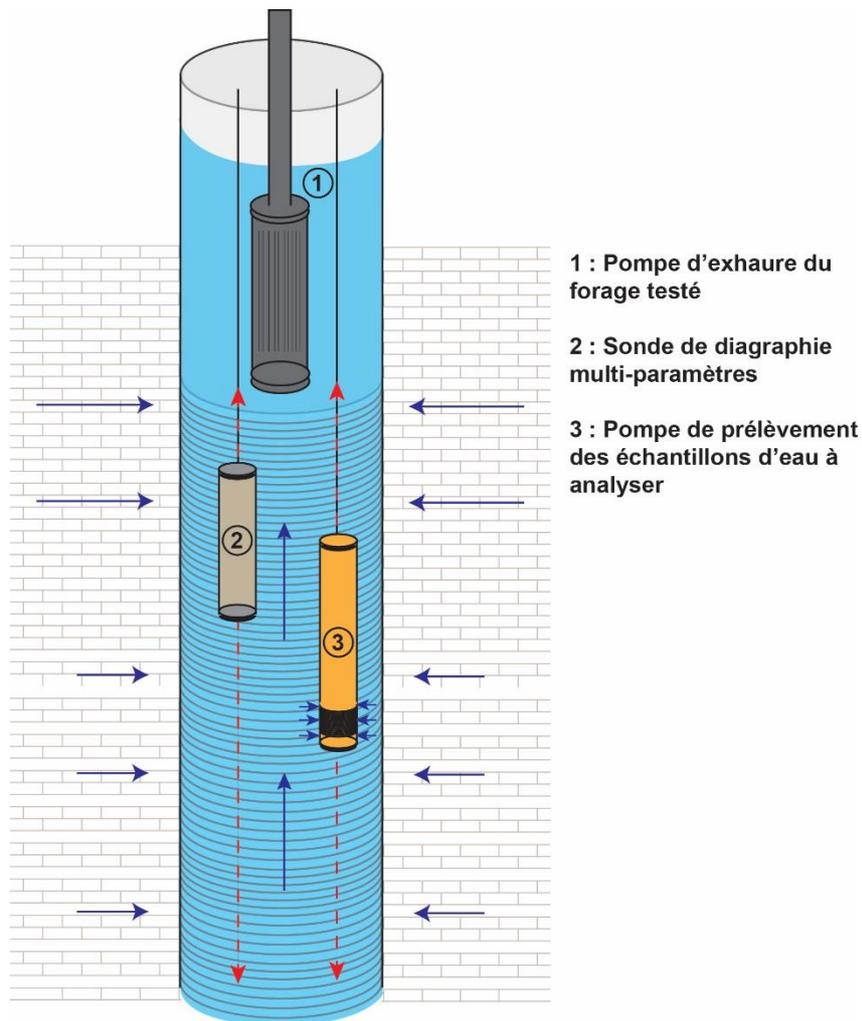


Figure 33 : Schéma du dispositif de prélèvement et de mesures

5.1.2.1. Etape 1 : Mesures en condition dynamique (en pompage)

Le débit de pompage durant l'essai doit être suffisant pour entraîner la sollicitation des différentes zones productrices du forage. En condition dynamique, les flux sont ascendants en direction de la pompe immergée (positionnée au-dessus du tube crépiné). Un mélange est alors généré progressivement de bas en haut de la zone crépinée. La part de contribution des zones productrices à ce mélange est évaluée à l'aide des résultats du micromoulinet.

Un profil vertical des paramètres physico-chimiques (O₂, pH, Conductivité, Température, potentiel rédox) est à réaliser à l'aide de la sonde multi-paramètres de diagraphie in-situ. Avant la mesure, une attention particulière doit être portée sur la calibration des différents capteurs, spécialement pour l'oxygène dissous qui est un des paramètres critiques de cette évaluation. La descente et la remontée de la sonde doivent être suffisamment lentes pour permettre la stabilisation des paramètres mesurés. Une pompe d'échantillonnage à faible débit (type MP1 2" Grundfos) est à utiliser pour réaliser des prélèvements à différentes profondeurs (la stratégie de prélèvement est à adapter en fonction des résultats des diagraphies physico-chimiques). Ces prélèvements doivent permettre à minima l'identification des espèces réduites du fer et du manganèse ainsi que des nitrates, sulfates et la concentration en carbone organique total et dissous. En fonction de la hauteur à laquelle sont effectués le prélèvement et les mesures physico-chimiques, les zones productrices pourront être caractérisées dans leur globalité ou individuellement. Ainsi, le prélèvement et les mesures réalisés en tête des crépines seront représentatifs de la somme des contributions de chacune des zones productrices (mélange global de la colonne d'eau). Par contre, à chaque augmentation de la profondeur (descente de la pompe), le prélèvement et les mesures seront représentatifs de chacune des zones productrices face à la pompe et sous-jacentes à celle-ci. La comparaison avec le profil de débit (micromoulinet) permet de vérifier que l'hétérogénéité mesurée est bien reliée au flux provenant d'une nouvelle zone productrice et permet de quantifier l'apport de chaque zone productrice.

5.1.2.2. Etape 2 : Mesures en condition statique (après période de repos de quelques heures)

Les diagraphies in-situ sont à réaliser en condition statique après une période de repos de quelques heures (variable en fonction de la réactivité de l'aquifère). Les signaux obtenus en condition dynamique peuvent varier fortement de ceux obtenus en condition statique. En effet, des flux naturels verticaux peuvent exister entre les différentes zones productrices du forage en l'absence de pompage. Ces flux verticaux au sein de la colonne d'eau contrôlent la distribution des espèces chimiques et conditionnent le signal obtenu lors des diagraphies physico-chimiques réalisées en statique. Ces flux verticaux peuvent être détectés et leur vitesse analysée à l'aide d'une sonde « Heat-pulse ». Cette sonde est en quelque sorte un débitmètre thermique permettant d'identifier le sens et les vitesses d'écoulements verticaux de façon discrète au sein du forage (Le Borgne et al., 2006).

Les mesures réalisées en dynamique et en statique sont complémentaires car elles permettent d'établir l'hétérogénéité chimique de l'eau et de localiser les zones contribuant à cette hétérogénéité (Figure 34).



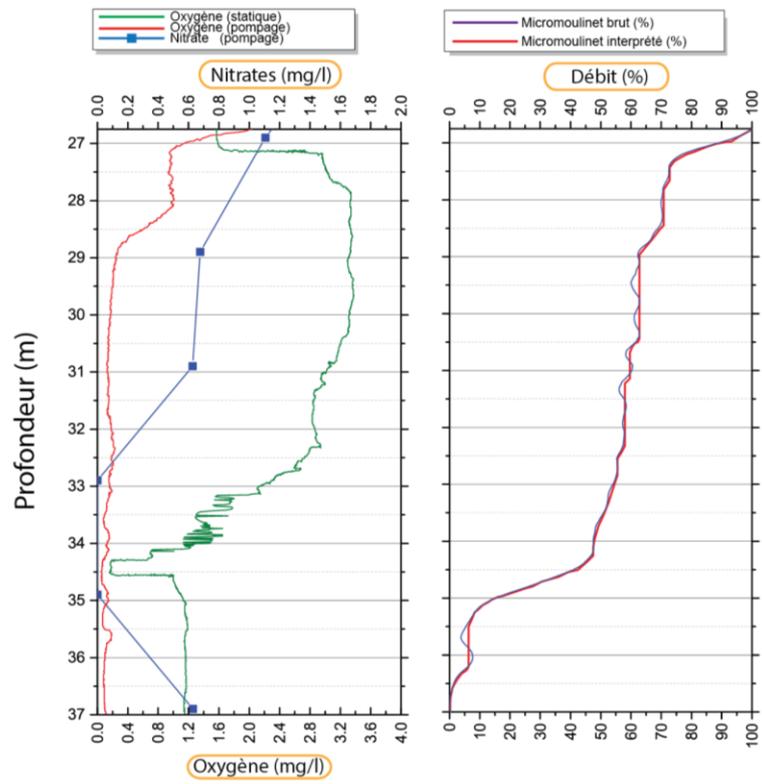


Figure 34 : Exemple d'hétérogénéité chimique détectée au forage de pompage provoquant le colmatage du doublet géothermique



5.2. Caractérisations des paramètres bactériologiques

Seules les bactéries mises en jeu dans les processus de colmatage biochimique et biologique doivent faire l'objet d'une analyse qualitative ou quantitative (FeOB, BTR, BSR ou BOS). Compte tenu que ces bactéries se fixent préférentiellement sur les surfaces, il faut privilégier une analyse des dépôts ou des matières en suspension récupérées après filtration à 0,2 μm . Si la matière solide n'est pas présente en quantité suffisante, alors les analyses peuvent être pratiquées sur des prélèvements d'eau, mais il faut garder à l'esprit qu'un résultat négatif ne signifie pas pour autant que les bactéries sont absentes du milieu. De plus, les bactéries peuvent se développer suite à la mise en exploitation des forages et être absentes dans les prélèvements réalisés lors des essais de puits à la réception des ouvrages.

La détection des FeOB s'effectue qualitativement par observation microscopique ou sur un milieu de culture (milieu à gradient O_2/Fe). Les bactéries sulfurogènes BSR et BTR sont quantifiées par ensemencement sur des milieux de culture spécifiques suivant la méthode du Nombre le Plus Probable basée sur la norme NF T90-413 (par ex. ensemencement in-situ de milieux de culture type kits Labège BSR et BTR). Les bactéries oxydant le sulfure d'hydrogène BOS (Beggiatoa, Thiothrix) sont détectées qualitativement par observation microscopique.

5.3. Caractéristiques hydrogéologiques à considérer pour l'évaluation du risque de colmatage

Les données hydrogéologiques propres à la formation à considérer pour l'évaluation du risque de colmatage sont les suivantes :

- Pour les aquifères peu ou mal consolidés, les données des analyses granulométriques réalisées sur les cuttings récupérés lors des opérations de forage qui permettent d'appréhender l'hétérogénéité lithologique de l'aquifère capté et d'approcher une porosité à partir de formules empiriques ;
- Le type d'aquifère (libre, semi-captif, captif) ainsi que sa nature géologique (Alluvions/carbonatée/détritique hors alluvions) ;
- Les caractéristiques géométriques de l'aquifère (profondeur du toit et du mur de l'aquifère, caractère superficiel et vulnérabilité, distance d'une masse d'eau superficielle) ;
- Le gradient naturel de la nappe ;
- L'existence d'une drainance verticale affectant l'aquifère cible ;
- L'existence d'exploitations voisines pouvant impacter le projet.

5.4. Caractéristiques hydrodynamiques des ouvrages à considérer pour l'évaluation du risque de colmatage

Définir les caractéristiques hydrodynamiques initiales des ouvrages permet d'établir un T0 pour le suivi de l'évolution dans le temps des capacités hydrodynamiques des forages (partie 7). Ces paramètres constituant ce T0 sont issus des essais de puits et mesures effectués avant réception (longue durée, par palier, test d'injection, essai en boucle, diagraphies). Il s'agit :

- Débits spécifiques en pompage des ouvrages (Q/s , $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, débit/rabattement) ;
- Débits spécifiques en injection des forages d'injection (Q/s , $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, débit/remontée) ;
- Pertes de charges des ouvrages ;
- Distribution des niveaux d'eau (statiques et dynamiques) des ouvrages soumis à exploitation ;
- La quantification des venues d'eau et leur vitesse de circulation (données acquises via la réalisation d'un micromoulinet) ;
- Perméabilité (K , m/s) et transmissivité (T , m^2/s) initiales des ouvrages



6. Prévention des risques de colmatage des doublets géothermiques sur nappes superficielles

La prévention des risques de colmatage des doublets géothermiques sur nappe passe par la mise en œuvre de mesures préventives et de bonnes pratiques aux différentes étapes du projet depuis la phase étude jusqu'à la phase d'exploitation en passant par les phases de conception et de travaux. Plus les risques sont anticipés en amont au stade des études et de l'ingénierie de conception et plus leur prévention sera aisée.

Cette partie vise à dresser un inventaire des mesures préventives qui sont viables d'un point de vue technico-économique et intègrent les contraintes réglementaires d'un projet de géothermie de minime importance (Arrêté du 25 juin 2015). Au-delà de ces mesures, des recommandations sont formulées pour limiter les risques de colmatage. Elles sont basées sur le retour d'expérience et l'expertise des partenaires du projet ainsi que sur un état de l'art dans le domaine du forage d'eau.

6.1. Prévention des risques de colmatage au stade des études de faisabilité

Dès les études de faisabilité d'un doublet géothermique sur nappes superficielles, il est important d'anticiper sur les mesures préventives qui devront être mises en œuvre pour limiter les risques de colmatage. Pour cela, une première évaluation des risques doit être mise en œuvre. Elle passe par un état des lieux des retours d'expérience de l'exploitation de forages d'eau (forages AEP ou dédiés à l'irrigation ou la production d'eau industrielle, doublets géothermiques) dans la zone géographique et dans le contexte hydrogéologique du projet. La base de données de l'outil ARCADE récapitule un certain nombre de cas de colmatage de doublets géothermiques sur nappe dans différentes zones géographiques et différents contextes hydrogéologiques. Elle n'est pas exhaustive et pourra être enrichie.

Dans un second temps, il faut effectuer une analyse de l'ensemble des facteurs de risques récapitulés Figure 25 et pouvant être considérés au stade de l'étude de faisabilité. A ce stade, pourront notamment être pris en compte :

- Le contexte hydrogéologique au droit du projet notamment : présence d'une masse d'eau superficielle, aquifère libre peu productif, aquifères détritiques (sables, grès) ;
- Les données disponibles sur les qualités chimique et bactériologique de l'eau (base de données interne, bases de données BSS Infoterre, ADES, BASIAS/BASOL, ARCADE et autres sources de données) qui permettent d'évaluer le risque de colmatage biochimique (par exemple, si absence de fer et de manganèse dissous, les facteurs de risques concernant le colmatage biochimique deviennent neutres) ;
- Le mode de fonctionnement de la PAC : si production de froid, il faut alors considérer via le module « risque carbonate » de l'outil ARCADE l'état d'équilibre de l'eau vis-à-vis du carbonate de calcium et prendre en compte dans le dimensionnement de l'installation la température maximale de réinjection garantissant l'absence de saturation de l'eau vis-à-vis de cet espèce. Si cette température, est trop limitante pour l'économie du projet, une mesure préventive vis-à-vis de la précipitation des carbonates devra être envisagée pour le forage de réinjection (cf. mesures préventives).

