

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GÉOTHERMIQUES

BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
B.R.G.M.

AGENCE FRANÇAISE
POUR LA MAITRISE DE L'ÉNERGIE
A.F.M.E.

COLMATAGE - DÉCOLMATAGE

Étude documentaire



Département EAU

Rapport du B.R.G.M.

85 SGN 030 EAU

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GÉOTHERMIQUES

BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
B.R.G.M.

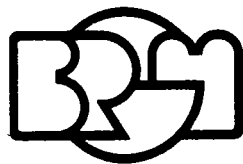
AGENCE FRANÇAISE
POUR LA MAITRISE DE L'ÉNERGIE
A.F.M.E.

COLMATAGE - DÉCOLMATAGE

Étude documentaire

par

A. LALLEMAND-BARRÈS



Département EAU

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.34.34

Rapport du B.R.G.M.

85 SGN 030 EAU

Février 1985

RÉSUMÉ

Le colmatage des puits d'exploitation, de même que le colmatage des lits et berges de rivière peut avoir des conséquences économiques néfastes, en ce sens qu'il entraînera une baisse de production et des coûts de l'eau plus élevés. Le colmatage des puits d'injection est quant à lui surtout préjudiciable au développement de l'utilisation thermique des nappes.

Il importe donc dès que le colmatage est diagnostiqué, d'en déterminer la cause afin de mettre en oeuvre la méthode de décolmatage la plus appropriée.

Cette étude documentaire basée sur des articles récents, recense les différentes causes de colmatage des puits, qui peuvent être mécaniques, chimiques ou biologiques.

Les différentes techniques de décolmatage sont ensuite présentées : méthodes mécaniques et méthodes chimiques. On aborde ensuite le colmatage des berges de rivière, en examinant la façon dont il se développe et les moyens de le quantifier.

Cette étude est réalisée sur crédits du Ministère du Redéploiement industriel et du commerce extérieur, dans le cadre des travaux réalisés pour l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie.

S O M M A I R E

	pages
<u>INTRODUCTION</u>	1
1. <u>DEFINITIONS</u>	2
2. <u>MECANISMES DU COLMATAGE</u>	3
3. <u>COLMATAGE DES PUIITS</u>	5
3.1. <i>Colmatage des puits par les particules en suspension</i>	6
3.2. <i>Colmatage des puits dû à des bulles de gaz</i>	12
3.3. <i>Colmatage des puits dû aux bactéries</i>	14
3.4. <i>Colmatage dû à la formation de précipités dans les puits</i>	16
3.5. <i>Colmatage dû à l'interaction eau injectée-roche</i>	17
4. <u>DECOLMATAGE DES PUIITS</u>	19
4.1. <i>Méthodes mécaniques</i>	19
4.1.1. <i>Balayage par pompage</i>	19
4.1.2. <i>Injection d'air comprimé</i>	20
4.1.3. <i>Pompage dans une section</i>	22
4.1.4. <i>Jet d'eau sous haute pression</i>	22
4.1.5. <i>Pistonnage et puisage</i>	22
4.1.6. <i>Brossage</i>	23
4.2. <i>Méthodes chimiques</i>	23
4.2.1. <i>Le chlore</i>	23
4.2.2. <i>Les acides</i>	23
4.2.3. <i>Les polyphosphates</i>	24
4.3. <i>Choix du produit chimique</i>	25
4.4. <i>Programmation du décolmatage</i>	25
5. <u>COLMATAGE DES BERGES PAR LES PARTICULES EN SUSPENSION</u>	28
<u>CONCLUSION</u>	42
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	43

INTRODUCTION

Les forages, aussi bien d'exploitation que d'injection, particulièrement en milieu granulaire, sont sujets à une altération de leurs caractéristiques, qui peut entraîner des conséquences économiques néfastes.

En ce qui concerne les forages d'exploitation, le colmatage se traduit par une diminution du débit spécifique, qui aura pour conséquence d'un accroissement du prix de l'eau et éventuellement une baisse de la production.

Le colmatage des forages d'injection, quant à lui peut avoir de fâcheuses conséquences sur le développement des utilisations thermiques des aquifères par doublets de forages. Néanmoins, le colmatage des forages d'injection paraît plus contrôlable que celui des forages d'exploitation, ne serait-ce que du fait que l'eau injectée peut être traitée.

Par ailleurs, le colmatage du lit et des berges d'une rivière tend à diminuer le débit d'étiage des rivières et surtout limite le débit de réalimentation des nappes par les rivières.; il devient un handicap économique sérieux pour les champs de captage qui exploitent des nappes alluviales avec forte réalimentation induite. Toutefois, les effets hydrauliques pénalisants du colmatage sont peut-être accompagnés d'effets bénéfiques sur la qualité des eaux. Un programme de recherche sur cet aspect est mis en place au BRGM.

