

Article

« Colmatage microbien des forages et circulation de l'eau - Résultats d'un "colmatomètre" expérimental »

L. Bourget, C. Gatellier et M. N. Hermin

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 1, n°1-2, 1988, p. 3-21.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705000ar>

DOI: 10.7202/705000ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Colmatage microbien des forages et circulation de l'eau

Résultats d'un «colmatomètre» expérimental

Microbial well-clogging and the circulation of water :
Results obtained with an experimental «clog-meter»

L. BOURGUET (1), C. GATELLIER (2), M.-N. HERMIN (3), (*)

RÉSUMÉ

Un modèle physique est constitué de quatre éprouvettes de sable percolées à des vitesses de flux différentes par l'eau d'un forage colmaté.

On a pu ainsi obtenir, en quelques semaines, un colmatage différentiel de deux éprouvettes percolées à des vitesses supérieures à 1 cm/s, et confirmer les hypothèses émises sur l'influence de la vitesse réelle des filets liquides dans l'apparition du colmatage, et sur la nature bactérienne du processus colmatant.

Ce modèle constitue un véritable "colmatomètre" qui a donné lieu au dépôt d'un brevet (BOURGUET *et al.*, 1985). Avant la réalisation d'un champ captant nouveau, l'emploi d'un tel colmatomètre devrait permettre d'apprécier les risques de colmatage spécifiques au site, et de définir les normes de crépissage et d'exploitation permettant de les éviter, ou du moins de les minimiser.

Mots-clés : *bactériologie, colmatage, flux, modèle, sable.*

{1} BURGEAP S.A. - 70, rue Mademoiselle, 75015 Paris, France.

{2} IFP - 4, avenue de Bois Préau, 92502 Rueil-Malmaison, France.

{3} LABORATOIRE DE MICROBIOLOGIE - Université de Provence, 3, place Victor Hugo, Marseille, France.

{*} Ont également participé à cette réalisation : le Professeur BIANCHI de l'Université de Provence, le Laboratoire du Professeur LETOLLE de l'Université Pierre et Marie CURIE à Paris, le Laboratoire ANJOU RECHERCHE de Maisons-Laffite et Monsieur Maurice PONCEY de BURGEAP.

SUMMARY

INTRODUCTION

A study on 300 wells drilled in the Ypresian aquifer, over 60 % of which were clogged, revealed that there were significant statistic relationships between the frequency of clogging, the high velocities of the water close to the well screens and the presence of hydrogen sulfide in the water ; the latter means the existence of sulfato-reducing bacterial activity.

The experimental model described here was designed to check the effect of the velocity of the water in the aquifer on the creation of clogging, as well as its relationship with the development of the bacterial population induced by a sufficient nutrient flow rate.

This model, comprising sterilized sand, through which water from a clogged well percolated, was set up prior to a model which will soon be built, consisting of cores of Ypresian sand containing its own microorganisms.

APPARATUS AND METHODS

Four stainless-steel tubes (length 14 cm, inner diameter 26 mm) were filled with sterilized siliceous sand, the initial porosity of which was 35 %. The particle size distribution (40 to 140 μm) and the permeability were similar to those of the Ypresian sand. Tube seeding was carried out for a week by percolation with water from a clogged well ; no clogging in the tubes was observed. This water was then percolated simultaneously through the tubes (figure 2) for 58 days at rates, maintained by weekly corrections, close to 1, 3, 12 and 30 mm/s respectively (figure 3).

The microbiological analyses consisted in : direct numeration of bacterial bodies by epifluorescence microscopy, indirect numeration by counting revivifiable heterotrophic aerobic bacteria after 15 days incubation within a medium chosen to be the least selective possible and, lastly, the numeration of both permanent and casual anaerobia, as well as sulfato-reducing bacteria following Hungate's method.

HYDRODYNAMIC RESULTS (figure 4)

The reduction of permeability, which results from clogging, after 58 days of percolation was the following :

- tube nb 1 0 % for an average percolation rate of 0.8 mm/s,
- tube nb 2 2 % for an average percolation rate of 2.5 mm/s,
- tube nb 3 29,5 % for an average percolation rate of 11.5 mm/s,
- tube nb 4 59 % for an average percolation rate of 30.8 mm/s.

Tubes nb 1, 2 and 4 were destroyed in order to carry out microbiological analyses. Tube nb 3, maintained in percolation, reached 99,4 % clogging after 142 days.

MICROBIOLOGICAL RESULTS AND DISCUSSION

Sampling procedures for analyses were set up by using tube nb 2. Three different samples of sand were used for analyses : from the inlet, from the middle and from the outlet of tubes nb 1 et 4. Moreover analyses were made on the percolation water upstream and downstream of tube nb 4.

The revivifiable heterotrophic aerobic bacteria are more numerous in the water at the outlet of tube nb 4 than at the inlet, while direct counting shows a slight decrease.

There are greater quantities of microorganisms in the sand than in the percolation water. The presence of sulfato-reducing bacteria can even be observed whereas they are too few to be counted in the percolation water. The filtering effect of the sand is not the only element responsible for the increase amount of bacteria. Indeed the ratio between the number of revivifiable heterotrophic bacteria in the clogged tube and the non clogged tube was about 3 times greater than the ratio between their flow rates.

The higher velocity in tube nb 4 induced favorable conditions for the development of certain species of bacteria, some of which generate hydrogen producing organic molecules, thus allowing the development of sulfato-reducing bacteria.

Clogging itself should depend either on the increase of the biomass or on the development of microorganisms producing a significant quantity of organic molecules outside the cells. By taking into account the amount of bacteria and the volumes of percolated water, it can be seen that 2.01×10^{11} cells, i.e. 0.2 cm^3 , were retained by filtration in tube nb 1, and 0.7 cm^3 in tube nb 4. Basing the estimations on bacterial counts in the sand, biovolumes of 0.2 mm^3 are obtained for tube nb 1 (non clogged), and 8 mm^3 for tube nb 4 (clogged). Consequently the clogging substances consist mainly of products situated outside the cells.