Sur la base de cette analyse au stade de l'étude de faisabilité du projet, des recommandations et des mesures préventives doivent être considérées puis intégrées dans les études d'ingénierie de conception. Toutefois, les risques de colmatage réellement encourus ne peuvent être précisés qu'à l'issue de la réalisation d'un forage de reconnaissance qui permet de caractériser les conditions chimiques et hydrogéologiques de la ressource. Pour des raisons économiques, ce forage n'est pas souvent réalisé et ce sont les forages d'exploitation (production et réinjection) qui servent à cette caractérisation.



6.2. Prévention des phénomènes de colmatage au stade de la conception

Au stade de la conception des ouvrages, des dispositions doivent être considérées pour d'une part maximiser la pérennité des doublets géothermiques en regard du risque de colmatage et d'autre part pouvoir en assurer le suivi. Ces recommandations visent à sensibiliser les professionnels aux bonnes pratiques à mettre en œuvre dans le dimensionnement des installations pour réduire les risques de colmatage des doublets géothermiques sur nappe et en assurer le suivi. Elles sont complémentaires, aux prescriptions générales et spécifiques que les professionnels doivent mettre en œuvre lors de la réalisation d'un projet de géothermie sur aquifères superficiels. Ces dispositions sont notamment formulées dans les normes notamment NF X10- 999 (Forage d'eau et de géothermie. Réalisation, suivi et abandon d'ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forage) et DTU 65.9 (Installation de transport de chaleur ou de froid et d'eau chaude sanitaire entre productions de chaleur ou de froid et bâtiments) ainsi que dans l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance.

Le Tableau 2 récapitule les bonnes pratiques à mettre en œuvre au stade de la conception des installations.



Figure 35 : Cave d'avant puits inondée lors d'événements pluvieux. Par débordement, les eaux s'infiltrent dans le massif de gravier et s'introduisent dans le forage de réinjection générant des dépôts carbonatés sur la surface interne du tubage plein.



Recommandations	Objectifs	Types de colmatage concerné
Privilégier l'usage de matériaux inertes en regard des risques de corrosion : acier inoxydable type 316L, 304L ou PVC pour les tubes pleins et crépinés et la colonne d'exhaure	Limiter l'apport en fer dissous dans l'eau de production par processus de corrosion	Biochimique Biologique
Dimensionner les forages de pompage et le débit d'exploitation pour minimiser les vitesses de circulation à l'approche du forage de pompage (de sorte à ce que la vitesse de circulation de l'eau soit proche de 1 cm/s à l'interface massif de gravier/crépines)	Minimiser les forces d'érosion et la mobilisation de particules dans l'environnement proche du puits de production de sorte à éviter leur entraînement dans le forage de réinjection	Physique
En cas d'exploitation d'aquifère captif (eau anoxique potentiellement chargée en fer dissous), et en l'absence d'obturateur ou d'inertage à l'azote, maximiser la distance entre le niveau dynamique et l'aspiration de la pompe d'exhaure	Minimiser l'apport d'oxygène dans la colonne d'eau.	Biochimique Biologique
Installation d'une pompe immergée de production avec clapet anti-retour	Eviter l'entrée d'air dans le forage de production en cas d'arrêt d'exploitation	Biochimique Chimique Biologique
En cas d'aquifère captif (eau anoxique potentiellement chargée en fer dissous), s'affranchir des entrées d'air via l'annulaire entre le casing et le tubage dans la zone de rabattement par mise en place d'une cimentation de l'annulaire et d'un joint d'étanchéité surplombant le massif de gravier)	Limiter les risques d'oxygénation de l'eau géothermale et donc de précipitation des oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse via des processus chimiques et biochimiques liés à des entrées d'air au niveau de l'annulaire dans la zone de rabattement.	Biochimique Biologique
Surdimensionner les forages d'injection (en diamètre et nombre)	Maximiser l'aire d'infiltration et minimiser les forces d'érosion et la mobilisation des particules à l'entrée de l'aquifère	Tous types
Positionner la sortie de la colonne d'injection sous le niveau statique afin d'empêcher toute chute libre de l'eau	Eviter le dégazage et l'aération de l'eau	Chimique Biochimique Biologique
Installer une vanne de maintien de pression en amont du forage de réinjection ou à la base de la colonne de réinjection	Maintenir en pression le circuit primaire et le tube de réinjection (si vanne positionnée en pied de colonne de réinjection) de sorte à éviter les entrées d'air et le dégazage en cas d'arrêt	Chimique Biochimique Biologique
Garantir l'étanchéité de la cave d'avant-puits : tubage cimenté ou anneau en béton avec hydrofuge de masse, dalle en béton équipée d'un capot regard en fonte avec cheminée d'aération, placé à l'aplomb de la colonne d'équipement pour de futures travaux de maintenance et d'un second regard de visite, fond des avant-puits constitué par un radier en béton ancrée dans la cimentation de l'ouvrage Garantir l'étanchéité des puits par la mise en place de têtes étanches	Eviter toute pollution du puits par des eaux d'infiltration, ou de nappe perchée superficielle dans les remblais	Chimique (Figure 35) Biochimique Biologique



Recommandations	Objectifs	Types de colmatage concerné
Dimensionner le circuit primaire de sorte à ce qu'il soit en pression (minimum 0,5 bar) dans les conditions d'exploitation prévues notamment pour les débits les plus faibles. En cas de linéaires importants (>100 mètres), prévoir une pompe de réinjection pour assurer le maintien en pression dans le circuit et jusqu'au forage de réinjection.	Eviter le dégazage et l'aération dans le circuit primaire	Chimique Biochimique Biologique
Dans la mesure du possible, minimiser la longueur de la conduite de transport entre le forage de production et celui de réinjection	Minimiser le temps de résidence de l'eau géothermale dans la boucle primaire et minimiser les surfaces sur lesquelles les oxydes et hydroxydes peuvent précipiter puis s'adsorber	Chimique Biochimique Biologique
Prévoir la possibilité de rajouter un système de microfiltration en amont de l'échangeur et/ou en amont du forage de réinjection	Pouvoir assurer la filtration de particules d'oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse précipitant par voie chimique et biologique	Chimique Biochimique Biologique
Mettre en place un dispositif de rétrolavage du forage de réinjection	Pouvoir assurer le décolmatage des crépines et du massif filtrant par circulation inverse de l'eau dans le forage de réinjection	Tous types
Prévoir un rejet à l'égout	Etre en mesure d'évacuer les eaux de rétrolavage (quelques m3/semaine)	Tous types
Prévoir de doubler le système de filtration de premier niveau en amont des échangeurs (filtres à tamis ou cycloniques)	Etre en mesure de procéder aux opérations de maintenance sans arrêter l'exploitation (via un by-pass).	Tous types
Si un risque de précipitation chimique des carbonates a été identifié au stade des études de faisabilité, limiter la température de réinjection et/ou prévoir la mise en place d'un dispositif électromagnétique à minima au niveau du puits de réinjection (nécessité dans ce cas d'avoir des tubages pleins et crépinés en acier inoxydable).	Prévenir la précipitation de carbonate de calcium	Chimique
Prévoir des piquages en différents points de la boucle (tête de puits de production, amont et aval filtre, amont et aval échangeur, tête de puits réinjection)	Réaliser les prélèvements d'eau au cours du suivi d'exploitation	Tous types
Prévoir l'installation de capteurs pour le suivi métrologique	Enregistrement continu des niveaux d'eau (forages de production et d'injection), de la température au prélèvement et à la réinjection, du débit de production, des pressions à l'exhaure et à la réinjection.	Tous types

Tableau 2 Bonnes pratiques à mettre en œuvre au stade de la conception des installations



6.3. Prévention des phénomènes de colmatage lors des travaux, des essais et en phase d'exploitation

Les recommandations formulées dans le Tableau 3 ci-dessous s'appliquent aux phases de développement et d'essais de puits lors de la réception des ouvrages, à la mise en service de la boucle géothermale puis en phase d'exploitation. Elles visent à limiter les risques d'apparition de phénomènes de colmatage et sont complémentaires des bonnes pratiques à mettre en œuvre au stade de la conception de la boucle géothermale (Tableau 2).



Recommandations	Objectifs	Types de colmatage concerné
Privilégier l'usage de boues sans additifs organiques	Les polymères et autres substances organiques constituent un substrat nutritif pour certaines bactéries. Même s'il n'a pas été possible d'établir un lien direct entre l'usage de ces additifs dans les boues de forage et les processus de colmatage d'origines biochimiques et biologiques, il est préférable dans la mesure du possible d'en limiter l'usage	Biochimique Biologique
Eviter l'usage de l'air lift pour le développement des forages et leur nettoyage dans des nappes réductrices	La technique de l'airlift (injection d'air comprimé) est quasi-systématiquement mise en œuvre lors du développement et du nettoyage des forages. Cependant, cet apport massif d'oxygène au sein d'une nappe réductrice pouvant contenir des concentrations notables en ions Fe^{2+} induit l'oxydation biochimique du fer et peut favoriser la précipitation de carbonates par dégazage du CO_2 . Par ailleurs, l'air lift peut également conduire au piégeage de bulles d'air dans la porosité de l'aquifère augmentant le potentiel de précipitation des hydroxydes de fer (Martin R., 2013) et activant les processus biologiques d'oxydation du fer. Il est d'ailleurs fréquent d'observer par vidéo inspection la présence de dépôts et de biofilm sur les surfaces des tubes crépinés dès la réception des ouvrages.	Chimique Biochimique Biologique
Augmenter la durée de la phase de développement des forages en aquifères détritiques peu ou mal consolidés	La mobilisation des particules étant accentuée par l'augmentation du débit d'exploitation et les variations brutales de débit, il est conseillé pour les aquifères détritiques de développer les forages sur de plus longues durées en favorisant une montée en débit progressive et en augmentant la durée de chacun des paliers de débit. A chaque palier de débit, la charge particulaire sera contrôlée (MES et distribution granulométrique).	Physique
Rejet de l'eau pompée vers un exutoire externe à la boucle primaire lors du développement des forages, de la mise en service de la boucle géothermale et lors des opérations de réhabilitation des forages.	Les premiers m^3 d'eau pompés lors de la mise en service d'une boucle géothermale étant souvent très chargés en particules (issues du réservoir ou liées aux dépôts présents sur les surfaces des tubages et conduite de liaison), il est conseillé de ne pas les réinjecter dans le forage de réinjection. Il en est de même lors du développement des forages et lors des opérations de réhabilitation.	Physique
Veiller à la désinfection des tubages et équipements (pompe et colonne d'exhaure) lors de la réalisation des ouvrages et de toutes opérations de maintenance. Veiller à la désinfection de la conduite de surface lors de sa mise en service et de toute opération de maintenance	L'objectif de la désinfection des tubages et des équipements (pompe, colonne d'exhaure) lors de leur mise en place puis de la conduite de surface et des ouvrages lors de sa mise en service ou de toute opération de maintenance est d'éviter une contamination bactérienne exogène de l'aquifère et de l'ensemble de la boucle géothermale.	Biochimique Biologique



Recommandations	Objectifs	Types de colmatage concerné
A la mise en service de la boucle géothermale, nettoyage de la conduite de liaison par circulation de l'eau géothermale puis rejet vers un exutoire externe à l'installation	Des dépôts pouvant être présents sur la surface interne de la conduite de liaison avant sa mise en exploitation, il est conseillé de procéder à son nettoyage par circulation d'eau (considérer 2 à 3 fois le volume de la conduite) et rejet de l'eau vers un exutoire externe de sorte à ne pas réinjecter une eau chargée en particules dans le forage de réinjection.	Physique
Respect du débit maximal d'exploitation (rabattement maximal, vitesse de circulation)	Un débit excessif et supérieur à celui préconisé à l'issue de l'étude de faisabilité puis des essais hydrauliques aurait une double conséquence : <ul style="list-style-type: none"> - Augmenter les forces d'érosion et la mobilisation des particules dans l'environnement proche puits induisant un risque de colmatage physique du forage d'injection. - Augmenter le rabattement dans le forage de production et induire un risque d'oxygénation de l'eau pompée 	Tous types
Respecter la température maximale de réinjection notamment en contexte d'aquifères carbonatés et/ou prévoir la mise en place d'un dispositif électromagnétique à minima au niveau du puits de réinjection (nécessité dans ce cas d'avoir des tubages pleins et crépinés en acier inoxydable).	Prévenir la précipitation de carbonate de calcium	Chimique
Respecter les conditions d'utilisation du système de filtration primaire en amont de l'échangeur	Le non-respect du débit et de la pression maximaux opératoires des filtres primaires en amont échangeur peut induire leur endommagement et leur colmatage physique par des fines issues du réservoir (souvent des minéraux silicatés) qui viennent obstruer les mailles du tamis suite à une vitesse de circulation excessive. Le rétrolavage des filtres est par ailleurs souvent inefficace pour nettoyer les filtres colmatés par ce processus.	Colmatage physique des filtres primaires en amont échangeur

Tableau 3 Bonnes pratiques à mettre en œuvre au stade des travaux, des essais et en phase d'exploitation



6.4. Les principales techniques préventives

Bon nombre de produits chimiques (acides, chélatants, oxydants) disponibles sur le marché sont efficaces pour la réhabilitation des forages impactés par les processus chimiques, biochimiques et biologiques de colmatage ainsi que pour la prévention de ces phénomènes (Georg Houben and Christoph Treskatis, 2007b; Schwarzmüller, 2012). Toutefois, en France, la réglementation interdit l'usage de ces produits chimiques à des fins préventives et restreint l'usage de quelques-uns (acides, polyphosphates) aux opérations de développement et de nettoyage des puits. En effet, l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance (Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique, 2015) stipule :

4.1.6 « Pour les échangeurs géothermiques ouverts, aucune substance chimique n'est additionnée à l'eau de la nappe prélevée ou rejetée dans les ouvrages de production et de réinjection lors de l'exploitation du gîte géothermique. »

4.2 « Aucune substance chimique n'est additionnée, dans les ouvrages de production et de réinjection, à l'eau de la nappe prélevée ou rejetée. »

« Les opérations visant au nettoyage et développement du forage de production ou de réinjection se font de manière à ne pas introduire de produits chimiques induisant un risque pour la ressource en eau et ses usages potentiels. Les substances utilisées sont exclusivement des acides et des polyphosphates. »

En conclusion, seuls des moyens préventifs basés sur des procédés physiques sont donc envisageables pour prévenir les phénomènes de colmatage et pérenniser les doublets géothermiques sur aquifères superficiels. Ces moyens préventifs ont été listés dans le Tableau 2 présentant l'ensemble des bonnes pratiques à mettre en œuvre au stade de la conception des installations. Ils sont récapitulés dans le Tableau 4 ci-après et présentés en détail dans ce chapitre où pour chaque technologie sont abordés le principe, des éléments de dimensionnement et de coûts ainsi que des retours d'expérience basés sur la littérature et le savoir-faire des partenaires du projet Geoclogging.