Dans ce rapport, nous tentons de faire le point sur les connaissances actuelles des phénomènes de colmatage et des remèdes qu'on peut y apporter. Nous nous sommes appuyés principalement sur le rapport d'OLSTHOORN (1982) qui est le fruit récent de la réflexion et de l'expérience d'un groupe de travail, sur ce sujet.

1. DEFINITIONS

Selon le "Dictionnaire français d'hydrogéologie" de CASTANY et MARGAT, le colmatage est défini de la manière suivante :

- Réf. 9.11 Colmatage. Réduction de la *perméabilité* d'un *milieu poreux*, notamment au voisinage de la paroi d'un puits, d'un forage ou de la berge et du lit d'un cours d'eau, par accumulation d'éléments fins apportés par l'eau, quelle que soit leur provenance (de l'*aquifère*, du puits ou d'un cours d'eau de surface). Le phénomène inverse est l'*érosion souterraine*. Réf. Schneebeli, 1966.
- Réf. 9.18 Décolmatage. Action de réduire et d'éliminer le *colmatage* d'un puits, d'un forage : mobilisation et extraction des éléments fins retenus dans l'*aquifère* ou dans le *massif filtrant* au voisinage de la paroi du puits, ou désentartrage, afin d'améliorer la *perméabilité*. Se distingue du *développement* qui est une amélioration des caractéristiques naturelles du terrain, tandis qu'il s'agit ici surtout d'une restauration des caractéristiques originelles.

Pour être complet, il faut ajouter au colmatage de puits et des berges d'un cours d'eau, le colmatage de sols, qui se rencontre fréquemment lors des opérations de recharge de nappe par des eaux usées (lagunage, épandage, infiltration-percolation), ou lors de traitement d'effluents par percolation dans le sol.

Dans le cadre de cette étude, nous ne considérons que les problèmes spécifiques au colmatage des puits, et des berges et lit de rivières. Il est bien entendu que les mécanismes du colmatage et d'autres aspects du problème sont communs.

Par ailleurs, il faut noter que le colmatage peut avoir d'autres causes que celle indiquée dans la définition ci-dessus, au moins en ce qui concerne le colmatage des puits d'injection. OLSTHOORN (1982) fait état de cas de colmatage de puits dus à la présence de particules en suspension dans l'eau injectée, ou de bulles de gaz, la prolifération de bactéries dans et autour du puits, la formation de précipités dans l'eau injectée et dans le puits, la formation de précipités dans le sol, le gonflement et la dispersion des argiles, l'érosion de la structure du sol, et la pression de la nappe.

2. MECANISMES DU COLMATAGE

L'idée la plus communément répandue est que le colmatage est dû à un phénomène essentiellement mécanique ou chimique (précipités) au niveau des crépines dans le cas du colmatage des puits, et dans le milieu poreux pour les berges et lits de rivières.

Selon HERZIG et al. (1970) il est possible de distinguer deux types de filtration pour les particules en suspension : une filtration mécanique pour les grosses particules ($\varphi \geq 30 \mu$) et une filtration physico-chimique pour les particules plus petites ($\varphi \simeq 1 \mu$). Les deux phénomènes interviennent pour les particules de taille moyenne.

En ce qui concerne les grosses particules, un décolmatage spontané est improbable, tandis que pour les petites particules, les effets de surface prédominent et il peut y avoir décolmatage spontané en cas de variations soudaines du débit ou de la pression.

Le colmatage du milieu poreux peut être décrit mathématiquement par l'équation d'équilibre de masse et les équations cinétiques décrivant la vitesse de colmatage et la vitesse de décolmatage.

TRZASKA (1965) décrit le phénomène de colmatage par les deux équations suivantes :

$$(1) \quad \frac{\partial N(x,t)}{\partial t} + v(x,t) \frac{\partial N(x,t)}{\partial x} + N(x,t) \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = \frac{-\partial P(x,t)}{\partial t}$$

$$(2) \quad \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \alpha [A - P(x,t)] N(x,t)$$

La première équation est la réaction d'équilibre, la deuxième décrit la cinétique du processus de colmatage.

$N(x,t)$: concentration volumique de suspensions dans le milieu poreux,
en x au temps t

$P(x,t)$: concentration en pores qui subissent le colmatage

A : concentration initiale en pores, susceptibles d'être colmatés

α : coefficient de colmatage caractérisant le déroulement du processus.