The tube is the center of chemolithotrophic organisms (made evident by C14 tracers), thus the aerobic heterotrophic microflora and the sulfato-reducing species are no doubt linked to the use of the metabolism products of these organisms.

After 142 days percolation, the sand in tube nb 3 (clogged at 99,4 %) had a cell content of 10^{11} cells/cm³ of sand at the inlet (filamentous aggregates) and 10^7 cells/cm³ at the outlet (no aggregates). On an average, roughly a third of the pore volume is filled with cells, which is in agreement with a decrease in porosity from 35 to 27 % and therefore with the clogging in the tubes.

CONCLUSION

Tubes of sand could be clogged experimentally and rapidly. The most significant clogging was obtained for the fastest percolation rate.

It seems as though clogging is due to a proliferation of bacteria, essentially oligotrophic, and to the creation of a nutrient-chain rising to the sulfato-reducing bacteria (which are heterotrophic).

The clogging process described in the case of the Ypresian sand aquifer is certainly similar to the processes occurring in other granular aquifers.

The model "clog-meter" could be used by water suppliers exploiting aquifers liable to clogging. Indeed it can determine the best flow rate, to avoid clogging in newly exploited pumping fields and decide on the most adequate well equipment, the number of wells needed in newly exploited areas and their exploitation yield in order to obtain the desired flow rates.

Key-words : bacteriology, clogging, model, flow rate, sand.

1 - INTRODUCTION

1-1 Le rôle probable joué par la vitesse de la circulation de l'eau au sein du matériau poreux, dans l'apparition du colmatage au voisinage d'un forage fortement exploité, avait été signalé dès 1972 (HASSELBARTH *et al.*, 1973 puis ARCENEUX, 1974 ; BARBIC, 1975).

Les résultats présentés ci-après ont été acquis dans le cadre d'une étude* du colmatage des forages exploitant la nappe des sables yprésiens dans la région parisienne. Dans cet aquifère yprésien qui compte près de 300 forages d'exploitation, dont plus de 60 % sont colmatés, le rôle, déterminant pour l'apparition du colmatage, de la forte vitesse des filets liquides au voisinages des ouvrages, fut noté lors de l'étude statistique préliminaire réalisée par les auteurs.

Cette étude fit également apparaître des relations statistiquement significatives entre la fréquence du colmatage, les fortes vitesses de l'eau dues au pompage, et l'apparition de H₂S dans l'eau, signe souvent confirmé d'une activité bactérienne sulfato-réductrice.

1-2 Comme conséquence de ces observations, les hypothèses adoptées pour sous-tendre l'expérience dont rend compte la présente publication, furent les suivantes :

- a - Présence au sein de la formation aquifère d'une population bactérienne oligotrophe, en état de vie ralentie dans l'aquifère au repos,
- b - Réveil de son activité sous l'effet du pompage qui accroît le flux d'eau fournissant la matière organique élaborée nécessaire à cette microflore, dont plus particulièrement les bactéries du soufre et du fer, les seules identifiées à cette date dans les forages colmatés (BOURGUET *et al.*, 1984).

* Cette étude a été démarrée à la demande de l'AFME et poursuivie sur financement conjoint de l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie (AFME), de l'Agence Financière de Bassin Seine-Normandie (AFBSN) et du Syndicat des Communes de la Banlieue de Paris pour les Eaux, (SCBPE), maître d'ouvrage.

1-3 La réalisation d'un modèle physique, constitué de terrain naturel carotté avec toute sa flore intacte, et percolé à des vitesses variées pour étudier *in vitro* les effets du flux sur cette flore bactérienne, fut alors décidée.

Toutefois, avant de lancer les coûteuses opérations de forage et de carottage nécessaires à la réalisation de ce modèle, il fut décidé de réaliser, à titre de test, un premier modèle simplifié constitué d'éprouvettes de sable stérile percolées par l'eau d'un forage connu comme colmaté.

Sans aucun souci, à ce stade, de représenter parfaitement l'aquifère yprésien, ce modèle physique simplifié était donc destiné à vérifier expérimentalement à la fois l'influence de la vitesse réelle du flux de l'eau dans le sable sur l'apparition du colmatage, et son lien avec le développement de la biomasse, développement qui pouvait être induit par un flux de nutriments devenu suffisant.

C'est ce premier modèle dont les résultats sont présentés ici.

2 - MATÉRIEL ET MÉTHODES

2-1 Constitution du modèle

Le modèle est constitué de quatre éprouvettes identiques en acier inox (figure 1).

Elles ont été réalisées à l'état de prototypes dans les ateliers de l'Institut Français du Pétrole à Rueil-Malmaison.

Les quatre éprouvettes, longues de 14 cm, d'un diamètre intérieur de 26 mm et d'un volume de sable utile de 74,33 cm³ ont été remplies sous eau avec du sable de Crépy*, sable siliceux de granulométrie étroite et de perméabilité (2.10⁻⁴ m/s) voisine de celles du sable yprésien ; la porosité minimale, qui a pu être obtenue par vibration et tassement sous eau, est de 35 %, voisine de celle des sables yprésiens non remaniés.

2-2 Modalités pratiques

□ Alimentation en eau

Montées en parallèle sur une plaque métallique (figure 2), ces quatre éprouvettes ont été installées en percolation à des vitesses voisines de 1, 3, 12 et 30 mm/s** à la sortie immédiate du forage Pantin 1 bis, forage fortement colmaté mais maintenu en pompage par le SCBPE pour les besoins de l'expérience.

* Granulométrie du sable de Crépy : 40-60 µm : 4 %, 60-80 µm : 42 %, 80-100 µm : 48 %, 100-120 µm : 4 %, 120-140 µm : 2 %.

** Vitesse réelle "moyenne" des filets liquides dans les pores du sable, il s'agit de la vitesse de Darcy divisée par la porosité au début de l'expérience.