Techniques	But	Types de colmatage
Dispositif de rétro-lavage des forages d'injection	Maintenir les performances des forages d'injection par décolmatage physique via la circulation de l'eau à contre-courant	Particulaire Chimique Biochimique Biofilm
Pompage sous obturateur	Éliminer l'interface eau/atmosphère dans les forages et éviter l'oxydation de l'eau	Biochimique Biofilm
Inertage par Azote	Inertier l'espace entre le niveau d'eau et la tête du forage de pompage	Biochimique Biofilm
Dispositif électromagnétique	Prévenir la formation de dépôts carbonatés	Chimique
Système de microfiltration autonettoyant	Protection de l'échangeur et du forage d'injection vis-à-vis des microparticules (oxydes, hydroxydes, silicates) et du biofilm	Particulaire Chimique Biochimique Biofilm

Tableau 4 Techniques physiques préventives



6.4.1. Système de rétro-lavage des forages d'injection

Le principe du rétro-lavage des forages d'injection (Snijders and Drijver, 2016) consiste en l'inversion du flux d'eau dans l'ouvrage d'injection. Cette inversion favorise la mobilisation des dépôts peu incrustants (formés au sein du forage d'injection ou transportés par la circulation de l'eau de production) s'étant accumulés à l'entrée des crépines et dans la porosité de l'environnement proche puits (massif de gravier - porosité de l'aquifère). L'effet bénéfique de ce procédé est d'ailleurs souligné pour les systèmes géothermiques de stockage basse température « ATEs (Aquifer Thermal Energy Storage) » où l'inversion entre le forage de production et d'injection s'effectue entre le mode production de chaud et le mode production de froid.

Sur le plan technique, ce procédé nécessite l'installation d'une pompe immergée au sein du forage d'injection assurant à minima un débit de pompage équivalent au débit d'injection (Figure 36). Il requiert également au niveau du forage d'injection, la réalisation d'une chambre de pompage ou l'adaptation du diamètre du tubage ainsi que des aménagements hydrauliques et électriques. La possibilité de s'affranchir de la mise en place d'une double colonne (colonne d'injection et colonne d'exhaure supportant la pompe) est réalisable en équipant la colonne d'injection d'une vanne hydraulique (par exemple vanne de régulation HPV commercialisée par Cla-Val Figure 37). En fonctionnement normal « injection mode », la vanne HPV (Hydraulic Pipe Valve) a pour rôle de maintenir la pression dans toute la boucle. Pour cela, un piston permet de réguler la pression (même lorsque le débit varie) en jouant sur l'ouverture des trous latéraux. Le « pumping mode » de la vanne HPV permet le pompage de l'eau dans le forage d'injection. Une pompe peut alors être raccordée à la vanne en vue de réaliser des opérations de rétro-lavage. La vanne HPV joue alors un double rôle : elle permet le maintien de pression dans la boucle et de réaliser un rétro-lavage sans rajouter de colonne d'exhaure dans le forage d'injection. Le coût d'une vanne HPV varie entre 5000 et 7000 EUR HT pour un débit compris entre 50 à 300 m³/h.

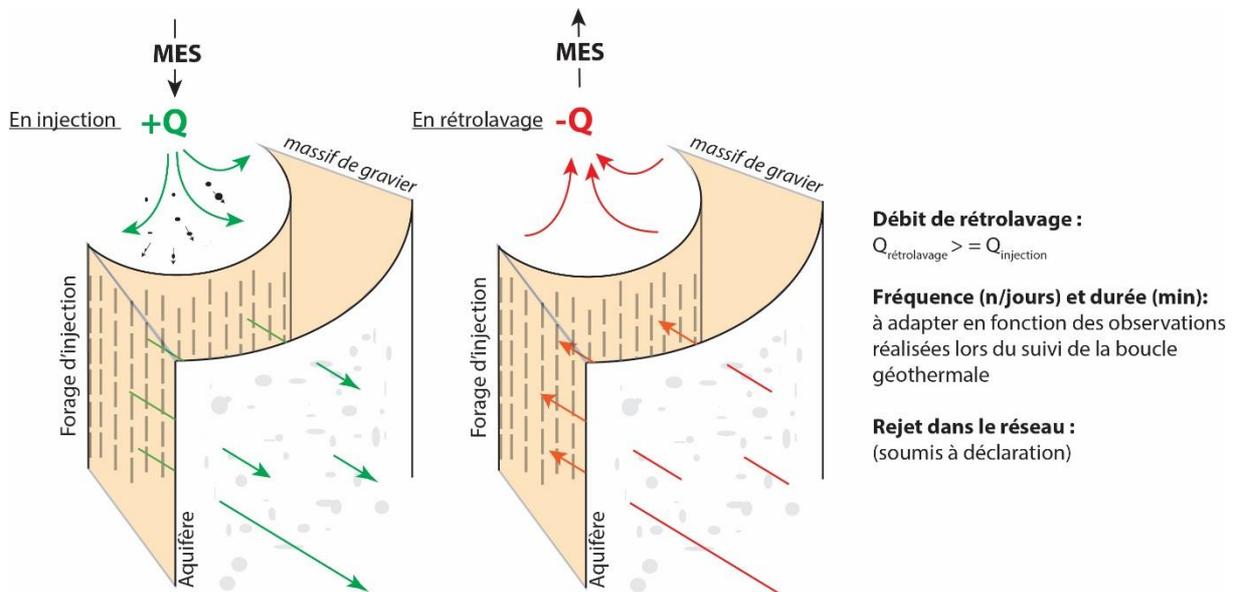


Figure 36 Principe du fonctionnement du dispositif de rétro-lavage



▶ HPV: Principles of Operation

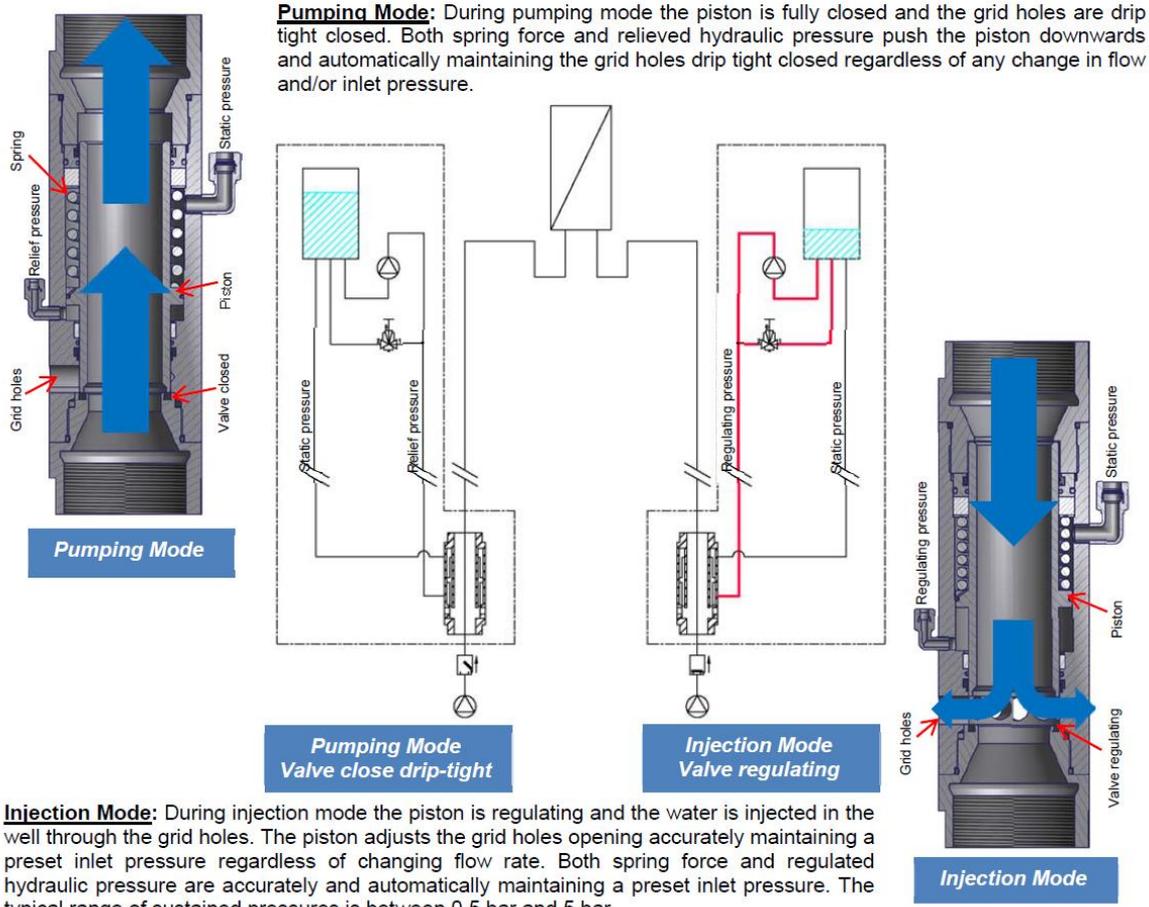


Figure 37 : Schéma de principe d'une vanne de régulation et de maintien de pression HPV Cla-val

Ce procédé peut être mis en œuvre à titre curatif puis à titre préventif de façon semi-continue à une fréquence à définir pour maintenir l'injectivité du forage. Le régime de rétro-lavage (fréquence, débit et durée du pompage) est à adapter en fonction de l'évolution des paramètres hydrodynamiques du forage de réinjection (pression d'injection, niveau dynamique). Les volumes d'eau issus du rétro-lavage sont évacués et non réinjectés dans l'aquifère. La mise en œuvre d'un tel procédé nécessite donc une autorisation administrative pour le rejet à l'égoût.

Sur le plan économique, la mise en œuvre de ce procédé sera d'autant moins lourde à supporter financièrement qu'elle sera prévue dès l'étape de conception de la boucle géothermale. Dans ce cas, le surcoût lié à l'aménagement de la boucle géothermale pour la mise en œuvre de ce procédé de rétro-lavage du forage d'injection est estimée à environ 10% du montant total des investissements pour la réalisation de la boucle primaire géothermale. A cela s'ajoute le coût de la redevance locale pour le rejet de l'eau au réseau d'eaux usées. Ces coûts sont à comparer aux coûts de la réhabilitation d'un forage de réinjection par voies mécanique et chimique (15 000 à 36 000 EUR HT) en tenant compte de la nécessité de répéter ces opérations à une fréquence annuelle à pluriannuelle.

Plusieurs retours d'expérience d'Antea Group (notamment installation aux Sables de Cuis (Yprésien) confrontée à une problématique de colmatage à dominante biochimique et installation au Calcaire grossier du Lutétien confrontée à une problématique de colmatage à dominante chimique) encouragent le déploiement de ce système en routine. Le retour d'expérience concernant l'installation exploitant le Calcaire du Lutétien en Ile de France est présenté ci-après.



Retour d'expérience sur la mise en œuvre du rétro-lavage : Installation exploitant l'aquifère du Calcaire du Lutétien (Ile-de-France), problématique de colmatage chimique

Le doublet géothermique CG2 alimente en chauffage/climatisation des locaux à usage tertiaire. L'installation géothermique qui comprend un forage de production F1 et un forage de réinjection F2 exploite le calcaire du Lutétien, roche sédimentaire carbonatée. Après une courte utilisation de ce doublet, avec l'injection d'environ 7 000 m³ d'eau dans le forage de réinjection F2, ce dernier s'est colmaté, faisant monter la pression du circuit hydraulique, interdisant l'utilisation du forage F2 pour la réinjection des eaux pompées dans le forage F1. Après nettoyage du forage de réinjection, une seconde mise en fonctionnement du doublet s'est traduite de nouveau par le colmatage du forage de réinjection F2. L'inspection caméra réalisée au sein du forage de réinjection F2 révèle alors que les crépines sont totalement colmatées.

Afin de solutionner le problème de colmatage du forage d'injection de l'installation CG2, de multiples investigations ont été menées parmi lesquelles un essai de rétro-lavage. Cet essai a permis de conclure :

- Qu'il existait un effet positif, bien que limité, marqué par une récupération momentanée de la fonctionnalité du forage d'injection ;
- Que la fréquence fixée pour les cycles (15 jours) était insuffisante, le forage se recolmatant au bout d'une semaine environ.

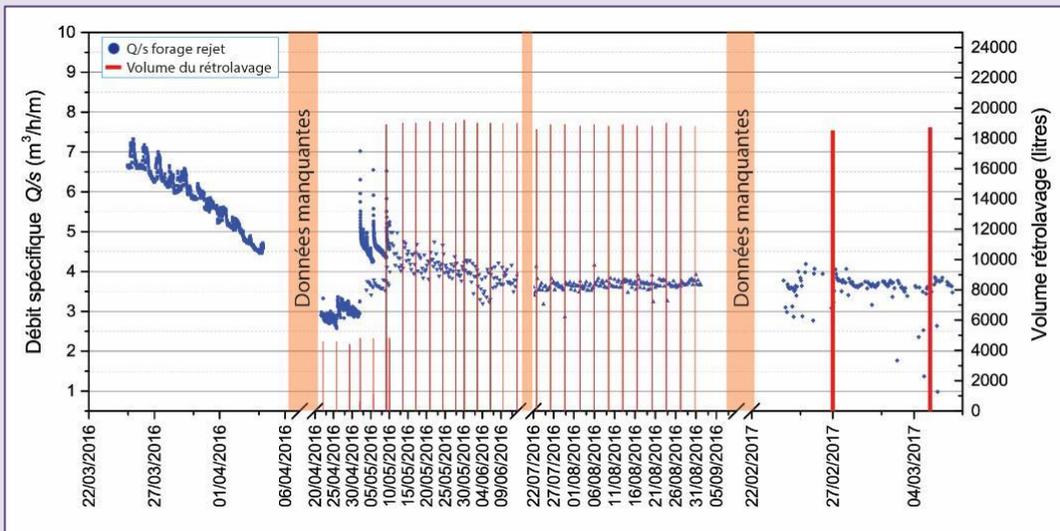


Figure 38 Suivi de l'efficacité du dispositif de rétro-lavage

Sur la base de ces premiers essais, un système de rétro-lavage du forage d'injection a été mis en place. Le premier mois, les opérations de rétro-lavage sont effectuées deux fois/semaine à un débit de 5 m³/h pendant une heure. Ensuite, les opérations de rétro-lavage sont devenues hebdomadaires et effectuées à un débit de 20 m³/h pendant une heure. L'évolution du débit spécifique du forage d'injection représenté Figure 38 montre que les opérations de rétro-lavage ont permis de le stabiliser alors qu'il était en fort déclin sur la période qui a précédé la mise en place du rétro-lavage. Sans agir sur le processus de colmatage en lui-même, ce dispositif de rétro-lavage a donc permis de stabiliser l'injectivité de l'ouvrage et de pérenniser l'exploitation sans avoir recours à des opérations récurrentes de réhabilitation du forage d'injection.