Conditions limites : $N(0,t) = n = \text{const.}$

$$P(x,t) = 0 \text{ pour } x - \int_0^t v(x,t) dt \geq 0$$

$$v(x,t) = \text{const.}$$

TRZASKA (1965) a entrepris des études expérimentales pour vérifier les hypothèses faites dans le modèle de colmatage. Il a testé la durée de colmatage, le degré de concentration de la suspension introduite dans le milieu, la vitesse de percolation à travers les pores, la taille des grains du milieu poreux et celle des grains de la suspension. Il aboutit aux mêmes conclusions que HERZIG et al. (1970), à savoir qu'il existe un colmatage physico-chimique profond pour les petites particules, et un autre moins profond pour les particules de taille $\geq 30 \mu$.

HERZIG (1970) a développé les équations décrivant l'équilibre de masse ainsi que la cinétique. Dans la plupart des cas, on a vérifié que la cinétique était du premier ordre ; il n'y a pas d'interactions entre les particules en suspension. Différents modèles de représentation du colmatage sont testés par ces auteurs, mais ils ne rendent pas bien compte des processus expérimentaux.

Les mécanismes du colmatage sont repris de façon plus détaillée avec la description des différentes causes de colmatage.

3. COLMATAGE DES PUIITS

Selon l'enquête réalisée par le BURGEAP pour le compte de l'AFME (BOURGUET, GATELIER, 1984), les problèmes du colmatage se posent à peu près dans les mêmes termes à l'exploitant d'eau et au concepteur de dispositifs thermiques basés sur l'exploitation des nappes.

BOURGUET (1984) indique que l'étude réalisée a porté sur 68 forages d'exploitation de l'Yprésien, qui ont été classés par catégories selon la vitesse à laquelle ils se colmatent. Les forages ont été classés en six groupes, allant des forages peu ou lentement colmatés aux forages développés, en exploitation. Les pertes de débit spécifique allaient de 2,5 % l'an à 24 % l'an. Chaque forage a ensuite été considéré pour déterminer l'évolution du colmatage depuis sa mise en service.

Les auteurs ont pu déterminer que les risques de colmatage paraissent liés aux fortes vitesses d'arrivée de l'eau dans les pores de la formation aquifère, et également à la présence de sulfures, de H₂S et d'une forte concentration en O₂.

Les auteurs mettent l'accent sur le fait que la nature du produit colmatant est ignorée dans 95 % des cas recensés, ce qui a pour conséquence que les produits décolmatants utilisés sont souvent inefficaces.

En plus des forages d'exploitation, BOURGUET et al. (1984) ont recensé quelques forages d'injection, parmi lesquels un doublet de forage (pompage-injection) à Neuilly-sur-Seine. Le débit d'injection dans ce forage est passé en quelques mois de 80 m³/h à 15 m³/h. Dans ce cas particulier, il a été constaté que le colmatage était dû principalement à l'entraînement d'air.

Il apparaît donc que si l'on se trouve en présence d'un puits qui se colmate, la première intervention consiste à rechercher la cause du colmatage et la nature du produit colmatant et à appliquer ensuite la solution de décolmatage la mieux appropriée.

3.1. Colmatage des puits par les particules en suspension

Le colmatage par les particules en suspension ne peut pas toujours être évité. La concentration en particules en suspension dépendra de la composition de l'eau, et dans le cas de puits d'injection, de la méthode de prépurification de l'eau injectée. Dans le cas d'eau injectée, il faudra tenir compte de la viscosité de cette eau car la résistance rencontrée est liée à cette viscosité et à la température de l'eau injectée. La viscosité de l'eau est donnée par :

$$\mu \text{ en } \text{Ns/m}^2 = \left\{ \left(\frac{510}{T+43,1} \right)^{1,502} \right\} (10^{-3}) \quad 0 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$$

(OLSTHOORN, 1982)

On corrige l'effet de la température en ramenant la valeur de μ à celle qu'elle aurait à 10°C :

$$\frac{\mu_{10}}{\mu_T} \approx \frac{T+20}{30} \quad (T \text{ en } ^\circ\text{C})$$

On obtient ce que OLSTHOORN (1982) appelle la résistance due au colmatage (W_c10) (après correction de la température), à partir de l'augmentation de pression ou de niveau (ϕ) par unité de débit d'injection (Q).

La résistance est la différence entre résistance totale et résistance du puits quand il est neuf. Elle est calculée par :

$$W_c10 = \left(\frac{\mu_{10}}{\mu_T} \right) \left(\frac{\phi_0 - \phi_r}{Q} \right) : (\text{m}/(\text{m}^3/\text{h}))$$

La valeur de ϕ_0 est donnée par le niveau d'eau ou la pression dans le puits, et celle de ϕ_r est donnée dans un puits d'observation adjacent ou par le niveau originel de la nappe.