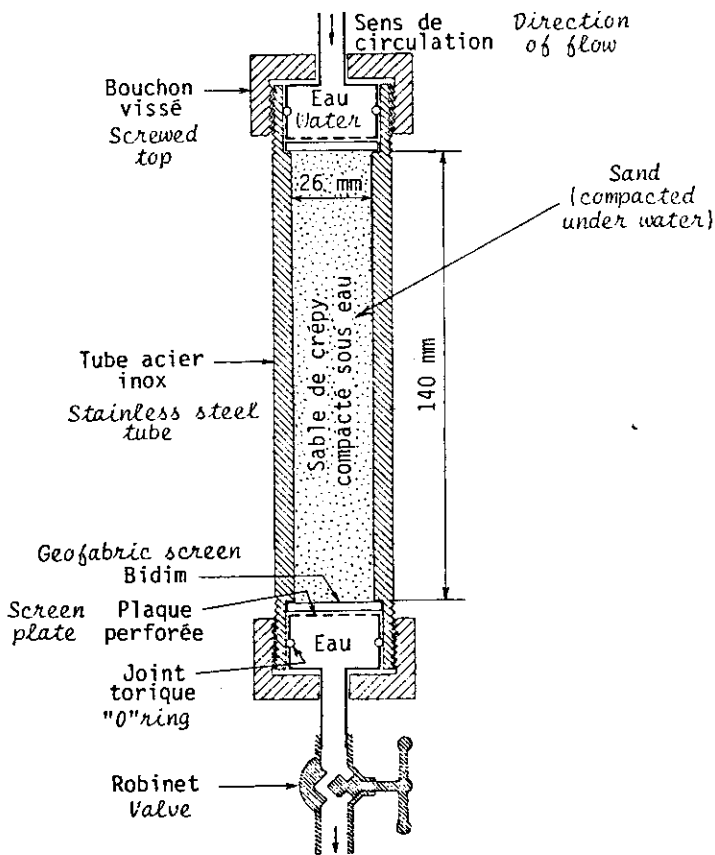


Figure 1.- Schéma d'une éprouvette.

Figure 1.- Test tube diagram.

□ Isothermie

Afin d'assurer le maintien des éprouvettes à une température proche de celle de la nappe, les éprouvettes ont été disposées dans un bain constamment renouvelé au débit de 60 litres/heure par l'eau directement issue du forage. L'ensemble était placé dans la fosse bétonnée qui entoure le forage.

. Le réglage des vitesses de circulation, donc des débits de percolation, fut effectué à l'aide des robinets disposés à l'aval de chaque éprouvette.

. Le contrôle de la perméabilité effectué au départ par simple expérience de Darcy, sous une charge de 1,40 m (gradient de 10), a montré une bonne homogénéité des éprouvettes construites (tableau 1).

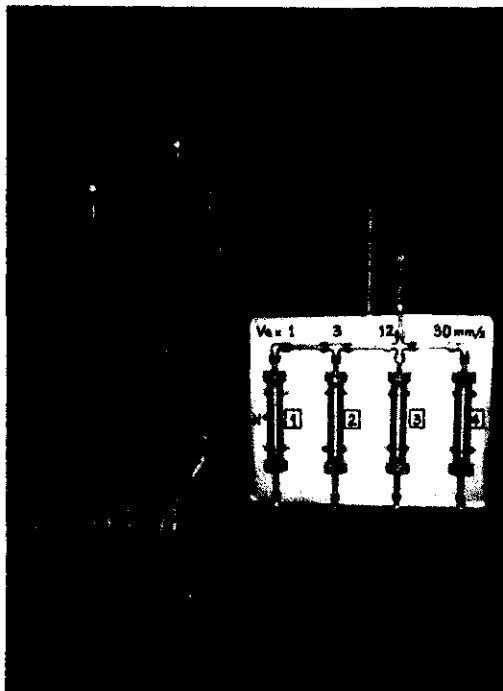


Figure 2.- Le colmatomètre
Constitué de 4 éprouvettes
identiques (baignant dans un
bac isotherme) et percolées
à 4 vitesses différentes par
l'eau du forage dont on étu-
die les risques de colmatage.

Figure 2.- Clog meter
Water from the well under
survey percolates at diffe-
rent velocities through four
identical test tubes. The
test tubes, shown here ver-
tically are normally kept in
a horizontal position in an
isothermal container.

Tableau 1.- Perméabilités initiales.

Table 1.- Initial permeabilities.

EPROUVETTES	1	2	3	4
Perméabilité (10 ⁻⁴ m/s)	2,16	2,26	2,32	2,25

2-3 Inoculum préalable

Les éprouvettes de sable, numérotées de 1 à 4, remplies d'eau, ayant été préalablement stérilisées puis vidangées sous vide, ont d'abord été inoculées, à débit identique, par passage d'eau du forage : ainsi du 4 au 11 mars 1985, chacune d'elles a été traversée par un volume de 10,9 m³ d'eau du forage Pantin 1 bis, et par une quantité de bactéries (estimée d'après les analyses bactériologiques de l'eau) de l'ordre de 10¹¹ (cent milliards). Aucun colmatage n'est apparu pendant cette première semaine, malgré une vitesse de l'eau supérieure à 100 mm/s sur chaque éprouvette.

2-4 Percolation différentielle

- Du 11.03 au 07.05.85, les quatre éprouvettes ont ensuite été maintenues sous des flux d'eau voisins des vitesses fixées au départ pour l'expérience : deux éprouvettes au-dessous du seuil de 10 mm/s (1 et 3 mm/s), deux autres éprouvettes au-dessus de cette valeur (12 et 30 mm/s) (figure 2).
- Diverses difficultés, liées d'une part à une chute progressive de la pression (à la sortie du forage), d'autre part à un colmatage des robinets de réglage du débit par des produits carbonatés, ont conduit à effectuer des contrôles hebdomadaires, au cours desquels les débits de transit résiduels étaient mesurés, puis les vitesses réajustées aux valeurs désirées.

La figure 3 montre que si les vitesses de percolation ne sont pas restées constantes, elles ont, du moins, été maintenues dans des plages de variations acceptables autour de la vitesse moyenne désirée pour chaque éprouvette.