6.4.2. Mise en place d'un système de prélèvement sous packer au niveau du forage de production

Comme indiqué précédemment, la zone de contact entre l'eau géothermale et l'atmosphère constitue une interface d'échange gazeux par diffusion (Roy and Ryan, 2010) qui peut conduire à l'entrée d'oxygène (Bonte et al., 2017). Cette modalité d'apport d'oxygène permet d'expliquer dans certains cas la réactivité induisant :

- La formation d'un biofilm lié à l'activité de ferro-bactéries et de dépôts d'hydroxydes ferriques lorsqu'un aquifère réducteur présente une concentration en fer dissous notable (notamment Sables de l'Yprésien, Ile-de-France). Les surfaces de la colonne d'exhaure dans la zone de rabattement exposées à des cycles de saturation/désaturation peuvent notamment être confrontées à la problématique d'oxydation du fer (Figure 39) ;
- La formation d'un biofilm lié à l'activité de bactéries oxydant l'H₂S lorsque l'aquifère réducteur présente une microflore sulfurogène (BSR et/ou BTR) (notamment dans le cas des Sables de l'Yprésien, Ile-de-France).

L'élimination de l'échange gazeux avec l'atmosphère est particulièrement recommandée dans le contexte de l'exploitation d'aquifères réducteurs particulièrement lorsque la distance entre le niveau dynamique et l'aspiration de la pompe d'exhaure est faible.



Figure 39 Colonne d'injection positionnée dans la zone de rabattement recouverte de dépôts d'hydroxydes de fer

Des solutions techniques appliquées en thermalisme et géothermie pour le chauffage direct sont transposables au doublet géothermique sur aquifères superficiels. Deux types de solution sont envisageables :

- La mise en place d'un obturateur gonflable (packer) ;
- L'inertage à l'azote de la partie sommitale du forage de pompage.

La mise en place d'un pompage sous packer (Figure 40) permet de s'affranchir de l'échange gazeux avec l'atmosphère. Les avantages avancés par les constructeurs de ce dispositif sont :

- La chambre de pompage est isolée et protégée des contaminations de surface ;
- Il n'existe plus de zone de rabattement et l'activité bactérienne est réduite ;
- La chambre de pompage peut rester pressurisée.

Les obturateurs nécessitent des adaptations spécifiques et sont fonction du type de gonflement sélectionné (à l'eau ou au gaz). Le positionnement du packer au sein des forages est fonction de la profondeur du rabattement maximal et des variations induites par les fluctuations naturelles de la nappe, l'important étant de garantir la mise en eau continue de la partie inférieure de l'obturateur. Les retours d'expérience en thermalisme attestent de l'impact positif du procédé du pompage sous packer sur la qualité bactérienne de l'eau extraite et la préservation des conditions réductrices de l'eau.

La deuxième solution consiste à inertier à l'azote la zone annulaire entre le casing et la colonne d'exhaure dans la partie située entre la tête étanche du puits et le niveau d'eau en maintenant une surpression de gaz (Figure 41) (Georg Houben and Christoph Treskatis, 2007c). Ce procédé préventif est généralisé à un ensemble d'installations géothermiques en Europe (Bugarel and Bouchot, 2016) afin d'éviter les phénomènes de précipitation liés à des entrées d'air.



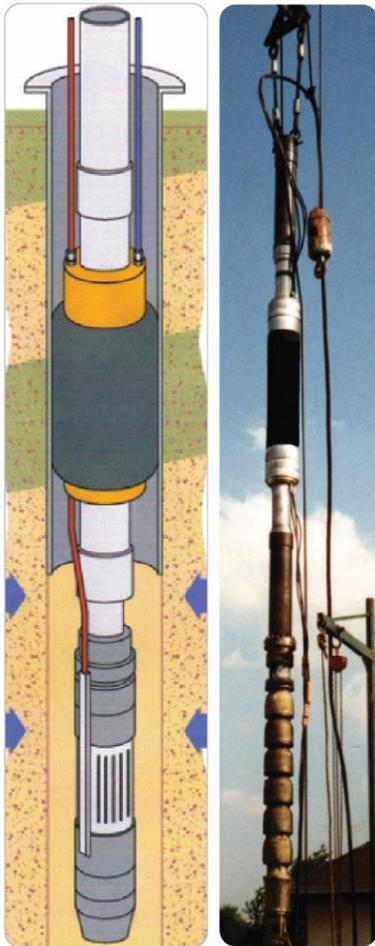


Figure 40 Pompage sous obturateur (www.geopro.be)

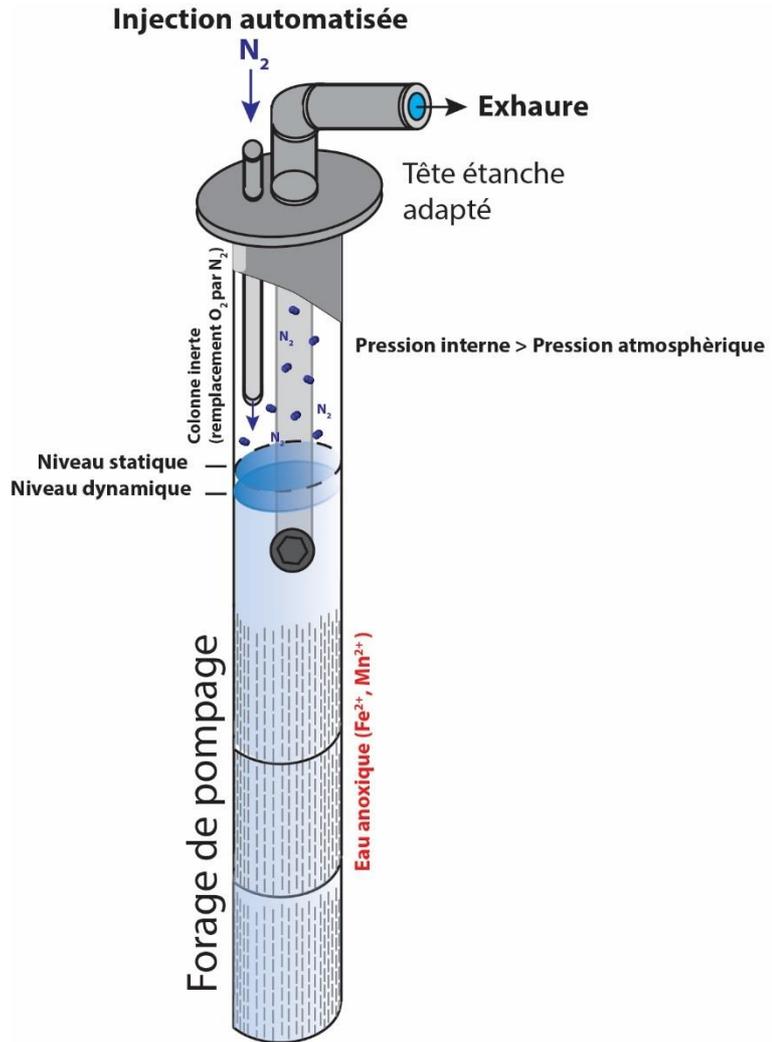


Figure 41 Schéma d'Inertage à l'azote

Sur le plan économique, le Tableau 5 récapitule les ordres de grandeur des coûts d'achat des obturateurs de différents diamètres (des obturateurs de diamètre supérieur sont réalisables) en acier inoxydable 316L et avec membrane en caoutchouc naturel (non alimentaire). Ces coûts ne comprennent pas l'instrumentation et les accessoires associés ainsi que les frais d'installation et de remplacement de la membrane (durée de vie variable, en général entre 3 et 10 ans, le coût de la membrane représente 50 % du coût de l'obturateur).

Diamètre de l'obturateur (mm)	Diamètre d'utilisation (mm)	Fourchette de coût (EUR)
130	140 à 230	10 000 à 13 000
170	180 à 320	12 000 à 15 000
210	220 à 380	17 000 à 20 000
250	260 à 420	20 000 à 23 000
285	300 à 470	22 000 à 25 000

Tableau 5 : Ordre de grandeur des coûts des obturateurs en fonction des diamètres



6.4.3. Installation d'un système de microfiltration autonettoyant

La boucle primaire est toujours dotée d'un système de filtration primaire ayant une maille entre 150 et 250 μm et positionné en amont de l'échangeur pour protéger ce dernier ainsi que le forage d'injection. Le retour d'expérience montre que lorsque des processus biochimiques de précipitation d'hydroxydes et d'oxydes de fer et de manganèse se produisent dès le forage de production puis dans le circuit primaire, le filtre primaire s'encrasse avec une cinétique rapide (Figure 13) et ne retient qu'une partie des précipités minéraux qui viennent alors colmater l'échangeur puis le forage d'injection (Figure 14 et Figure 15) De même, dans le contexte de l'exploitation d'aquifères détritiques peu ou mal consolidés, les particules qui sont entraînées par l'eau ont pour la plupart une taille inférieure à 50 μm et ne sont pas retenues par les filtres conventionnels qui sont installés en amont de l'échangeur. Ces particules sont entraînées dans le forage de réinjection et viennent obstruer le massif filtrant et la porosité de la formation affectant l'injectivité de l'ouvrage.

Dans ces deux situations, la mise en place d'un système de microfiltration autonettoyant par rétrolavage peut permettre de pérenniser l'exploitation de la boucle géothermale en minimisant les opérations de maintenance (nettoyage des filtres, échangeur et forage d'injection).

Ces systèmes de microfiltration à nettoyage automatique commencent à se développer dans le domaine de la géothermie avec en particulier des modules de filtration automatiques capables de traiter des débits importants correspondant à ceux rencontrés sur la plupart des doublets géothermiques (50 à 200 m^3/h).

Les différentes solutions industrielles déployables en géothermie superficielle fonctionnent sur la base (Sparks and Chase, 2013):

- Du procédé de filtration de surface (membranes, treillis métalliques ou métal perforé). Le filtre est une membrane perforée par des pores calibrés et de diamètres voisins. Le filtre retient toutes les particules dont le diamètre est supérieur au diamètre des pores conduisant à la formation d'un gâteau. Les filtres peuvent être dotés d'un rétrolavage (inversion des flux à travers le média filtrant) qui est déclenché à partir d'une valeur de différentiel de pression amont/aval.
- Du procédé de filtration en profondeur qui consiste à retenir à l'intérieur du réseau poreux du filtre (matériaux fibreux) des particules dont la taille peut être inférieure au diamètre des pores.

Les principaux critères de dimensionnement qui déterminent la capacité nominale, le type de filtre, la maille du système de filtration à retenir sont les suivants :

- Débit à traiter ;
- Température de l'eau de production ;
- Concentration en MES ;
- Distribution granulométrique des particules ;
- Compatibilité physico-chimique des matériaux composant le filtre avec l'ensemble des équipements du doublet géothermique ;
- Les propriétés de l'aquifère dans lequel l'eau est réinjectée (perméabilité, porosité, distribution de la porosité). La notion de plage critique de colmatage du réservoir d'injection permet de préciser la maille à retenir pour limiter le colmatage des puits d'injection (maille < plage (1/10-1/3) du diamètre d'ouverture des pores du massif de réinjection).

Les indicateurs de performances des systèmes de filtration sont les suivants :

- Le taux de filtration absolu indique la taille maximale des particules (cut-off point) pouvant passer à travers l'unité de filtration pour un média filtrant homogène ;
- Le taux de filtration nominal indique le pourcentage de matériau de taille supérieure à la maille nominale du filtre susceptible de passer au travers du filtre ;
- Le taux d'efficacité nominal du filtre correspond au pourcentage de matériau bloqué par le filtre ;



- Le ratio Béta correspond au ratio entre le nombre de particules entrantes et le nombre de particules en aval du filtre. Il s'agit d'un ratio permettant la comparaison entre les différentes technologies de filtration.

Des dispositifs de microfiltration de surface ou en profondeur disponibles sur le marché sont présentés ci-après. Un retour d'expérience sur l'usage d'un dispositif est également exposé.

6.4.3.1. Filtre HECTRON (filtration de surface)

La société Hectron développe des modules automatiques de filtration de surface (tamis tissé en Polyéthylène Téréphtalate (PET) avec des mailles nominales de filtration de 1 à 500 μm). Ce type de filtre (Figure 42) peut remplacer avantageusement les modules de filtres à poches manuels et réduire les coûts de main d'œuvre sur ce poste. Pour une maille de filtration nominale de 11 μm la gamme couvre des débits jusqu'à 110 m^3/h .

Les inconvénients de ce type de filtres sont les suivants :

- Coût d'investissement plus élevé que les systèmes de filtration à poches ou à cartouches : exemple : 1 filtre HECTRON AG400 finesse 1 μm : 12 000 EUR HT capable de traiter 55 m^3/h (prix pour le filtre seul sans les accessoires ni le montage)
- Nécessité de prévoir un exutoire pour les rejets chargés en MES
- Attention aux fréquences de nettoyage des filtres qui peuvent se traduire par des volumes de rejet importants. Dans le cas de dépôts formés par des processus biochimiques et biologiques, le filtre se colmate très rapidement ce qui déclenche des cycles de nettoyage à des fréquences élevées rendant inadaptée cette technologie de filtration.

Au niveau des avantages, on peut noter le coût d'exploitation qui est plus faible que pour les filtres à poches et à cartouches (réduction des opérations de maintenance et des consommables).



Figure 42 Filtre autonettoyant HECTRON AG400



Figure 43 Filtre autonettoyant AMIAD AMF

6.4.3.2. Filtre AMIAD AMF (Filtration en profondeur)

La société AMIAD développe des modules de filtration en profondeur à nettoyage automatique (modèle AMF, Figure 43)

Le média filtrant est composé de microfibrilles textiles identiques à celles composant les filtres à cartouches. L'élément de base du filtre à microfibrilles est constitué par la cassette bobinée. Un fil de section variable composé d'un nombre déterminé de brins en fonction du seuil de filtration recherché



est bobiné autour de cassettes rigides cannelées. Les cassettes sont montées tout le long et tout autour d'un tube creux de collecte des eaux filtrées.

Les filtres AMF retiennent les particules au fur et à mesure du passage de l'eau au travers des cassettes à microfibres (Figure 44 (1)).