Si la composition de matière en suspension est constante, il se crée une augmentation de résistance par kilogramme de matériau déposé. Si de plus, la concentration est constante, la relation entre résistance au colmatage et volume total injecté sera linéaire.

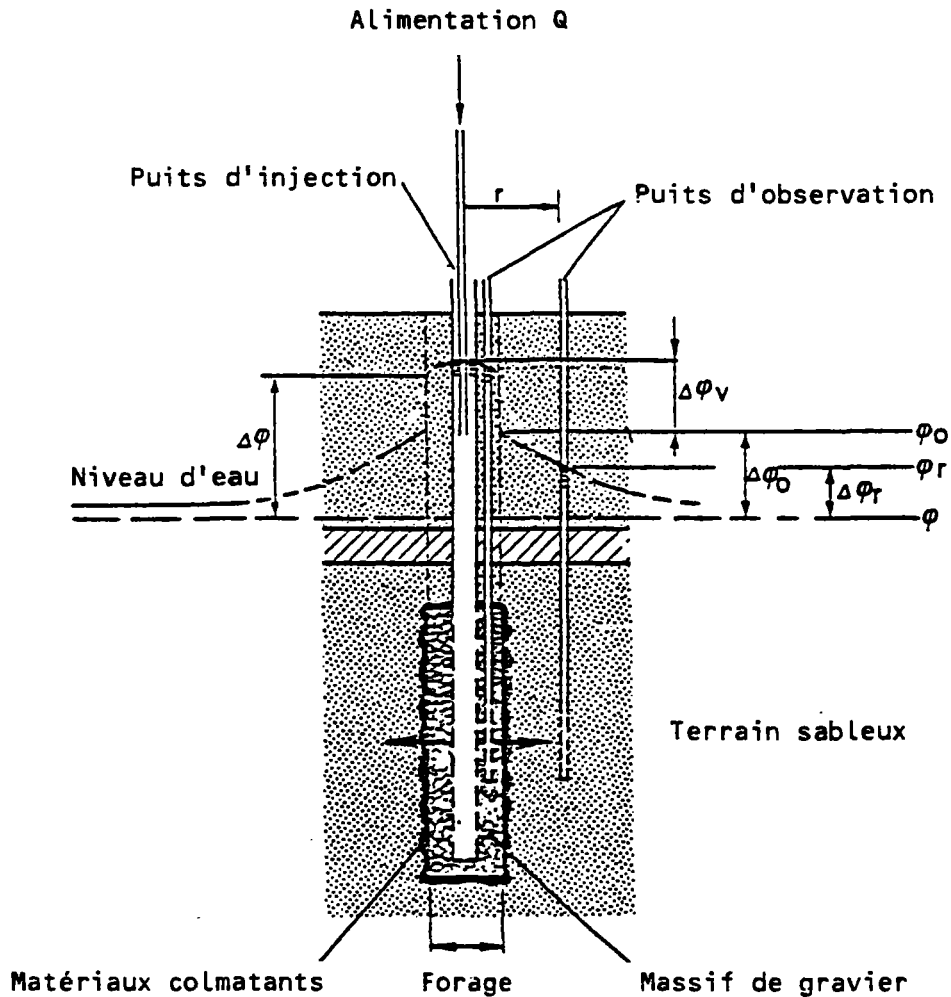


Fig. 1 - Colmatage d'un puits d'injection et augmentation des niveaux d'eau

(d'après OLSTHOORN, 1982)

Selon Olthoorn (1982), il existe une relation entre la vitesse à laquelle la pression d'injection ou le niveau d'eau (ϕ) augmente dans le puits et le débit d'injection Q .

$$\text{Olthoorn écrit : } \frac{d\phi}{dt} \sim Q^2$$

Les eaux de surface peuvent contenir des espèces variées de matière en suspension qui se comporteront différemment en fonction de leurs interactions. Les propriétés de colmatage des suspensions d'hydroxyde de fer par exemple dépendent surtout du pH de l'eau.

Selon OLSTHOORN (1982), il suffit de quelques grammes/m² de matière en suspension pour faire monter de 1 m le niveau d'eau dans le puits pour un débit de recharge de 1 m³/h.

Le massif de gravier entourant les crépines, piège les particules sans augmenter beaucoup la résistance. En général, d'après OLSTHOORN (1982), le gravier permet une réduction importante du taux de colmatage.

Si l'on s'appuie sur les analyses de l'eau d'injection et celles des suspensions qu'elle contient, il ne semble pas possible de prédire le colmatage des puits d'injection, surtout quand la concentration des particules en suspension est très faible.