2-5 Contrôles de perméabilité

En raison du colmatage des robinets qui est apparu progressivement, le contrôle régulier des perméabilités en cours d'expérience n'a pas pu être effectué : il aurait été nécessaire de démonter les robinets colmatés, ce qui eût entraîné un risque d'aération des éprouvettes et d'altération de la flore microbienne.

On s'est donc limité à un contrôle de perméabilité pratiqué le 7 mai 1985, après 58 jours de percolation, sur la seule éprouvette n°3 - non soumise à analyse bactériologique - dont on a mesuré le débit sous le même gradient initial (10) avec, puis sans le robinet de réglage.

La correction à introduire du fait du colmatage du robinet étant ainsi connue sur l'éprouvette n°3, on a rectifié les mesures brutes obtenues sur les autres éprouvettes, en apportant un terme correctif évalué proportionnellement au débit transité, sur la base des mesures effectuées sur l'éprouvette n°3 (tableau 2).

Ces éprouvettes n°1, 2 et 4 ont été retirées le 7 mai pour être soumises à analyses bactériologiques ; l'éprouvette 3 a été laissée en percolation jusqu'à la fin de juillet 1985.

2-6 Méthodes microbiologiques

Le comptage direct des micro-organismes consiste en une numération des cellules observées en microscopie à épifluorescence qui permet de mieux discerner les corps microbiens et de les différencier des particules inertes.

Les échantillons sont conservés jusqu'au comptage par addition de formol (solution à 37 % purifiée par filtration à 0,2 µm).

Pour l'examen, les cellules sont concentrées par filtration sur membrane cellulosique Nucléopore de porosité 0,2 µm et la coloration s'effectue sur un volume de 2 ml d'échantillon directement sur la tourelle de filtration à l'aide d'un agent fluorochrome, l'acridine orange ou le D.A.P.I. (4'6-diamino-2 phénylindole).

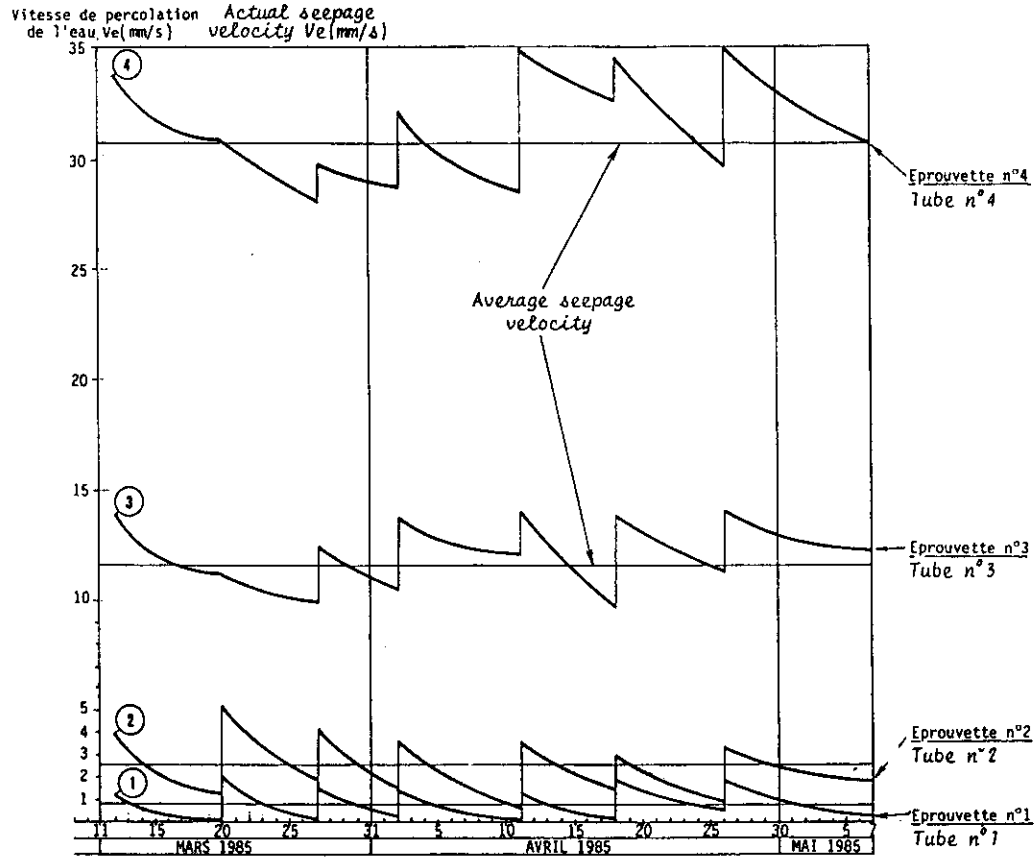


Figure 3.- Contrôle de l'évolution des vitesses de percolation.

Figure 3.- Control of changes in seepage velocity (pore velocity).

En fin de coloration, une filtration sur vide partiel assure la répartition homogène des cellules sur le filtre.

Trente champs pris au hasard sont comptés (I), ce qui permet de calculer une moyenne N qui est reliée à la concentration de l'échantillon analysé par

$$C = N \times 19.580 \times \frac{10}{9} \times d \times \frac{I}{V}$$

19.580 est une constante liée au nombre total de champs microscopiques de la surface utile de la membrane,

V est le volume filtré,

d est la dilution éventuelle de l'échantillon, dilution nécessitée par le fait que N doit être compris entre 30 et 100 pour, à la fois, atteindre une précision suffisante et ne pas fatiguer l'opérateur.

Le comptage indirect est fait par numération des bactéries aérobies hétérotrophes revivifiabiles sur un milieu choisi pour être le moins sélectif possible. Sa composition est la suivante :

Peptone	5 g
Extrait de levure	1 g
Fe Cl ₃	5 mg
Agar	15 g
Sel de mer	20 g
Eau distillée qsq	1 litre

A partir de dilutions successives, de dix en dix dans des tubes de sérum physiologique, des ensemencements de 0,2 ml de chaque dilution sont effectués en duplicata sur les boîtes de Pétri qui sont observées après quinze jours d'incubation à température ambiante.