L'eau filtrée est collectée via une canalisation et s'écoule par la sortie du filtre (Figure 44 (2)). Les particules s'accumulant sur et dans les microfibres créent une pression différentielle. A une valeur pré déterminée ou suite à un intervalle de temps donné, l'unité de contrôle déclenchera un cycle de nettoyage (Figure 44 (3 et 4)).

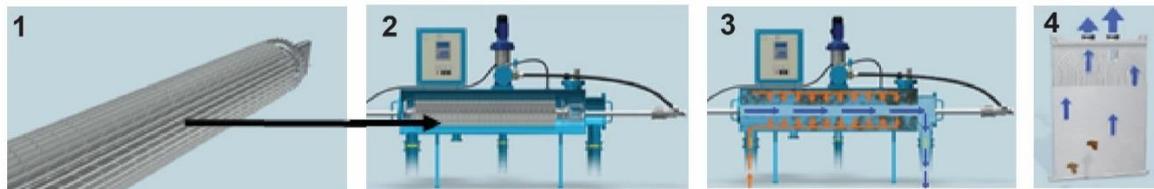


Figure 44 : Principe de fonctionnement du filtre AMIAD AMF

Plusieurs références attestent de l'efficacité et de la résilience de ce type de filtration au regard de la problématique de précipitation d'oxydes et d'hydroxydes de fer et manganèse formés par des processus biochimiques (Ityel, 2011; Lakretz et al., 2014)

Les inconvénients de ce type de filtres sont les suivants :

- Coût d'investissement plus élevé que les systèmes de filtration à cartouches : exemple : un filtre AMIAD AMF 36K (36 000 cm² de surface filtrante, filtration de 2 à 20 µm : 40 000 EUR HT capable de traiter 30 m³/h - (prix pour le filtre seul sans les accessoires ni le montage). CAPEX + OPEX : 12 500 EUR/an sur 20 ans pour 150 m³/h ;
- Nécessité de prévoir un exutoire pour les rejets chargés en MES ;
- Attention aux fréquences et temps de nettoyage des filtres qui peuvent se traduire par des volumes de rejet importants et une baisse de la production. Étant donné le temps de lavage qui peut excéder les 30 minutes, il faut prévoir une bêche en aval pour assurer la continuité de la production durant les périodes de lavage ou doubler la ligne de filtration.

Au niveau des avantages, on peut citer le coût d'exploitation qui est plus faible que pour les filtres à poches et à cartouches (réduction des opérations de maintenance et des consommables)



Retour d'expérience sur l'utilisation du filtre Hectron de type AG300 finesse 1 µm au niveau d'une installation exploitant l'aquifère des Sables de Fontainebleau (Ile-de-France), problématique de colmatage particulière

Le doublet géothermique SF1 captant les Sables de Fontainebleau, comporte deux forages : un forage de pompage (F1) et un forage d'injection (F3). Ce doublet géothermique a été confronté à un très rapide colmatage du filtre et du forage de réinjection lors de la mise en service de la boucle géothermale fin 2014. La vidéo inspection du forage F3 en mars 2015, a mis en évidence :

- Un colmatage important des crépines par des particules fines beiges entre 53,2 et 79,8 m sur près de 80 % de la hauteur totale crépinée et une eau très trouble ;
- Des colorations orangées ponctuelles sur les génératrices des crépines entre 57 et 70 m de profondeur.

Le processus de colmatage a été identifié comme étant d'origine particulière par mobilisation de particules de taille inférieure à 100 microns (cf. Tableau 6) et non retenues par une filtration usuelle (entre 100 et 200 µm). Les particules proviennent de l'aquifère dans la proche périphérie du forage de pompage et sont mobilisées par son exploitation. Ce processus est à différencier d'un ensablement classique résultant d'une conception non adaptée à la granulométrie des niveaux producteurs.

Classes granulométriques	2-5 µm	5-10 µm	10-25 µm	25-50 µm	50-100 µm	>100 µm
Nombres de particules	71 500	35 000	14 000	1 000	80	2
Pourcentage de la classe granulométrique	58,8	28,8	11,5	0,8	0,1	0,0

Tableau 6 : Extrait d'une analyse particulière de l'eau géothermale issue du forage de pompage F1

Après réhabilitation des forages en 2015, le doublet a été progressivement remis en service, en ajoutant un dispositif d'ultrafiltration (filtre Hectron à 1 µm).

Lors du test, les cycles de nettoyage ont été paramétrés sur les bases suivantes :

- Mode automatique
- A faible débit, déclenchement sur seuil volumique de 2000 litres
- A débit nominal, déclenchement sur une base temporelle de 10 mn
- Pression pendant le nettoyage : 2 bar

En injection, le niveau dynamique se situait en mai 2015 après réhabilitation à environ 23 m/sol parking à 39 m³/h. Deux ans plus tard, au même débit, le niveau dynamique se situe à 7 m de profondeur. Une dérive des performances en injection est donc perceptible (le débit spécifique en réinjection était en 2017 de l'ordre de 1,2 m³/h/m de rabattement, contre environ 2,0 m³/h/m après réhabilitation) mais leur cinétique de dégradation est fortement ralentie. Si les phénomènes de colmatage rapide constatés en début d'exploitation semblent maîtrisés par la mise en œuvre de ce dispositif de microfiltration, il convient tout de même de continuer à surveiller les paramètres hydrodynamiques du forage de réinjection afin d'anticiper les opérations de nettoyage que l'ouvrage pourrait nécessiter. En conclusion, dans un contexte où le colmatage est de nature particulière, la dérive des performances en injection a fortement été ralentie par la mise en place du dispositif d'ultrafiltration qui a eu un impact décisif sur la pérennisation du fonctionnement de l'installation. Son utilisation dans un contexte de colmatage d'origine biochimique n'ayant pas donné satisfaction sur un site exploitant les calcaires grossiers du Lutétien, l'utilisation de ce type de filtre est recommandée pour des problématiques de colmatage particulière.



6.4.4. Dispositif électromagnétique

Le dispositif électromagnétique ST090 a été développé et breveté par la société anglaise MSL qui en assure la commercialisation pour le domaine de l'eau. Cette technologie est également largement adoptée par l'industrie pétrolière, avec depuis l'année 2010, 450 unités installées et fonctionnant en Amérique du Nord, et une cinquantaine dans le reste du monde. Le dispositif est proposé à la location (voire dans certains cas à la vente) à des tarifs qui dépendent de son contexte d'utilisation et du dispositif mis en place.

Le dispositif ST090 est un procédé physique qui permet par application d'un champ électromagnétique de lutter contre la formation de dépôts minéraux dans les puits, conduites et équipements d'installations industrielles. Son efficacité est largement prouvée pour lutter contre la formation de dépôts carbonatés et sulfatés. Quelques retours d'expérience positifs concernent également des dépôts sulfurés et chlorurés sodiques. **Concernant les dépôts de type oxydes et hydroxydes, des tests doivent être menés pour valider l'efficacité du ST090.**

Le dispositif comprend :

- Un boîtier de commande (Figure 45) qui permet la génération du signal électromagnétique ;
- Une antenne fixée directement sur la conduite (Figure 45) qui permet l'injection du signal électromagnétique.



Figure 45 : Dispositif électromagnétique ST090 (à gauche boîtier de commande, à droite antenne)

Le signal électromagnétique émis par le dispositif ST090 va se propager dans le fluide et apporter l'énergie nécessaire pour forcer les sels dissous à précipiter réduisant les conditions de sursaturation minérale. Sous l'influence du champ électromagnétique, les myriades de microcristaux alors formés (taille d'environ 10 μm) n'auront pas tendance à s'agglomérer pour construire un réseau cristallin, ils seront maintenus en suspension et donc évacués avec l'eau. La composition chimique de l'eau n'est pas altérée par la mise en œuvre du ST090. A noter que ce dispositif ne permet pas d'éliminer des dépôts qui auraient été préalablement formés avant la mise en œuvre du dispositif. Son action est donc préventive et non curative.

Le signal électromagnétique se propage tout au long des conduites et tubages des forages et dans le liquide conducteur. Il n'y a aucune focalisation sur une zone spécifique. Dans le cas d'eau peu minéralisée, le signal ne peut se propager que via un matériau conducteur ce qui impose que les tubages et conduites soient en matériau métallique.



Retour d'expérience sur la mise en œuvre du dispositif ST090 au niveau d'une installation thermique confrontée à la formation de dépôts de gypse (CaSO_4)

Le dispositif électromagnétique a été mis en place sur un forage de production d'eau thermique qui était confronté à une double problématique de colmatage par formation de dépôts de gypse (Figure 46, A et B) et de contamination bactérienne excluant toute valorisation de l'eau notamment en raison de la présence récurrente de bactéries de type *Pseudomonas aeruginosa*. Après 14 mois de mise en œuvre du dispositif ST090, les résultats sont positifs tant au niveau de la qualité bactériologique de l'eau qu'au niveau de la réduction de la croissance cristalline. Sur le plan bactérien, les résultats d'analyses microbiologiques montrent une amélioration de la qualité bactérienne de l'eau thermique (des concentrations inférieures au seuil de détection analytique), ce qui a permis à l'exploitant de valoriser de nouveau l'eau produite par le forage.

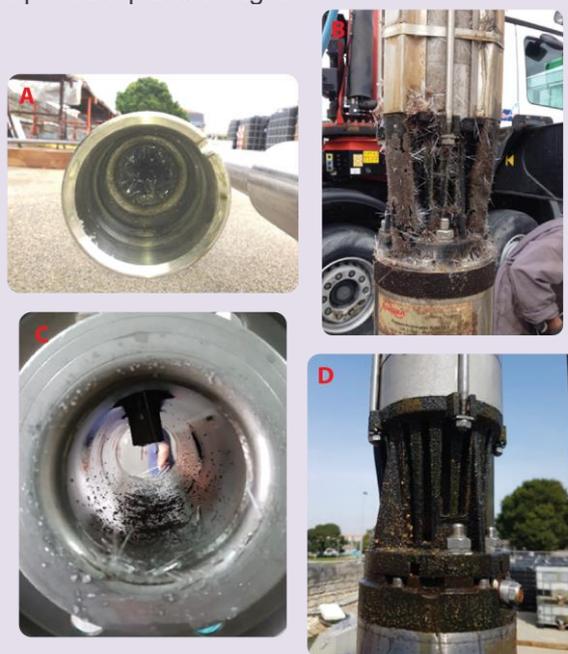


Figure 46 Cristaux de gypse formés à l'intérieur de la colonne d'exhaure (a) au niveau de l'aspiration de la pompe d'exhaure (b) après une période d'exploitation de 16 mois : Vues sur la surface interne de la conduite de transport (c), sur l'aspiration de la pompe d'exhaure (d) après une période d'exploitation de 14 mois en présence du dispositif électromagnétique

Sur le plan de la formation de dépôts de gypse, le dispositif électromagnétique a permis de réduire considérablement le nombre et la taille des cristaux de gypse se formant sur les surfaces des tubages, équipements et conduites au contact de l'eau thermique. La Figure 46 C et D, présente des clichés photographiques des surfaces internes la conduite de transport ainsi que de la pompe d'exhaure après 16 mois d'exploitation. De nombreux cristaux de gypse pluricentimétriques sont présents. Après 14 mois d'exploitation en présence du dispositif électromagnétique seuls quelques microcristaux de gypse sont présents sur les surfaces internes des tubes de la colonne d'exhaure et de la conduite de surface.

La mise en œuvre de ce dispositif permet au maître d'ouvrage d'espacer les opérations de maintenance sur les équipements du forage et donc d'en réduire le coût (économie d'environ 100 000 EUR/an), de valoriser 90 000 m^3 /an d'eau thermique pour les soins collectifs du centre thermal et donc de s'affranchir de la réalisation d'un nouveau forage (coût 1,3 à 1,5 MEUR) pour satisfaire les besoins du centre thermal.

7. Les recommandations pour le suivi du doublet géothermique en phase d'exploitation

7.1. Suivi des paramètres hydrodynamiques

Le suivi métrologique minimum vise à suivre les données relatives à l'exploitation des forages du doublet géothermique (niveaux d'eau des forages producteurs et injecteurs, débit de pompage et d'injection, pression, température au pompage et à l'injection, volume d'eau prélevée et réinjectée). Les données doivent être enregistrées de manière continue à un pas de temps suffisamment court (quelques minutes) pour permettre l'observation des variations de ces paramètres en cours d'exploitation et lors des phases d'arrêt.

Liste des capteurs recommandés :

- Pour chaque forage : Débitmètre et compteur volumétrique ;
- Capteur enregistreur pression/niveau d'eau des forages de pompage et d'injection ;
- Capteur enregistreur température entrée/sortie de la boucle géothermale ;
- Capteur enregistreur pression entrée/sortie de l'échangeur ;
- Capteur enregistreur pression entrée/sortie de l'échangeur.

L'interprétation des données issues du monitoring permet de détecter les anomalies dans le fonctionnement de la boucle géothermale pouvant être néfastes pour sa pérennité et d'évaluer les ajustements nécessaires après le démarrage de l'installation géothermale. Ces ajustements peuvent concerner la régulation des pompes dans le cas où des marches/arrêts trop fréquents sur des courtes périodes sont détectés (extension des plages de fonctionnement). Des ajustements de la régulation de la PAC peuvent également être requis si les enregistrements indiquent que la température de rejet dépasse celle autorisée.