SNIEGOCKI (1970) examine les taux de colmatage en fonction de la turbidité de l'eau d'injection. Selon cet auteur, des essais effectués montrent que l'injection d'eau ayant une turbidité de 20 mg/l entraîne une perte de capacité spécifique de 40 %, alors que l'injection d'une eau à 5 mg/l ne produit que 3 % de perte de la capacité spécifique.

On peut citer aussi les travaux expérimentaux de RIPLEY et SALEEM (1973). Ces auteurs ont simulé en laboratoire la recharge de nappes avec une eau turbide. Les résultats obtenus montrent qu'il se produit un colmatage de la roche. Le taux de colmatage dans l'échantillon dépend de la distribution de tailles des particules dans l'eau par rapport à la distribution de tailles des pores de la roche.

Le colmatage semble se produire surtout dans la partie supérieure de l'échantillon, mais suivant la taille des particules par rapport à celle des pores, il peut atteindre une profondeur plus importante.

La recharge avec une eau non turbide, aboutit à un colmatage sur quelques centimètres, qui n'est dû qu'à l'activité microbienne. Le colmatage dû à l'eau turbide est différent, et peut atteindre de plus grandes profondeurs.

Le même type d'expérimentation a été conduit par RAHMAN et al. (1969). On simulait la recharge d'un aquifère avec d'une part l'eau du robinet pure, et d'autre part une eau chargée en argile (bentonite et kaolinite).

On mesurait les niveaux piézométriques près du puits de recharge et on échantillonnait l'aquifère sableux à différentes distances du puits.

Les résultats montrent que la présence de sédiments dans l'eau réduit la perméabilité d'environ 45 %, à 20 % suivant la concentration en sédiments. La majorité des sédiments déposés étaient retenus au voisinage de la crépine.

Différents auteurs dont SCHIPPERS et VERDOUW ont, selon OLSTHOORN (1982) mis au point une méthode dite test du filtre-membrane, qui consiste à forcer l'eau sous pression constante (2 bars) à travers une membrane de 47 mm de diamètre et des pores de 0,45 μm . Le résultat est exprimé sous forme de "index de filtre-membrane", en s/ℓ^2 (s = secondes, ℓ = litres). Pour les puits d'injection, on considère que des valeurs de index filtre-membrane < 3 sont bonnes, et que les valeurs $> 10-15$ sont mauvaises.

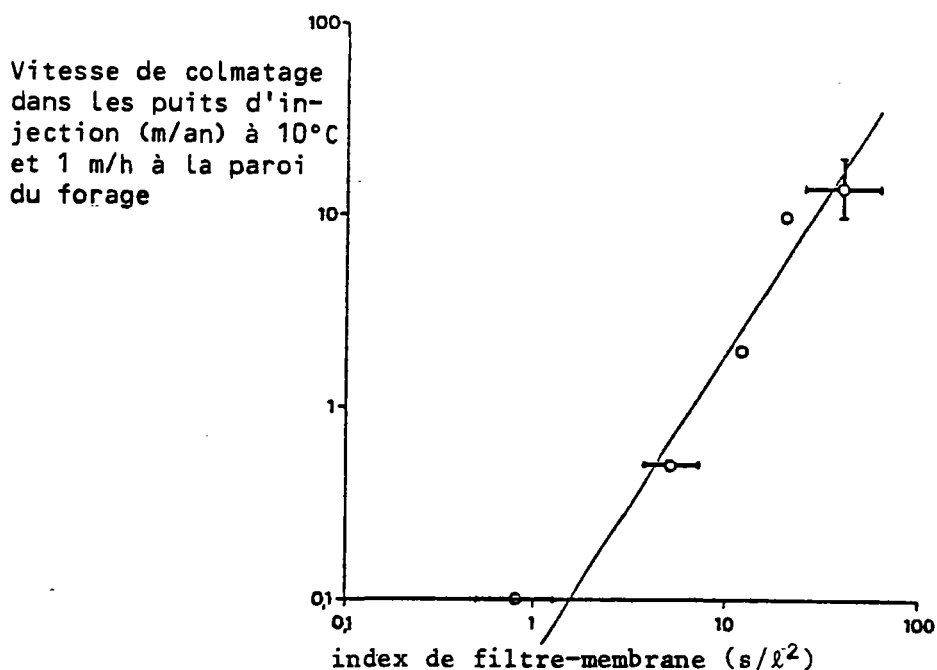


Fig. 2 - Relation entre colmatage du puits d'injection et index de filtre-membrane (OLSTHOORN, 1982)

On peut écrire quelques relations de base permettant l'interprétation de ce type de colmatage (OLSTHOORN, 1982) :