Les comptages des bactéries anaérobies strictes et facultatives, ainsi que les comptages des bactéries sulfato-réductrices, se font suivant la technique de Hungate (1959) respectivement sous atmosphère N₂/CO₂ (80/20) et atmosphère H₂/CO₂ (80/20).

3 - RÉSULTATS

3-1 Résultats hydrodynamiques (figure 4)

Le contrôle effectué le 7 mai sur l'éprouvette n°3, soumise pendant 58 jours à une vitesse de percolation de 12 mm/s, a montré (sous le même gradient de charge que la mesure initiale) une chute de 30 % de la perméabilité.

Les mesures faites sur les trois autres éprouvettes (détruites le 7 mai pour analyses bactériologiques) conduisent aux valeurs de colmatage du tableau 2.

L'éprouvette n°3 a été ensuite laissée en percolation à 12 mm/s jusqu'en juillet 1985. Son colmatage s'est poursuivi comme illustré par la figure 4).

Tableau 2.- Relations entre le colmatage et la vitesse de percolation.

Table 2.- Relations between clogging and seepage velocity.

EPROUVETTE N°	1	2	3	4
Vitesse moyenne de percolation mm/s	0,8	2,5	11,7	30,8
Volume transité en 58 jours (m ³)	0,75	2,3	10,9	28,6
Volume initialement transité (inoculum)	10,9	10,9	10,9	10,9
Volume total transité (m ³)	11,65	13,2	21,8	39,5
Colmatage (perte de perméabilité K par rapport à l'état initial en % (*)) après 58 jours	(0 %)	(2 %)	29,5	(59 %)

29,5 % : valeur mesurée (2 %) : valeur calculée.

(*) Ce degré de colmatage s'exprime en % par la formule :

$$100 [1 - K_{\text{final}}/K_{\text{initial}}].$$

Après 142 jours de percolation, qui ont provoqué un colmatage total (99,4 %), cette éprouvette a été soumise à des analyses chimiques comportant le dosage du carbone organique, des carbonates, du fer et du soufre oxydable ; ces analyses ont été confrontées aux résultats obtenus avec le sable initial ayant servi au remplissage de l'éprouvette.

3-2 Résultats microbiologiques

3-2-1 Eprouvettes n°1 et 4

Ces résultats ont été obtenus par des analyses effectuées au Laboratoire de Microbiologie de l'Université de Marseille.

L'éprouvette n°2 a été détruite afin de mettre au point les procédures de prélèvement pour analyses ; les analyses microbiologiques ont donc porté sur les seules éprouvettes extrêmes n°1 et 4, ainsi que sur des échantillons d'eau prélevés aseptiquement en amont du dispositif et en aval de l'éprouvette n°4 qui présentait les signes les plus évidents de colmatage.

L'ensemble des échantillons a été transporté, sous glace, au Laboratoire de Microbiologie et soumis aux examens et analyses six heures après leur prélèvement (tableaux 3 et 4).

Dans chacune des éprouvettes n°1 et 4, trois échantillons ont été prélevés aseptiquement à 0-1 cm (entrée), 4-5 cm (milieu) et 9-10 cm (sortie).

Les bactéries aérobies hétérotrophes revivifiables apparaissent plus nombreuses à la sortie de l'éprouvette n°4 qu'à son entrée, alors que la numération directe tendrait plutôt à montrer une légère diminution.

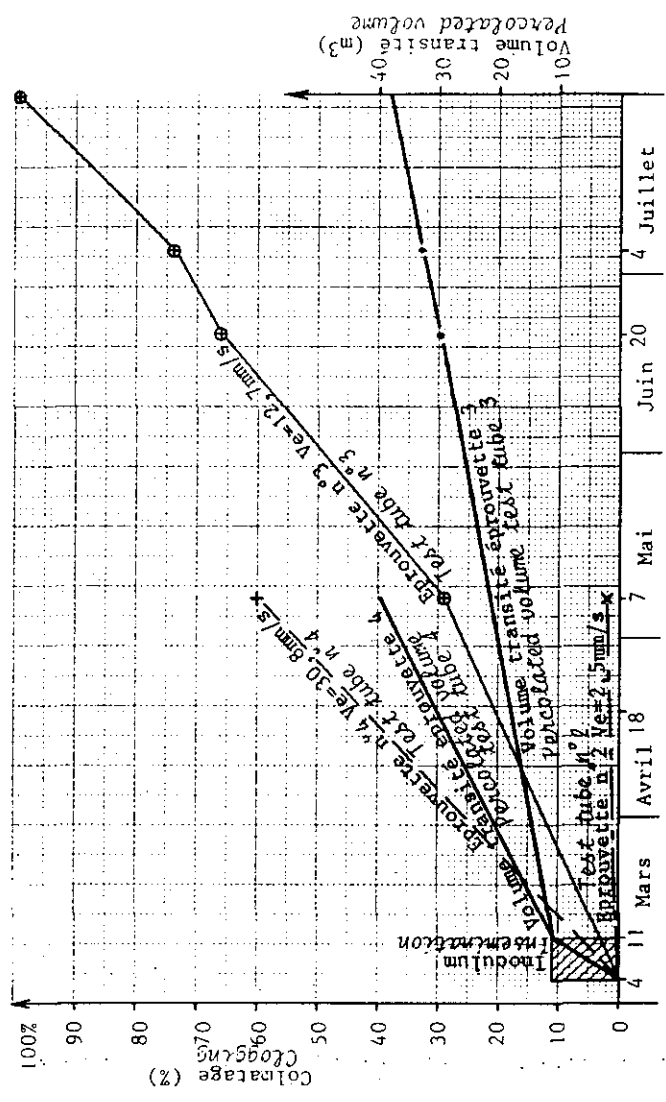


Figure 4.- Evolution des colmatages.

Figure 4.- Evolution of clogging.

Tableau 3.- Concentration microbienne de l'eau prélevée en amont et en aval de l'éprouvette n°4.

Table 3.- Bacterial concentration in water.