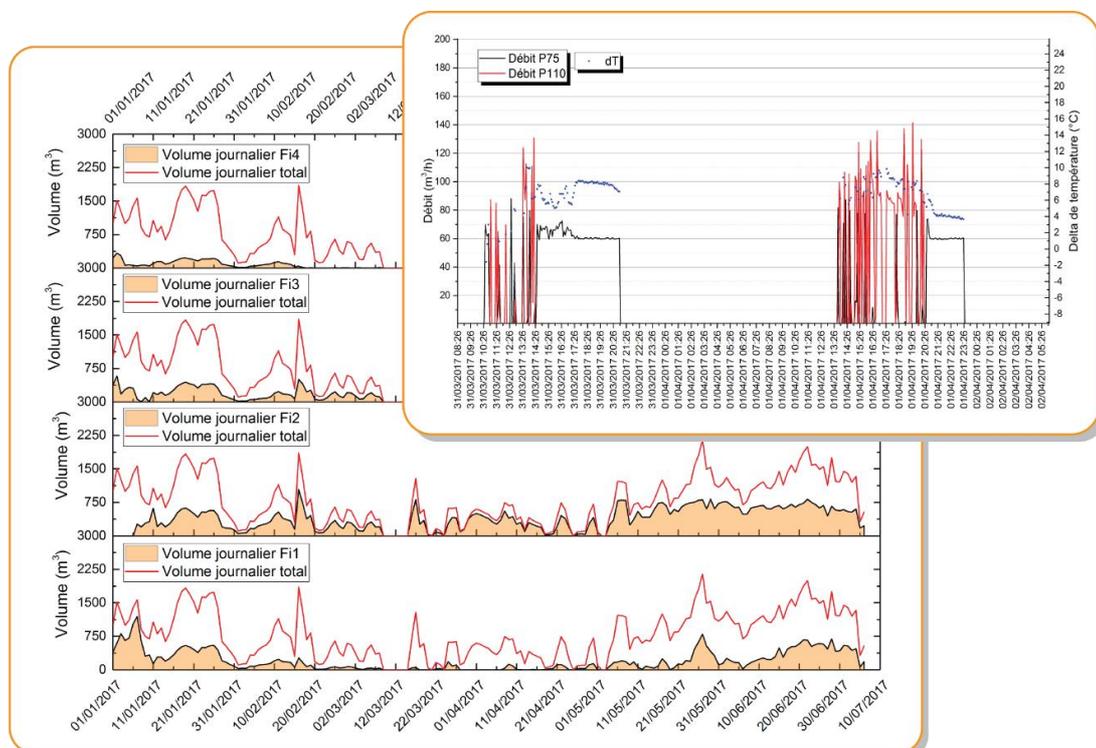


Figure 47 Exemple de chroniques de répartition des volumes injectés par forage d'injection et de chroniques de fonctionnement des forages de pompage.



Par ailleurs, lors de l'exploitation de plus d'un forage d'injection, il est d'ordinaire conseillé d'avoir une répartition équilibrée des volumes injectés entre les différents injecteurs. Le suivi individuel des paramètres des forages d'injection permet de contrôler cette équi-répartition (Figure 47).

Enfin, un des intérêts majeurs de ce monitoring individuel réside dans l'observation instantanée des performances hydrauliques des forages. La surveillance continue des paramètres hydrauliques des ouvrages permet d'anticiper le vieillissement et d'instaurer des stratégies permettant de garantir une meilleure pérennité des ouvrages. Grâce aux données de niveau piézométrique et de débit, le débit spécifique (Q/s , $m^3/h/m$, Q : débit, s : rabattement associé) est calculé pour chaque forage. Ce paramètre permet de juger de l'évolution des performances des forages (Figure 48).

$$\text{Débit spécifique } Q_s = \frac{\text{Débit } Q \text{ (} m^3 \cdot h^{-1} \text{)}}{\text{Rabattement/remontée } s \text{ (} m \text{)}}$$

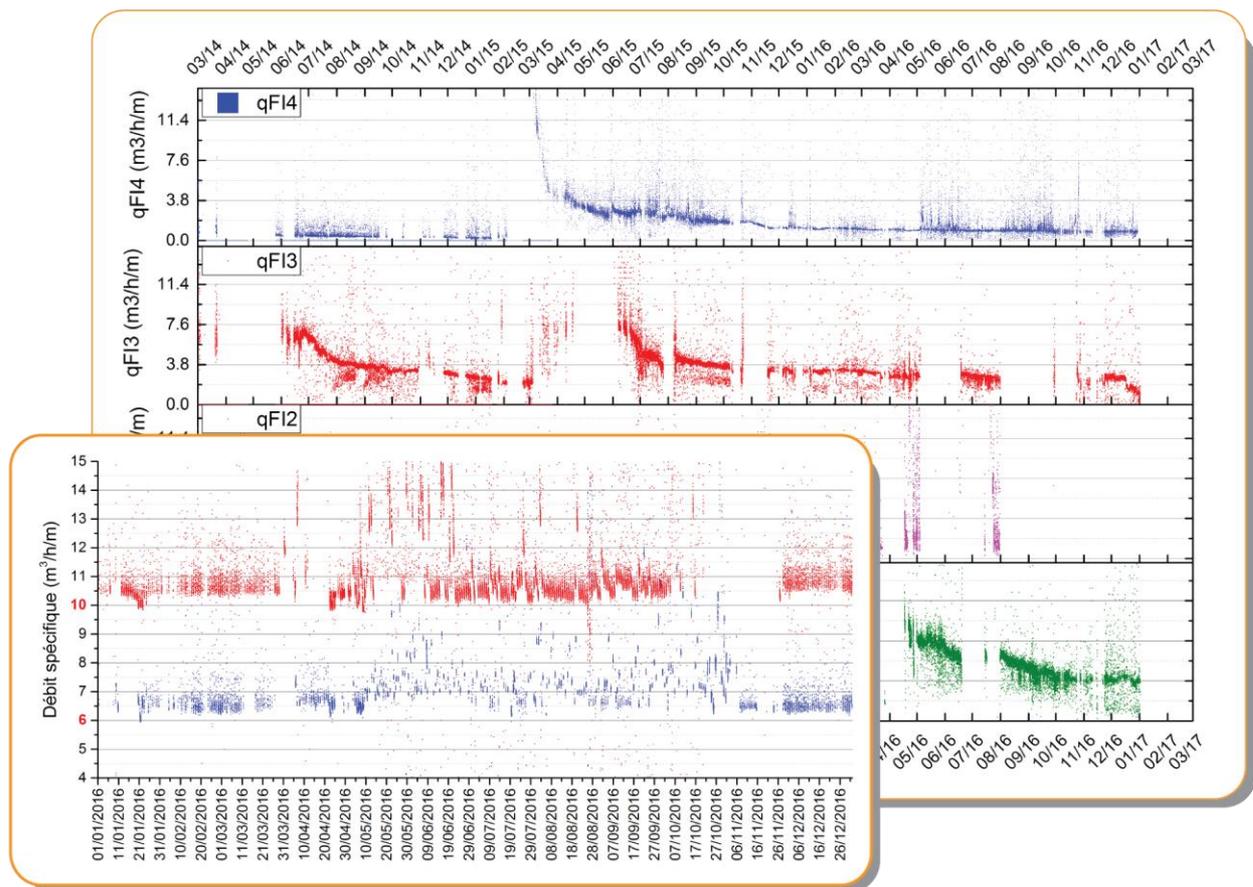


Figure 48. Exemple de chroniques des valeurs de débit spécifique des forages d'injection et des forages de pompage.

Le suivi et l'interprétation de ces paramètres permettent plus aisément de diagnostiquer l'origine des problèmes (processus de colmatage s'observant uniquement en mode climatisation ou en mode chauffage, processus ne s'observant qu'à certain débit), d'anticiper le débordement des injecteurs ou la mise en pression du rejet et donc de planifier les opérations de maintenance préventive. Dans certains cas, après chaque réhabilitation de forages d'injection, la cinétique de décroissance de l'injectivité du forage est conservée, permettant d'anticiper l'opération de réhabilitation. Il est cependant difficile de transposer ces observations à chacun des forages d'injection d'une installation car la réponse hydraulique au colmatage dépend des hétérogénéités du milieu aquifère. Ceci s'observe par exemple sur la Figure 49 qui présente les chroniques de débit spécifique Q_s normalisées (Q_s/Q_{s0}) de trois forages d'injection au sein d'une même aquifère. Il est visible que FI1 et FI3 ont un comportement similaire face au processus de colmatage tandis que FI4 se distingue.



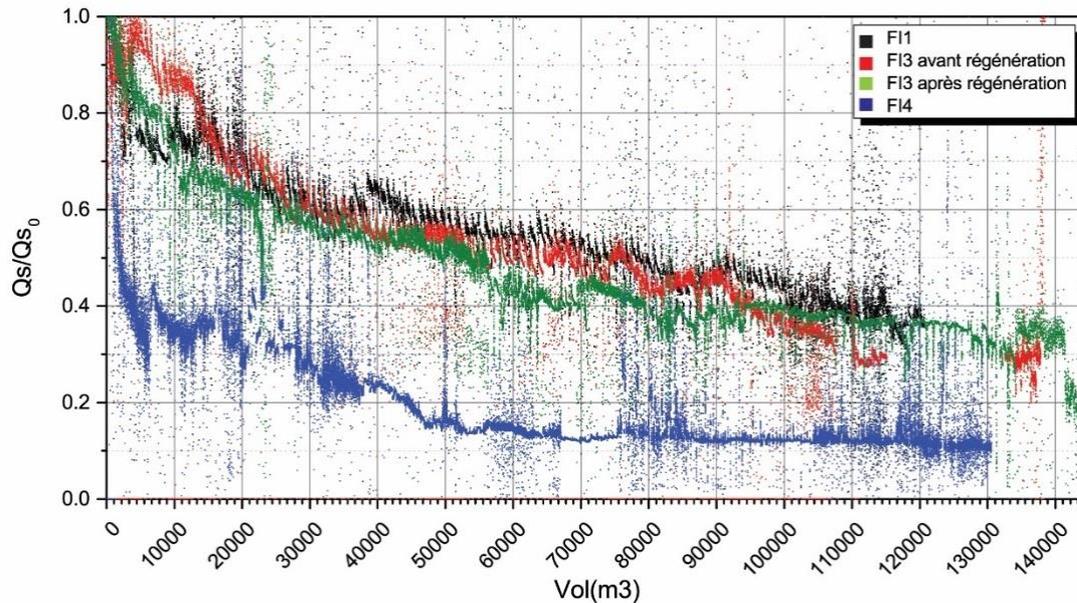


Figure 49 Débits spécifiques en fonction du volume d'eau injectée au sein des forages d'injection d'une même exploitation

7.2. Suivi chimique et bactériologique de l'eau du circuit primaire de la boucle géothermale

L'élaboration de la stratégie de suivi chimique de l'installation est conditionnée par l'évaluation du risque de colmatage. Si ce dernier est très faible voire nul, le suivi doit permettre d'évaluer la stabilité des paramètres chimiques au cours du fonctionnement du doublet géothermique et permettre de vérifier qu'aucun des processus de colmatage soit en cours.

A minima, ce suivi doit comprendre :

- Le suivi de la qualité chimique et physico-chimique de l'eau produite et réinjectée (éléments majeurs, oxygène dissous, sulfures totaux, pH, Eh, température et conductivité mesurés in-situ) ;
- Le suivi des teneurs en fer et manganèse total et dissous en différents points de l'installation (pompage, amont filtre, aval filtre, amont échangeur, aval échangeur, réinjection).

Il doit être mis en œuvre à minima deux fois/an.

En cas de problématique de colmatage avérée (perte de productivité des ouvrages, colmatage récurrent des filtres ou des échangeurs), le suivi chimique est dimensionné dans un premier temps pour déterminer l'origine des désordres et dans un second temps pour suivre l'efficacité des mesures correctives engagées à la suite du diagnostic.

En cas de phénomènes de colmatage, les analyses chimiques et bactériologiques minimales à mettre en œuvre sur les dépôts sont :

- Analyse chimique élémentaire et analyse des phases minérales cristallisées de dépôts récupérés en différents points de l'installation (filtres, échangeurs, forages si possible). (MEB/EDS, analyse par voie chimique et DRX). Ces analyses requièrent un échantillon de dépôts préalablement séché (étuve entre 45 et 50°C) ou lyophilisé.
- Analyse bactériologique des dépôts par ensemencement de milieu de culture (détection des bactéries du cycle du fer et bactéries sulfurogènes) et observation au microscope optique des dépôts pour analyse qualitative des bactéries du cycle du fer et des bactéries oxydant l' H_2S . Ces analyses requièrent un prélèvement de dépôts frais et stockés à 4°C



dans un flacon propre rempli de l'eau du circuit. Elles doivent être effectuées rapidement après le prélèvement.

- En cas de problématique de colmatage d'ordre physique, analyse de la variation de la charge particulaire (MES) et de sa distribution granulométrique (comptage particulaire par technique d'absorption de la lumière) durant un cycle de pompage à un régime de pompage représentatif.

Concernant le suivi chimique de l'eau, il est du même type que celui présenté précédemment mais doit être effectué à une fréquence plus importante qui est à adapter en fonction de la situation.

8. Récapitulatif des bonnes pratiques pour chacune des typologies de colmatage

La Figure 50 récapitule l'ensemble des recommandations et mesures préventives préconisées pour chacune des typologies de colmatage.



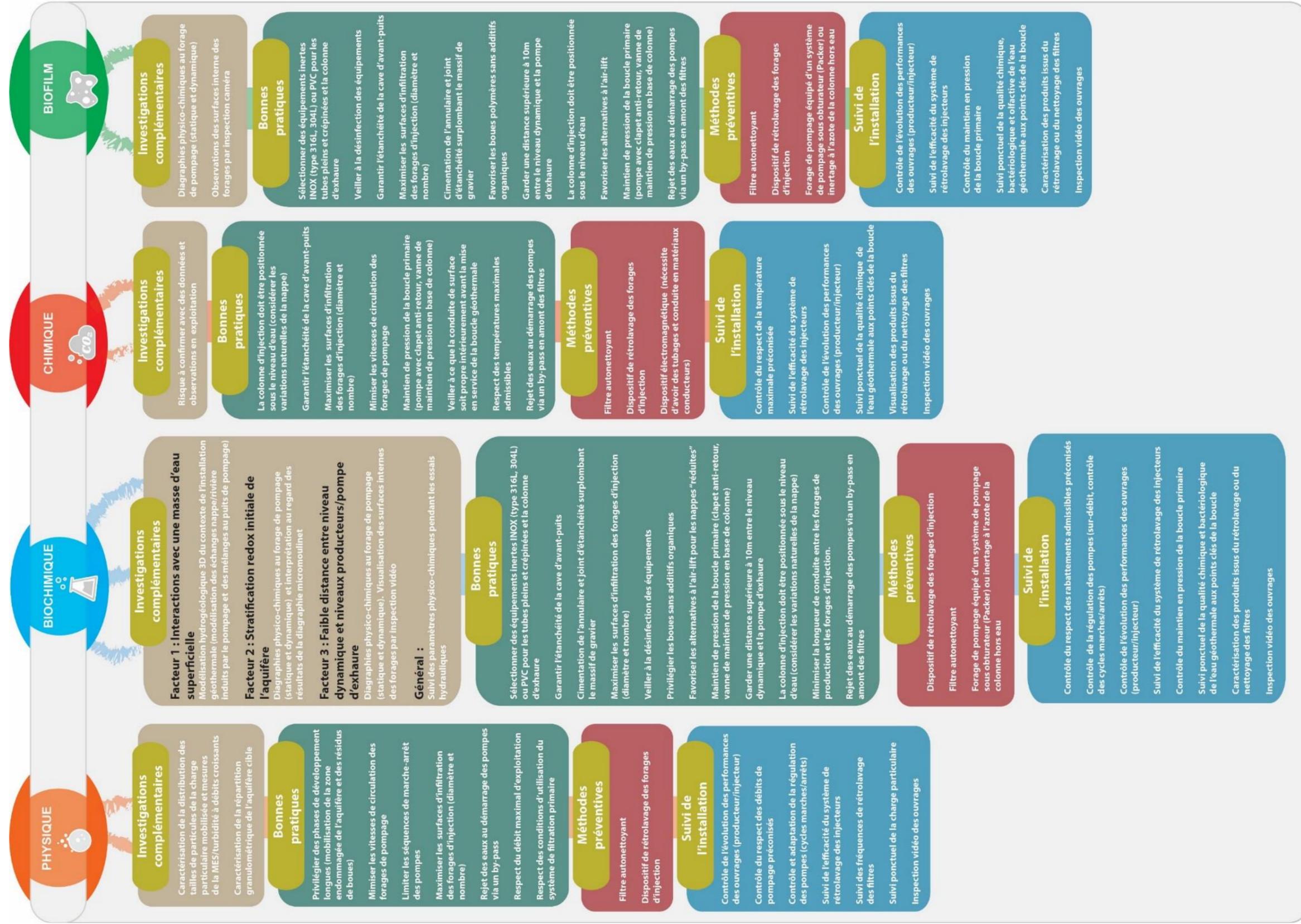


Figure 50 : Récapitulatif des bonnes pratiques à mettre en œuvre pour chacune des typologies de colmatage



9. Conclusion - Perspectives

L'état des lieux des problématiques rencontrées au niveau de doublets géothermiques sur nappes superficielles dans différents contextes hydrogéologiques sur le territoire français et les investigations approfondies menées sur des sites pilotes ont permis de caractériser les différentes typologies de colmatage et les paramètres les contrôlant.