- Si l'on se réfère à la figure 1, on voit que l'augmentation de charge $\Delta\phi$ dans le puits d'injection au-dessus du niveau statique, se divise en $\Delta\phi_0$ dû au sol lui-même et $\Delta\phi_v$ dû au colmatage qui a fait passer la perméabilité sur la distance r_0 à r_v , de k à k_v

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \frac{Q}{2\pi k_v H} \ln\left(\frac{r_v}{r_0}\right) + \frac{Q}{2\pi k H} \ln\left(\frac{R}{r_v}\right) \\ &= \frac{Q}{2\pi k^* H} \ln\left(\frac{r_v}{r_0}\right) + \frac{Q}{2\pi k H} \ln\left(\frac{r_v}{r_0}\right) + \frac{Q}{2\pi k H} \ln\left(\frac{R}{r_v}\right)\end{aligned}$$

- k : perméabilité du sol non colmaté (m/j)
- k_v : colmaté (m/j)
- k^* : $k k_v / (k - k_v)$ (m/j)
- r_0 : rayon du forage (m)
- r_v : distance de la couche colmatée au centre du puits (m)
- R : distance à laquelle la charge de la nappe est constante, c'est une constante hydraulique
- H : hauteur massif de gravier du puits (m).
- Q : débit d'injection m^3/j

- L'élévation de pression d_p (N/m^2) résultant de l'écoulement à travers une couche colmatée d'épaisseur $d\ell$ (m) et de perméabilité intrinsèque k_i (m^2), est exprimée de la manière suivante :

$$d_p = \left(\frac{\mu}{k_i}\right) \left(\frac{Q}{A}\right) d\ell$$

- Q : étant le débit (m^3/s)
- A : surface de filtration en m^2

On peut introduire le concept de résistance :

$$d_w = d \left(\frac{p}{Q\mu}\right) = \left(\frac{\ell}{k_i A}\right) d\ell$$

En introduisant le volume de couche colmatée $d_v = Ad\ell$, et pour un puits : $dv = (2\pi r)H dr$, où r est la distance du centre du puits à l'endroit colmaté, et H la hauteur du massif de gravier :

$$d_w = \left(\frac{d_v}{k_i A^2}\right) = \frac{\ell}{2\pi k_i H} \left(\frac{dr}{r}\right)$$

$W = 0$ si $t = 0$, c'est-à-dire r est égal au rayon du puits r_0

$$W = \frac{\ell}{2\pi k_f H} \ell_n \left(\frac{r}{r_0} \right)$$

Dans le cas d'un dépôt sur le pore (voir figure 3b) r décroît ($r \leq r_0$) :

$$V = \int_0^t Q c dt = \pi H (r_0^2 - r^2)$$

c : concentration des particules en suspension (en m^3 de couche colmatée / m^3 d'eau)

V : volume de couche colmatée.

Si le dépôt se fait dans le pore (fig. 3a), on a $r \geq r_0$:

$$V = \int_0^t Q c dt = \pi H (r^2 - r_0^2)$$

Pour $\phi = \frac{\rho}{\rho_g}$

$$\Delta\phi_v = \frac{(\mu/\rho_g)Q}{2\pi k_f H} \ell_n \left(\ell \pm \frac{V}{\pi r_0^2 H} \right)$$