	AMONT	AVAL
Microflore totale (épifluorescence)	5,58 10 ⁴	3,73 10 ⁴
Microflore aérobie hétérotrophe	5,50 10 ²	1,05 10 ³
Microflore anaérobie	10	10
Bactéries sulfato-réductrices	0	0

(nb. bactéries/ml d'eau)

Parallèlement, on observe, en fin d'expérience, que les micro-organismes sont bien plus nombreux dans le sable des éprouvettes que dans l'eau qui les a percolés pendant 58 jours, et qu'il devient même possible de déceler la présence de bactéries sulfato-réductrices alors que leur concentration était trop faible dans l'eau pour être comptée.

Tableau 4.- Concentration microbienne du sable contenu dans les éprouvettes.

Table 4.- Bacterial concentration in the sand.

	EPROUVETTE N°1			EPROUVETTE N°2		
	ENTREE	MILIEU	SORTIE	ENTREE	MILIEU	SORTIE
Microflore totale (épifluorescence)	4,72 10 ⁶	2,84 10 ⁶	3,57 10 ⁶	1,36 10 ⁸	8,53 10 ⁷	1,11 10 ⁸
Microflore aérobie hétérotrophe	1,4 10 ⁵	1,4 10 ⁴	1,25 10 ⁴	2,5 10 ⁶	1,5 10 ⁶	3,5 10 ⁴
Microflore anaérobie	10 ³	-	-	10 ³	10 ³	-
Bactéries sulfato-réductrices	10	-	-	10 ²	10 ²	-

(nb. bactéries/ml sable humide)

Cependant, les différences observées dans la numération des populations bactériennes des éprouvettes n°1 et 4 ne sont pas dues au seul effet de filtre provoqué par la rétention d'une partie des corps microbiens au passage du sable compacté.

En effet, si la présence de la microflore totale, au milieu des éprouvettes, peut s'expliquer par un effet de filtre (proportionnel aux flux) avec un facteur d'augmentation (30) sensiblement du même ordre de grandeur que le rapport des flux (38), la comparaison de la microflore totale revivifiable, sur milieu hétérotrophe aérobie, prouve que sa

nature a changé puisque le facteur d'augmentation (107) est significativement beaucoup plus élevé (environ trois fois).

Cette observation est en accord avec le fait que l'eau recueillie en aval de l'éprouvette n°4, en fin d'essai, contient deux fois plus de bactéries revivifiables que l'eau d'alimentation.

On peut aussi penser que les phénomènes qui se sont produits dans l'éprouvette colmatée ont bien constitué une évolution locale du milieu favorable au développement des bactéries revivifiables, et que l'on a bien reconstitué ainsi un fragment de la chaîne alimentaire micro-organique.

Ainsi, il semble que la vitesse plus élevée de l'eau ait induit dans l'éprouvette n°4 les conditions favorables à la croissance d'une partie de la population microbienne, jouant ainsi une action analogue à celle que l'on obtient dans un fermenteur en culture continue, régulée par un facteur limitant.

On retiendra la mise en évidence, dans la population fixée sur le milieu poreux, de bactéries sulfato-réductrices, dont on peut penser que la croissance soit consécutive à un développement microbien générateur, en amont, de molécules organiques spécifiques (donatrices d'hydrogène).

Concernant le processus colmatant lui-même, il n'a pas été possible de mettre en évidence de formes (filamenteuses ou autres) particulièrement plus abondantes que d'autres et on peut donc penser pour l'instant que le colmatage observé est simplement lié à l'accroissement de cette biomasse indifférenciée, ou au développement d'une flore microbienne "excrétant" une biogée.

D'après les résultats des numérations effectuées sur l'eau (tableau 3) à l'entrée et à la sortie de l'éprouvette n°4 et en prenant en compte les débits percolés par chaque éprouvette, on peut calculer que l'éprouvette n°1 a pu retenir un nombre de cellules bactériennes de

$$(5,58 - 3,73) 10^4 \times (10 + 0,9) 10^6 = 2,01 10^{11}$$

(cellules par ml) × volume percolé (ml) = effectif.

soit 0,2 cm³ de corps bactériens si l'on admet un volume unitaire de 1 μm³.

Le même mode de calcul appliqué à l'éprouvette n°4 donne 0,7 cm³ de corps bactériens.

Au contraire, en considérant les concentrations bactériennes moyennes des éprouvettes n°1 et 4, soit respectivement 3,71 10⁵ et 1,11 10⁸ cellules par millilitre, on peut calculer les biovolumes apparemment retenus par le sable des éprouvettes dont le volume est de 75 ml.

On obtient un volume mille fois inférieur, pour l'éprouvette n°1, à la valeur théorique précédente (0,2 mm³ contre 0,2 cm³) et un volume cent fois inférieur pour l'éprouvette n°2 (8 mm³ contre 0,7 cm³).

Il faut donc bien admettre que le matériau colmatant est sans doute constitué, pour l'essentiel, de produits extra-cellulaires ; malheureusement, le volume de matériau disponible dans les éprouvettes expérimentales est trop faible pour qu'on puisse espérer, après destruction de la matrice, extraire sans contamination une quantité suffisante de

matière organique et en étudier même simplement le spectre infrarouge.

3-2-2 L'éprouvette n°3

Cette éprouvette a été maintenue en percolation pendant 142 jours, jusqu'au 30 juillet 1985 ; son colmatage atteint à la fin de l'expérience était supérieur à 99 %

L'examen au laboratoire de microbiologie a porté sur la partie supérieure (entrée) et sur la partie inférieure (sortie) de l'éprouvette. Il faut noter que la première partie, de couleur gris foncé, comportait une importante phase colloïdale et qu'il n'a pas été possible, comme précédemment (éprouvettes n°1 et 4), de détacher par ultrasons les cellules bactériennes des particules minérales.

L'examen du surnageant, par microscopie à épifluorescence, a montré que cette suspension était essentiellement constitué d'agrégats microbiens à tendance filamenteuse, qu'aucun traitement ultérieur n'a permis de dissocier de façon sensible.

Malgré tout, en examinant plusieurs centaines de champs microscopiques (sur une suspension diluée au 1/10 dans du sérum physiologique), l'effectif de cellules peut être estimé à un nombre voisin de 10^{11} par ml de sable.