Ces connaissances ont servi in fine à la construction de l'outil d'analyse du risque ARCADE réservé à l'usage des professionnels du domaine et qui intègre deux niveaux du risque, l'un qualitatif et l'autre semi-quantitatif :

- Le premier, qualitatif, se base sur l'analyse de retours d'expériences en France dans différents contextes hydrogéologiques.
- Le second, semi-qualitatif, évalue, via des codes de calcul spécifiquement élaborés dans le cadre de ce projet, le risque de colmatage au regard des paramètres chimiques, bactériologiques, hydrogéologiques et des conditions d'exploitation propres à chaque projet.

En complément, ces travaux ont permis d'aboutir à la définition de recommandations et mesures préventives basées sur les résultats des études sur les sites pilotes, la littérature, les pratiques dans le domaine du forage d'eau et du stockage de chaleur en aquifères ainsi que sur les retours d'expérience des partenaires du projet.

L'ensemble des résultats du projet est valorisé dans ce rapport qui constitue un guide d'aide à la décision. Ce guide complet qui comprend à la fois un outil d'analyse des risques ainsi que des recommandations et méthodes préventives intégrant les contraintes technico-économiques et environnementales des projets de géothermie sur aquifères superficielles est un véritable outil d'aide à la décision qui donne aux professionnels les clefs pour juger de la viabilité technico-économique d'un projet à tous les stades de sa vie.

L'outil ARCADE sera disponible en ligne sur la plateforme web Géothermie-Perspectives (www.geothermie-perspectives.fr), site de référence exclusivement dédié à la géothermie. L'outil ARCADE a vocation à être évolutif et s'enrichir avec les retours d'expérience des utilisateurs qui pourront s'ils le souhaitent mutualiser leurs données.



Références bibliographiques

- AFPG, 2015. La Géothermie en France, Etude du marché en 2015. Paris.
- Agbangla, G.C., Climent, É., Bacchin, P., 2012. Experimental investigation of pore clogging by microparticles: Evidence for a critical flux density of particle yielding arches and deposits. *Separation and Purification Technology* 101, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.09.011>
- Banks, D., 2012. An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling, 2nd ed. ed. John Wiley & Sons, Ltd, Hoboken, NJ.
- Beek, K.V., Breedveld, R., Stuyfzand, P., 2009. Preventing two types of well clogging. *Journal - American Water Works Association* 101, 125–134. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2009.tb09880.x>
- Bonte, M., Röling, W.F.M., Zaura, E., van der Wielen, P.W.J.J., Stuyfzand, P.J., van Breukelen, B.M., 2013. Impacts of Shallow Geothermal Energy Production on Redox Processes and Microbial Communities. *Environ. Sci. Technol.* 47, 14476–14484. <https://doi.org/10.1021/es4030244>
- Bonte, M., Wols, B., Maas, K., Stuyfzand, P., 2017. Sources of dissolved oxygen in monitoring and pumping wells. *Hydrogeology Journal* 25, 55–66. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1477-9>
- Bozau, E., Häußler, S., van Berk, W., 2015. Hydrogeochemical modelling of corrosion effects and barite scaling in deep geothermal wells of the North German Basin using PHREEQC and PHAST. *Geothermics* 53, 540–547. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.10.002>
- Brigmon, R.L., Martin, H.W., Aldrich, H.C., 1997. Biofouling of Groundwater Systems by *Thiothrix* spp. *Current Microbiology* 35, 169–174. <https://doi.org/10.1007/s002849900233>
- Bugarel, F., Bouchot, V., 2016. Projet GUIDOCLAST - Tâche 1 : retours d'expériences des opérations de géothermie profonde ciblant des réservoirs clastiques en Europe. Rapport intermédiaire (No. RP-66040-FR.pdf). BRGM.
- Burdige, D.J., Dhakar, S.P., Neelson, K.H., 1992. Effects of manganese oxide mineralogy on microbial and chemical manganese reduction. *Geomicrobiology Journal* 10, 27–48. <https://doi.org/10.1080/01490459209377902>
- Bustos Medina, D.A., van den Berg, G.A., van Breukelen, B.M., Juhasz-Holterman, M., Stuyfzand, P.J., 2013. Iron-hydroxide clogging of public supply wells receiving artificial recharge: near-well and in-well hydrological and hydrochemical observations. *Hydrogeology Journal* 21, 1393–1412. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1005-0>
- De Zwart, A.H., 2007. Investigation of clogging processes in unconsolidated aquifers near water supply wells. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Eppner, F., Pasquier, P., Baudron, P., 2017. A coupled thermo-hydro-geochemical model for standing column well subject to CO₂ degassing and installed in fractured calcareous aquifers. *Geomechanics for Energy and the Environment* 11, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2017.05.003>
- Georg Houben, Christoph Treskatis, 2007a. Chemical Ageing Processes, in: *Water Well Rehabilitation and Reconstruction*. McGraw Hill Professional, Access Engineering.
- Georg Houben, Christoph Treskatis, 2007b. Chemical Rehabilitation Techniques, in: *Water Well Rehabilitation and Reconstruction*. McGraw Hill Professional, Access Engineering.
- Georg Houben, Christoph Treskatis, 2007c. Prevention, in: *Water Well Rehabilitation and Reconstruction*. McGraw Hill Professional, Access Engineering.
- Grischek, T., Paufler, S., 2017. Prediction of Iron Release during Riverbank Filtration. *Water* 9. <https://doi.org/10.3390/w9050317>
- Henzler, A.F., Greskowiak, J., Massmann, G., 2016. Seasonality of temperatures and redox zonations during bank filtration – A modeling approach. *Journal of Hydrology* 535, 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.044>
- Hesshaus, A., Houben, G., Kringel, R., 2013. Halite clogging in a deep geothermal well – Geochemical and isotopic characterisation of salt origin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 64, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.06.002>
- Houben, G.J., 2004. Modeling the Buildup of Iron Oxide Encrustations in Wells. *Groundwater* 42, 78–82. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02452.x>
- Houben, G.J., 2003. Iron oxide incrustations in wells. Part 1: genesis, mineralogy and geochemistry. *Applied Geochemistry* 18, 927–939. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00242-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00242-1)
- Ityel, D., 2011. Ground water: Dealing with iron contamination. *Filtration & Separation* 48, 26–28. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(11\)70043-X](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(11)70043-X)



- Johnson, J.E., Savalia, P., Davis, R., Kocar, B.D., Webb, S.M., Nealson, K.H., Fischer, W.W., 2016. Real-Time Manganese Phase Dynamics during Biological and Abiotic Manganese Oxide Reduction. *Environ. Sci. Technol.* 50, 4248–4258. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04834>
- Kappler, A., Emerson, D., Gralnick, J.A., Roden, E.E., Muehe, E.M., 2016. Geomicrobiology of Iron, in: Ehrlich's Geomicrobiology. CRC press, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, pp. 343–399.
- Kleyböcker, A., Lienen, T., Kasina, M., Westphal, A., Teitz, S., Eichinger, F., Seibt, A., Wolfgramm, M., Würdemann, H., 2017. Effects of heat shocks on biofilm formation and the influence on corrosion and scaling in a geothermal plant in the North German Basin. *Energy Procedia* 125, 268–272. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.173>
- Klueglein, N., Kappler, A., 2013. Abiotic oxidation of Fe(II) by reactive nitrogen species in cultures of the nitrate-reducing Fe(II) oxidizer *Acidovorax* sp. BoFeN1 – questioning the existence of enzymatic Fe(II) oxidation. *Geobiology* 11, 180–190. <https://doi.org/10.1111/gbi.12019>
- Kohfahl, C., Massmann, G., Pekdeger, A., 2008. Sources of oxygen flux in groundwater during induced bank filtration at a site in Berlin, Germany. *Hydrogeology Journal* 17, 571. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0389-8>
- Lakretz, A., Elifantz, H., Kviatkovski, I., Eshel, G., Mamane, H., 2014. Automatic microfiber filtration (AMF) of surface water: Impact on water quality and biofouling evolution. *Water Research* 48, 592–604. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.018>
- Le Borgne, T., Paillet, F., Bour, O., Caudal, J., 2006. Cross-Borehole Flowmeter Tests for Transient Heads in Heterogeneous Aquifers. *Groundwater* 44, 444–452. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00150.x>
- Lerm, S., Alawi, M., Miethling-Graff, R., Wolfgramm, M., Rauppach, K., Seibt, A., Würdemann, H., 2011. Influence of microbial processes on the operation of a cold store in a shallow aquifer: impact on well injectivity and filter lifetime. *Grundwasser* 16, 93–104. <https://doi.org/10.1007/s00767-011-0165-x>
- Lienen, T., Lüders, K., Halm, H., Westphal, A., Köber, R., Würdemann, H., 2017. Effects of thermal energy storage on shallow aerobic aquifer systems: temporary increase in abundance and activity of sulfate-reducing and sulfur-oxidizing bacteria. *Environmental Earth Sciences* 76, 261. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6575-z>
- MacAdam, J., Jarvis, P., 2015. Chapter 1 - Water-Formed Scales and Deposits: Types, Characteristics, and Relevant Industries A2 - Amjad, Zahid, in: Demadis, K.D. (Ed.), *Mineral Scales and Deposits*. Elsevier, Amsterdam, pp. 3–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63228-9.00001-2>
- Majkic-Dursun, B., Petkovic, A., Dimkic, M., 2015. The effect of iron oxidation in the groundwater of the alluvial aquifer of the Velika Morava River, Serbia, on the clogging of water supply wells. *Journal of the Serbian Chemical Society* 80, 947–957. <https://doi.org/10.2298/JSC140204089M>
- Martin, J.C., 2013. Analyse des risques de dépôt-colmatage dans les forages géothermiques T.B.E. Etat de l'art. Rapport final. BRGM/RP-62909-FR.
- Martin R., 2013. Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods.
- Martirani-Von Abercron, S.-M., Pacheco, D., Benito-Santano, P., Marín, P., Marqués, S., 2016. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon-Induced Changes in Bacterial Community Structure under Anoxic Nitrate Reducing Conditions. *Frontiers in Microbiology* 7, 1775. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01775>
- Massmann, G., Sültenfuß, J., 2008. Identification of processes affecting excess air formation during natural bank filtration and managed aquifer recharge. *Journal of Hydrology* 359, 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.004>
- McMahon, P.B., Chapelle, F.H., Bradley, P.M., 2011. Evolution of Redox Processes in Groundwater, in: *Aquatic Redox Chemistry*, ACS Symposium Series. American Chemical Society, pp. 581–597. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1071.ch026>
- Medihala, P.G., Lawrence, J.R., Swerhone, G.D.W., Korber, D.R., 2012. Effect of pumping on the spatio-temporal distribution of microbial communities in a water well field. *Water Research* 46, 1286–1300. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.036>
- Menz, C., 2016. Oxygen delivering processes in groundwater and their relevance for iron-related well clogging processes—a case study on the quaternary aquifers of Berlin. Freie Universität Berlin.
- Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique, 2015. Arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance, Journal officiel n°0156 du 8 juillet 2015.