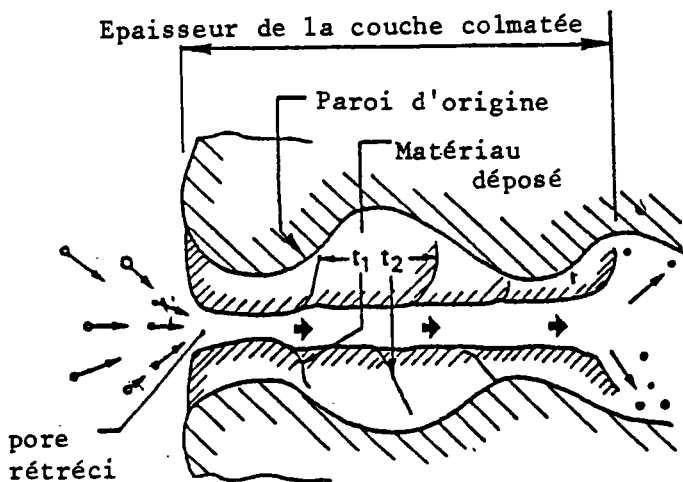


Fig. 3a

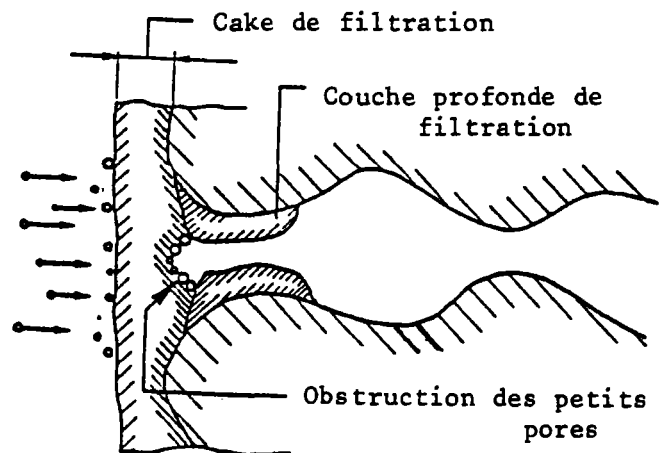


Fig. 3b

Fig. 3 (d'après OLSTHOORN)

- Pour une concentration constante c (m^3 de couche colmatée/ m^3 d'eau), on peut appliquer la relation suivante :

$$\Delta \phi_0 = \left(\frac{\ell}{\rho g} \right) \left(\frac{c \mu}{k_i} \right) v \pi$$

ρ : densité de l'eau

μ : viscosité de l'eau

\bar{u} : volume d'eau total (m) infiltré par m^2 de surface de paroi du puits

v : vitesse d'infiltration à la paroi du puits (m/h).

- Pour une pression constante p ou charge ϕ et un volume total infiltré \bar{u} par m de paroi du puits et avec $v = v_0$ si $t = 0$

$$v = \frac{v_0}{a + \ell} \quad \text{ou} \quad a = \left(\frac{v_0}{p} \right) \frac{c \mu}{k_i} \pi$$

ℓ : épaisseur de la couche colmatée

v : débit à la paroi du forage.

p : pression

Toutes les formules énoncées peuvent être utilisées pour décrire le colmatage par les matières en suspension.

Les particules en suspension peuvent avoir aussi leur origine dans le délitage de la roche par l'eau en contact avec elle (SIX, 1962). SIX a montré expérimentalement en laboratoire que l'effet de colmatage était influencé par la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau, et la viscosité dynamique du liquide.

3.2. Colmatage des puits dû à des bulles de gaz

Des bulles de gaz ou d'air de diamètres compris entre 1 et 10 mm, circulant à des vitesses de 0,3 à 0,4 m/s, dans l'eau peuvent atteindre les crépines, pénétrer dans les fentes des crépines et le massif de gravier puis bloquer les pores de la roche.

L'entraînement d'air s'est révélé être la cause de colmatage la plus importante lors d'essais d'injection dans la région de Grand Prairie dans l'Arkansas, qui est une plaine alluviale formée de dépôts quaternaires. La diminution de perméabilité autour du puits de recharge était de 50 % en 5 heures (SNIEGOCKI, 1970).

Quand la rampe d'injection se termine au fond du puits, les bulles avec leur vitesse constante, peuvent colmater toute la crépine. Si elle s'arrête au-dessus de la crépine, elles ne pourront atteindre la partie inférieure de la crépine. Il faut donc réduire le débit d'injection pour stabiliser le colmatage. Le colmatage par bulles de gaz est caractérisé par cet équilibre et la rapidité avec laquelle le puits se colmate après être mis en service.

Les bulles de gaz peuvent résulter, soit d'une chute libre de l'eau dans le puits, soit de fuites dans les conduites là où la pression est inférieure à la pression atmosphérique, ou de la sursaturation de certains gaz dissous.

La chute libre à l'intérieur de la rampe d'injection peut être évitée en restreignant le bout du tubage d'injection.

La résistance nécessaire en m d'eau par mètre de tubage d'injection sera :

$$f = h/L$$

h : distance sommet du tubage au niveau nappe

L : partie verticale du tubage.

Dans les conduites, il existe une pression relativement faible sous les robinets.