A la sortie, l'éprouvette, dont le sable est de couleur claire, on n'a pas observé les agrégats précités, et le traitement habituel par sonication a permis, sans difficulté, de séparer les cellules dont le nombre a pu être évalué à seulement 10^7 par millilitre de sable.

L'ensemble des résultats de l'analyse microbiologique est présenté dans le tableau 5.

Tableau 5.- Concentration microbienne du sable contenu dans l'éprouvette n°3.

Table 5.- Bacterial concentration in the sand of test tube n°3.

	PARTIE SUPERIEURE (Entrée)	PARTIE INFERIEURE (Sortie)
Microflore totale (épifluorescence)	10^{11}	$4,59 \cdot 10^6$
Microflore aérobie hétérotrophe	$4,4 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^3$
Microflore anaérobie	$4,5 \cdot 10^3$	7,5
Bactéries sulfato-réductrices	$2,5 \cdot 10^2$	0,5

(nb. bactéries/ml sable humide)

Aucune différence de taille des bactéries n'a été notée entre les photos des différentes éprouvettes.

Le volume moyen unitaire des bactéries, mesuré sur les photographies au microscope électronique, a pu (en les assimilant à un cylindre) être estimé à environ $2 \cdot 10^{-9}$ mm³.

Si, en toute première approche, on adopte pour l'ensemble de l'éprouvette n°3, un nombre de bactéries égal à la moyenne arithmétique des deux mesures (entrée et sortie) soit $5 \cdot 10^{10}$ bactéries par ml de sable, le volume bactérien correspondant (par ml) serait de 0,1 ml !...

Ceci signifie que les corps bactériens rempliraient près du tiers du volume total des vides de la formation sableuse (porosité initiale 35 %). Cette observation est à rapprocher du fait que la porosité efficace du sable, a chuté, après colmatage, de 35 à 27 %, soit une perte de 21 % sur la porosité initiale. Ces résultats, très concordants en ordre de grandeur, expliquent parfaitement le colmatage presque total constaté sur cette éprouvette après 142 jours de percolation.

Il est important de noter que les analyses chimiques effectuées ont montré, à l'entrée de l'éprouvette n°3, un taux de 0,18 % de poids sec en carbone organique et une quantité non décelable côté aval.

Le tableau 6 récapitule les résultats exprimés en biovolumes bactériens et les compare aux résultats hydrauliques.

Tableau 6.- Biovolumes bactériens.

Table 6.- Bacterial biovolumes.

EPROUVETTE N°	EFFECTIF BACTERIEN MOYEN PAR ml DE SABLE	VOLUME BACTERIEN EN ml PAR ml DE SABLE	BIOVOLUME EN % DE LA POROSITE INITIALE	% COLMATAGE
1	$3,8 \cdot 10^{6*}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$	0,002	N. mesurable négligeable
4	$1,4 \cdot 10^{8*}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	0,06	(59 %)
3	$5 \cdot 10^{10**}$	0,1	28,6	99 %

* Moyenne de trois mesures (entrée, milieu, sortie).

** Moyenne de deux mesures (entrée, sortie).

Parallèlement aux numérations directes par épifluorescence, on a cherché à effectuer des subcultures sur gélose peptonée, mais seulement une part très infime de la microflore totale a accepté de s'y développer et aucune forme bactérienne filamenteuse n'a été mise en évidence dans ce milieu de culture.

Cette double observation peut s'expliquer par le fait que l'éprouvette ait été le siège d'une prolifération d'organismes chémoautotrophes (n'exigeant aucune source de carbone organique pour leur croissance) et, par conséquent, parfaitement adaptés aux conditions oligotrophes du milieu.

La mise en évidence d'une microflore hétérotrophe aérobie est vraisemblablement liée à l'utilisation des produits du métabolisme (ou de la lyse) de la microflore chémoautotrophe.

La présence de bactéries sulfato-réductrices (10^3 par ml) peut s'expliquer également par l'établissement d'une chaîne alimentaire.

On notera d'ailleurs que les analyses chimiques effectuées ont montré qu'une quantité de 1,9 mg/gramme de S^{2-} , à l'entrée de l'éprouvette, alors que ces sulfures ne sont pas décelés en aval.

Enfin, une mesure d'activité métabolique sur traceurs, marqués au C^{14} , a confirmé la très large prédominance de la chémolithotrophie (sur bicarbonate) par rapport à l'hétérotrophie (sur glucose).

Cette activité, beaucoup plus importante dans le niveau superficiel (un facteur 50) traduit généralement une prépondérance des micro-organismes autotrophes (BIANCHI A., 1986).

4 - CONCLUSIONS

La totalité des buts visés par la réalisation de ce premier modèle a été atteinte :

4-1 On a pu colmater expérimentalement, de manière rapide (en 58 jours) et significative, deux éprouvettes de sable ordinaire percolées à des vitesses supérieures à 1 cm/s, le colmatage le plus important étant obtenu, à durée de percolation égale, pour la vitesse la plus élevée (éprouvette n°4). On a pu, par la suite, colmater totalement en 142 jours, l'éprouvette n°3 percolée à 12 mm/s.

4-2 On remarquera que le forage Pantin 1 bis qui a fourni l'eau nécessaire à l'expérience, avait perdu, par colmatage, 50 % de sa caractéristique en six mois, alors que son régime d'exploitation correspondant (compte tenu du diamètre de sa crépine) a une vitesse moyenne de l'eau de l'ordre de 6 mm/s dans le terrain le plus proche de la crépine. L'ordre de grandeur de la vitesse naturelle d'évolution du colmatage (quelques mois) semble donc bien avoir été restitué par le modèle réalisé.

4-3 Le colmatage obtenu semble bien dû, globalement, à une prolifération bactérienne, essentiellement oligotrophe, et à l'établissement d'une chaîne alimentaire allant jusqu'aux bactéries sulfato-réductrices (qui, elles, sont hétérotrophes). Il s'agit bien d'une prolifération, et non d'un simple effet de filtre puisque, pour les bactéries sulfato-réductrices, la prolifération est plus de deux fois supérieure au simple rapport des flux (flux dans un rapport de 1 à 38, prolifération des sulfato-réductrices dans un rapport de 1 à 80 entre les éprouvettes n°1 et 4).