- Palmer, C.D., Cherry, J.A., 1984. Geochemical reactions associated with low-temperature thermal energy storage in aquifers. *Can. Geotech. J.* 21, 475–488. <https://doi.org/10.1139/t84-051>
- Plummer, L.N., Wigley, T.M.L., Parkhurst, D.L., 1978. The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5 degrees to 60 degrees C and 0.0 to 1.0 atm CO₂. *American Journal of Science* 278, 179–216. <https://doi.org/10.2475/ajs.278.2.179>
- Possemiers, M., Huysmans, M., Anibas, C., Batelaan, O., Van Steenwinkel, J., 2016. Reactive transport modeling of redox processes to assess Fe(OH)₃ precipitation around aquifer thermal energy storage wells in phreatic aquifers. *Environmental Earth Sciences* 75, 648. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5398-7>
- Possemiers, M., Huysmans, M., Batelaan, O., 2014. Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 2, 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.08.001>
- Postma, D., Appelo, C.A.J., 2000. Reduction of Mn-oxides by ferrous iron in a flow system: column experiment and reactive transport modeling. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 1237–1247. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00356-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00356-7)
- Regenspurg, S., Feldbusch, E., Byrne, J., Deon, F., Driba, D.L., Henningses, J., Kappler, A., Naumann, R., Reinsch, T., Schubert, C., 2015. Mineral precipitation during production of geothermal fluid from a Permian Rotliegendes reservoir. *Geothermics* 54, 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.01.003>
- Roy, J.W., Ryan, M.C., 2010. In-Well Degassing Issues for Measurements of Dissolved Gases in Groundwater. *Groundwater* 48, 869–877. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00703.x>
- Ryan, J.N., Elimelech, M., 1996. Colloid mobilization and transport in groundwater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 107, 1–56. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03384-X](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03384-X)
- Schwarz Müller, H., 2012. OVERVIEW OF COMMON WELL REGENERATION METHODS, WellMa 2 (No. D 4.1.2). Kompetenzzentrum Wasser Berlin.
- Snijders, A.L., Drijver, B.C., 2016. 9 - Open-loop heat pump and thermal energy storage systems A2 - Rees, Simon J., in: *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead Publishing, pp. 247–268. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100311-4.00009-1>
- Sparks, T., Chase, G., 2013. *Filters and Filtration Handbook*. Elsevier Science.
- Stumm, W., Lee, G.F., 1961. Oxygenation of Ferrous Iron. *Ind. Eng. Chem.* 53, 143–146. <https://doi.org/10.1021/ie50614a030>
- Stumm, W., Morgan, J.J., 1996. *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*, 3rd ed. ed, Environmental science and technology. Wiley, New York.
- Tamura, H., Goto, K., Nagayama, M., 1976. The effect of ferric hydroxide on the oxygenation of ferrous ions in neutral solutions. *Corrosion Science* 16, 197–207. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(76\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0010-938X(76)90046-9)
- Tang, Y., Zhou, J., Yang, P., Yan, J., Zhou, N., 2017. Groundwater Engineering Problem and Prevention, in: Tang, Y., Zhou, J., Yang, P., Yan, J., Zhou, N. (Eds.), *Groundwater Engineering*. Springer Singapore, Singapore, pp. 113–164. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0669-2_3
- Timmer, H., Verdel, J., Jongmans, A.G., 2003. Well clogging by particles in Dutch well fields. *Journal (American Water Works Association)* 95, 112–118.
- van Beek, C.G.E.M., 2010. Cause and prevention of clogging of wells abstracting groundwater from unconsolidated aquifers [Dissertation/ Thesis].
- van Beek, C.G.E.M., Breedveld, R.J.M., Juhász-Holterman, M., Oosterhof, A., Stuyfzand, P.J., 2009. Cause and prevention of well bore clogging by particles. *Hydrogeology Journal* 17, 1877. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0537-9>
- van Beek, C.G.E.M., Hubeek, A.A., de la Loma Gonzalez, B., Stuyfzand, P.J., 2017. Chemical and mechanical clogging of groundwater abstraction wells at well field Heel, the Netherlands. *Hydrogeology Journal* 25, 67–78. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1469-9>
- van Leerdam, R., Appelman, W., 2014. Filtration in the surface installation of a geothermal doublet from practice to better practice to best practice. TNO, The Netherlands.
- Vetter, A., Mangelsdorf, K., Wolfgramm, M., Rauppach, K., Schettler, G., Vieth-Hillebrand, A., 2012. Variations in fluid chemistry and membrane phospholipid fatty acid composition of the bacterial community in a cold storage groundwater system during clogging events. *Applied Geochemistry* 27, 1278–1290. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.02.022>
- Wagner, R., Kühn, M., Meyn, V., Pape, H., Vath, U., Clauser, C., 2005. Numerical simulation of pore space clogging in geothermal reservoirs by precipitation of anhydrite. *International Journal of*



- Rock Mechanics and Mining Sciences 42, 1070–1081.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.05.008>
- Wang, J., Sickinger, M., Ciobota, V., Herrmann, M., Rasch, H., Rösch, P., Popp, J., Küsel, K., 2014. Revealing the microbial community structure of clogging materials in dewatering wells differing in physico-chemical parameters in an open-cast mining area. *Water Research* 63, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.021>
- Wang, R., Yang, C., Zhang, M., Xu, S.-Y., Dai, C.-L., Liang, L.-Y., Zhao, H.-P., Zheng, P., 2017. Chemoautotrophic denitrification based on ferrous iron oxidation: Reactor performance and sludge characteristics. *Chemical Engineering Journal* 313, 693–701. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.052>
- Weidner, C., 2016. Experimental modelling and prevention of chemical Fe-clogging in deep vertical wells for open-pit dewatering (Dr.). Publikationsserver der RWTH Aachen University, Aachen.
- Williams, M.D., Oostrom, M., 2000. Oxygenation of anoxic water in a fluctuating water table system: an experimental and numerical study. *Journal of hydrology* 230, 70–85.
- Würdemann, H., Westphal, A., Kleyböcker, A., Miethling-Graff, R., Teitz, S., Kasina, M., Seibt, A., Wolfram, M., Eichinger, F., Lerm, S., 2016. Störungen des Betriebs geothermischer Anlagen durch mikrobielle Stoffwechselprozesse und Erfolg von Gegenmaßnahmen. *Grundwasser* 21, 93–106. <https://doi.org/10.1007/s00767-016-0324-1>

Index des tableaux et figures

Tableaux ⁽ⁱ⁾

Tableau 1 : Echelle utilisée par l’outil ARCADE	31
Tableau 2 Bonnes pratiques à mettre en œuvre au stade de la conception des installations.....	45
Tableau 3 Bonnes pratiques à mettre en œuvre au stade des travaux, des essais et en phase d’exploitation.....	48
Tableau 4 Techniques physiques préventives	49
Tableau 5 : Ordre de grandeur des coûts des obturateurs en fonction des diamètres.....	54
Tableau 6 : Extrait d’une analyse particulière de l’eau géothermale issue du forage de pompage F1	58

Figures⁽ⁱ⁾

Figure 1 Schéma conceptuel d’un doublet géothermique sur nappe superficielle. Le rejet peut également être effectué en surface (rivière ou lac)	7
Figure 2 : A gauche, bactéries ferro-oxydantes présentes dans un dépôt colmatant un échangeur à plaques d’une installation exploitant l’aquifère de la Craie du Montien (x600). A droite, bactéries ferro-oxydantes présentes dans un dépôt colmatant une colonne captante d’un forage de pompage exploitant les alluvions du Rhône (x600).....	9
Figure 3 : Observations au microscope électronique à balayage d’un dépôt exclusivement formé par des gaines d’oxydes de fer formées par les bactéries ferro-oxydantes de type <i>Gallionella</i> sp.	9
Figure 4 : Forage d’injection et échangeur colmatés par des oxydes de fer d’origine biologique (Sables de l’Yprésien, Ile-de-France)	10
Figure 5 : Ratios Fer/Manganèse calculés pour les doublets géothermiques impactés par un processus d’oxydation (bio)chimique du fer et/ou du manganèse en nappe alluviale (Alluvions du Rhin, du Rhône, de la Seine, de la Moselle et de l’Adour).....	10
Figure 6 : A gauche, filtre colmaté par un biofilm constitué en majorité de bactéries filamenteuses du cycle du soufre (<i>Beggiatoa</i> , <i>Thiothrix</i>). A droite, observation du biofilm au microscope à fluorescence (Sables de l’Yprésien, Ile-de-France).....	11
Figure 7 : Crépines PVC d’un forage d’injection (doublet géothermique au Calcaire Grossier du Lutétien, Ile-de-France) colmatées par des dépôts de carbonate de calcium CaCO_3 (Martin, 2013) ..	13
Figure 8 : Crépines d’un forage d’injection colmatées par des particules issues de l’aquifère des Sables de l’Yprésien (Ile-de-France).....	14
Figure 9 : Schéma conceptuel de la variabilité de la concentration en particules au cours du cycle de pompage (Beek et al., 2009)	14



Figure 10 : Analyses élémentaires des dépôts colmatant différents organes de la boucle primaire (filtre, échangeur, forage d'injection...) d'installations géothermiques en France.	15
Figure 11 : Analyse MEB/EDS d'un dépôt colmatant les filtres d'un doublet géothermique au Grès du Portlandien	16
Figure 12 : Pompe d'exhaure recouverte d'hydroxydes amorphes de fer	17
Figure 13 : Filtre à manchon colmaté par des oxydes métalliques	18
Figure 14 : Doublet géothermique impacté par un processus de colmatage lié à l'oxydation du fer....	18
Figure 15 : Doublet géothermique impacté par un processus de colmatage lié à l'oxydation du manganèse	19
Figure 16 : Illustration de la décroissance du débit spécifique (Q/s) d'un forage d'injection (Calcaire grossier du Lutétien, Ile-de-France) provoquée par un colmatage chimique lié à la précipitation des carbonates de calcium.....	20
Figure 17 : Illustration de la baisse de performances (Q/s) d'un forage d'injection provoquée par un colmatage particulaire (Sables de l'Yprésien, Ile-de-France)	20
Figure 18 Organes de la boucle primaire impactés par les processus de colmatage	21
Figure 19 : Oxygénation de l'eau géothermale en raison d'une boucle primaire non en charge. L'injection de bulles d'air est visible sur les extraits des inspections vidéo (Gauche : Base de la colonne d'injection, Droite : surface de l'eau en tête du forage d'injection)	22
Figure 20 : Interactions avec une masse d'eau superficielle	23
Figure 21 : Vue schématique d'un forage exploitant un aquifère dans différentes conditions redox (a = forage alimenté par des venues d'eau oxique. b, c et d = forage alimenté par un mélange d'eau oxique et anoxique. e = forage alimenté uniquement par des venues d'eau anoxique riche en Fe ²⁺) extrait de Possemiers et al., 2016.....	24
Figure 22 : Stratification chimique initiale de l'aquifère	25
Figure 23 : Dynamique du niveau d'eau et échange d'oxygène entre phases aqueuse et gazeuse. Les différentes couleurs représentent les différents degrés de saturation en oxygène dissous (Williams and Oostrom, 2000).....	25
Figure 24 : Oxygénation liée aux fluctuations de la nappe induites par l'installation	26
Figure 25 Facteurs de risque contrôlant l'apparition des phénomènes de colmatage	28
Figure 26 : Logigramme de la méthode d'évaluation qualitative.....	29
Figure 27 : Logigramme de la méthode d'évaluation semi-qualitative.....	31
Figure 28 : Interface de l'analyse qualitative ARCADE	33
Figure 29 : Interface de l'analyse semi-quantitative ARCADE	34
Figure 30 Exemple de cellule à flux continu destinée à la mesure des paramètres physico-chimiques des eaux de forage.....	36
Figure 31 Sonde Hydrolab HL4 (OTT Hydromet) – Diamètre 4.44 cm, longueur 5.33 cm.....	36
Figure 32 Sonde Ocean SEVEN303plus (IDRONAUT) Diamètre 4.3 cm, longueur 7 cm	36
Figure 33 : Schéma du dispositif de prélèvement et de mesures	38
Figure 34 : Exemple d'hétérogénéité chimique détectée au forage de pompage provoquant le colmatage du doublet géothermique	40
Figure 35 : Cave d'avant puits inondée lors d'événement pluvieux. Par débordement, les eaux s'infiltrent dans le massif de gravier et s'introduisent dans le forage de réinjection générant des dépôts carbonatés sur la surface interne du tubage plein.	43
Figure 36 Principe du fonctionnement du dispositif de du rétro-lavage	50
Figure 37 : Schéma de principe d'une vanne de régulation et de maintien de pression HPV Cla-val..	51
Figure 38 Suivi de l'efficacité du dispositif de rétro-lavage	52
Figure 39 Colonne d'injection positionnée dans la zone de rabattement recouverte de dépôts d'hydroxydes de fer	53
Figure 40 Pompage sous obturateur (www.geopro.be)	54
Figure 41 Schéma d'Inertage à l'azote.....	54
Figure 42 Filtre autonettoyant HECTRON AG400	56
Figure 43 Filtre autonettoyant AMIAD AMF	56
Figure 44 : Principe de fonctionnement du filtre AMIAD AMF.....	57
Figure 45 : Dispositif électromagnétique ST090 (à gauche boîtier de commande, à droite antenne)..	59
Figure 46 Cristaux de gypse formés à l'intérieur de la colonne d'exhaure (a) au niveau de l'aspiration de la pompe d'exhaure (b) après une période d'exploitation de 16 mois : Vues sur la surface interne de la conduite de transport (c), sur l'aspiration de la pompe d'exhaure (d) après une période d'exploitation de 14 mois en présence du dispositif électromagnétique	60
Figure 47 Exemple de chroniques de répartition des volumes injectés par forage d'injection et de chronique de fonctionnement des forages de pompage.....	61



Figure 48. Exemple de chroniques des valeurs de débit spécifique des forages d'injection et des forages de pompage.....	62
Figure 49 Débits spécifiques en fonction du volume d'eau injectée au sein des forages d'injection d'une même exploitation.....	63
Figure 50 : Récapitulatif des bonnes pratiques à mettre en œuvre pour chacune des typologies de colmatage	65

Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ADES	Accès aux Données sur les Eaux Souterraines
AFPG	Association Française des Professionnels de la Géothermie
ARCADE	Analyse des Risques de Colmatage et Aide à la Décision
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
BASIAS	Base Anciens Sites Industriels et Activités de Service
BASOL	Base Sites et Sols pollués
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BSR	Bactérie sulfato-réductrice
BSS	Banque du Sous-Sol
BOS	Bactéries filamenteuses oxydant l'H ₂ S
BTR	Bactérie thiosulfato-réductrice
DRX	Diffraction des Rayons X
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
EPS	Exopolysaccharides
FeOB	Bactéries ferro-oxydantes
HPV	Hydraulic Pipe Valve
MEB	Microscope Electronique à Balayage
MES	Matières en suspension
MnOB	Bactéries mangano-oxydantes
PAC	Pompe à Chaleur
PET	Polyéthylène Téréphtalate
PVC	Polychlorure de Vinyle



L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





ETUDE DES RISQUES DE COLMATAGE ET OPTIMISATION DES PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DOUBLETS GEOTHERMIQUES – GUIDE D'AIDE A LA DECISION-

Résumé Le colmatage des doublets géothermiques sur nappes superficielles en particulier des échangeurs et des forages, notamment d'injection, est un problème majeur qui affecte de nombreuses installations sur l'ensemble du territoire français et remet en cause leur viabilité technico-économique. Le projet Geoclogging, s'inscrit dans le cadre de cette problématique.

Les connaissances acquises dans le cadre de ce projet ont permis de construire un outil d'analyse du risque ARCADE réservé à l'usage des professionnels qui intègre deux niveaux du risque, l'un qualitatif et l'autre semi-quantitatif.

Ce guide complet qui comprend à la fois l'outil d'analyse des risques ARCADE ainsi que des recommandations et méthodes préventives intégrant les contraintes technico-économiques et environnementales des projets de géothermie sur aquifères superficielles est un véritable outil d'aide à la décision qui donne aux professionnels les clefs pour juger de la viabilité technico-économique d'un projet à tous les stades de sa vie.

Le premier guide complet à l'usage des professionnels de la géothermie très basse énergie qui leur permet d'anticiper les risques de colmatage d'une installation sur nappes superficielles et de mettre en œuvre des bonnes pratiques visant à sécuriser le projet et assurer la pérennité des exploitations.

Un outil d'aide à la décision à toutes les étapes du projet pour en juger de la viabilité technico-économique.



www.ademe.fr