Il faut préciser cependant, sur le plan de la connaissance de cette "chaîne alimentaire", que le modèle réalisé est quelque peu biaisé par le fait qu'il est alimenté par de l'eau issue d'un forage très colmaté ; on peut penser, de ce fait, que l'eau de percolation qui parvient au modèle a déjà été appauvrie en nutriments par la flore bactérienne développée dans le terrain autour du forage.

4-4 L'expérience qui a été effectuée a permis, par la suite, d'aborder avec plus de sûreté le modèle physique définitif puisque l'on pouvait espérer obtenir expérimentalement des résultats significatifs et des éprouvettes colmatées en quelques semaines ou quelques mois.

4-5 Bien que cette étude se soit intéressée uniquement à la nappe des sables yprésiens, diverses observations, faites sur la vitesse de l'eau en pompage et l'existence de bactéries dans d'autres aquifères granulaires (alluviaux notamment) permettent de penser que les processus colmatants pourraient bien n'y être pas fondamentalement différents, même si l'on peut imaginer que les phénomènes microbiens en cause et leurs conditions d'éveil puissent être différentes suivant la nature de la flore microbienne présente dans chaque cas.

4-6 Le modèle réalisé, qui permet de mesurer différentiellement le colmatage en fonction des vitesses de flux appliquées, constitue en définitive un véritable "colmatomètre".

On peut prévoir l'emploi d'un tel appareil dans de nombreux cas d'aquifères granulaires (sables, alluvions) sujets à colmatage, dans lesquels il pourra servir à conseiller les exploitants, de la manière suivante :

a - Sur un champ captant récent ou sur un forage en début d'exploitation, l'installation d'un colmatomètre à sable ordinaire peut permettre en quelques semaines de tester s'il existe des risques de colmatage, et pour quelles vitesses : on pourra ainsi obtenir rapidement des indications précieuses qui permettront de définir le régime d'exploitation optimal pour éviter tout risque de colmatage.

b - Surtout, dans la perspective d'un champ captant nouveau, on conseillera d'abord de réaliser, en petit diamètre, un premier sondage de reconnaissance, qui sera carotté dans l'aquifère, tubé en 4" et mis en pompage à faible débit ; ce sondage alimentera pendant quelques mois un colmatomètre comportant plusieurs éprouvettes construites avec les carottes recueillies. Le colmatomètre indiquera, à l'issue de ce délai, s'il existe un risque de colmatage et cela pour quelles vitesses de flux. Il permettra donc de définir, avec précision, le diamètre de crépine à adopter et le débit d'exploitation à ne pas dépasser pour les ouvrages de captage définitif ; le cas échéant, il permettra de décider le nombre optimal d'ouvrages nécessaires pour obtenir le débit souhaité.

On disposera ainsi, avec ce colmatomètre, d'un moyen simple et apparemment sûr pour fixer, sur les forages nouveaux, les normes de crépinage et de pompage à respecter pour éviter le colmatage.

L'usage d'un tel colmatomètre devrait permettre, en quelques semaines à quelques mois, au prix d'un simple sondage de reconnaissance carotté, de porter un jugement sur la capacité de production d'une zone de captage nouvelle, en tenant compte des risques de colmatage spécifiques au site retenu.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARCENEUX W. (1974). Operation and Maintenance of wells. *JAWWA*, 66(3): 199-204.
- BARBIC F.F., DJINDIC M.V., BRACILOVIC D.M., DJOROLJJEVSKI S.M., MILCIC S.B., VESELINOVIC M.J., KRAJINCANIC B.V., ZIVKOVIC J.S. (1975). Development of Iron and Manganese Bacteria in Ranney Wells. *JAWWA*, 67(10): 565-572.
- BIANCHI A. (1986). Communication personnelle.
- BOURGUET L., GATELLIER C. (1984). Colmatage des forages, causes et remèdes, Hydrogéologie et géologie de l'ingénieur I, 121-126.
- BOURGUET L., GATELLIER C. (1985). Méthode et dispositif pour évaluer les risques de colmatage d'un puits ou d'un forage traversant un réservoir poreux, notamment une formation géologique. Brevet enregistré sous n°85/19.374, 26.12.1985.
- BURGEAP (1985). Etude du colmatage des forages exploitant l'Yprésien. (3). Etude du colmatage chimique et bactériologique à l'injection, pré-modèle physique, rapport de synthèse. AFSN - AFME SCBPE - Rapport BURGEAP R.633/E.1420. Juillet 1985.
- DONDERO N.C. (1975). The Sphaerotilus - Leptothrix Group. *Annual Rev. Microbiol.*, 29: 407.
- HASSELBARTH V. (1972). Biological Incrustation of Well due to Mass Development of Iron and Manganese Bacteria. *Water Treat. Exam.*, 21(part. 1): 20.
- HUNGATE R.E. (1969). A roll tube method for cultivation of strict anaerobes. *Methods in Microbiology*. NORRIS JR and RIBBON DW. Acad. Press Inc. London. Vol. 3 B, 117-132.
- JENNEMAN G.E., KNAPP R.M., MENZIE D.E., Mc INERNEY M.J., REVUS D.E., CLARK J.B., MUNNECKE D.M. (1983). Transport phenomena and plugging in Berea Sandstone using microorganisms, International conferences on microbial enhancement of oil recovery, Oklahoma May 1982 proceedings, US Dept. Energy - Feb. 1983, 71-75.
- UPDEGRAFF D.M. (1983). The effect of microorganisms on the permeability and porosity of petroleum reservoir rock *Microbial Enhanced oil recovery*. Penwell books, Oklahoma, 37-44.
- VANBEEK C.G.E.M., VAN DER KOOLIJ D. (1982). Sulphate-Reducing Bacteria en Ground Water form Clogging and Non-Clogging shallow wells in the Netherlands River Region. *Ground Water*, 20(3): 298.