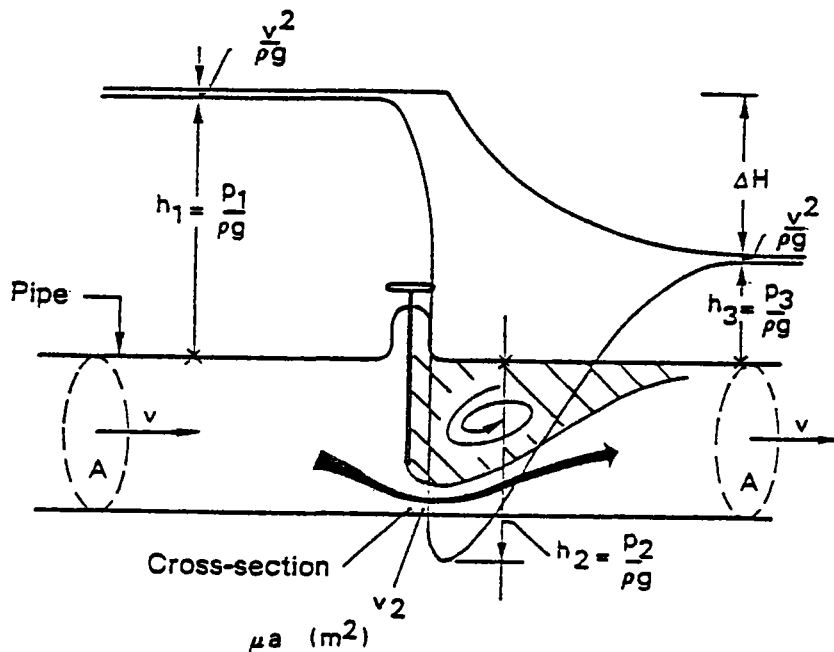


Fig. 4 (d'après OLSTHOORN, 1982)

Ceci peut être évité en maintenant un niveau de haute pression sous le robinet.

C'est à un phénomène de ce genre qu'ont été imputées les importantes réductions de perméabilité observées lors de la recharge d'une nappe, en Grande Bretagne (PONTIN, 1978). Le colmatage était accompagné de l'entrée progressive d'air dans les pores de l'aquifère jusqu'à 150 m du puits de recharge et d'une réduction de la transmissivité. Le colmatage était dû au fait que l'air était siphonné dans le puits de recharge et créait un système d'entraînement d'air.

La troisième cause de colmatage par air, c'est-à-dire la sursaturation peut être évitée en contrôlant la température de l'eau injectée. L'augmentation de température diminue la solubilité des gaz, mais de 2 % seulement par °C. L'effet de température peut être compensé par une augmentation de la pression. Une augmentation de pression de 1 m d'eau dans le tubage augmente la solubilité de 7 % et suffit à compenser une augmentation de température de 3,5°C.

Le problème de solubilité est important lorsque l'on réinjecte de l'eau souterraine qui peut contenir du méthane. Il est donc conseillé de dégazer avant injection ou de maintenir une pression élevée dans les tubages.

3.3. Colmatage des puits dû aux bactéries

Ce type de colmatage est souvent signalé dans les rapports concernant l'injection d'eau. J. APPERT (1959) passe en revue les principaux types de bactéries impliquées dans ces phénomènes. Les plus fréquemment rencontrées sont les réducteurs de sulfates. Elles produisent l'hydrogène sulfuré par réduction des sulfates à l'aide d'hydrogène emprunté à des sources diverses (sels d'acides, alcools, etc.).

Ces organismes sont anaérobies ; le développement de ces bactéries même dans un milieu peu réducteur, peut faire tomber le potentiel d'oxydo-réduction à -300 mV. Ces bactéries se développent bien à pH neutre.

Dans l'eau pure, on dénombre 1000 bactéries/millilitre. En pratique, dans l'eau de recharge, elles n'occasionnent pas toujours le colmatage. Le colmatage se produit quand les bactéries se multiplient. Si on suppose un temps de reproduction de 8 heures, une seule bactérie peut en 12 jours produire 10^{16} bactéries.

L'augmentation du nombre des bactéries peut être due à la présence de matière organique qu'elles peuvent décomposer. Si l'eau injectée contient peu de matière organique, le colmatage se stabilisera. Les bactéries sont mieux alimentées en zone peu profonde sur les fentes des crépines et les premiers centimètres du gravier d'où un colmatage possible important des fentes.

Comme la matière organique assimilable de l'eau d'injection, est le facteur primordial dans ce cas, les standards chimiques de qualité qui ne donnent pas cette quantité de matière organique assimilable ont peu d'intérêt.

Une des caractéristiques du colmatage dû aux bactéries est d'être peu profond. La vitesse de colmatage est faible au début et augmente au bout de quelques jours pour atteindre un équilibre. Quand le puits est mis hors circuit pendant quelques semaines, on note une diminution de la résistance.

Pour éviter ce type de colmatage, on injecte 0,2 à 2 mg de Cl par litre d'eau. Le chlore est consommé rapidement et les bactéries peuvent se redévelopper à une certaine profondeur. Il est plus prudent de mettre une dose importante de chlore (100 mg/l) périodiquement, que d'injecter en continu de faibles concentrations.

On peut citer comme exemple le colmatage observé dans les puits utilisés pour recharger la nappe, à partir des eaux du lac Kinnereth en Israël. Dans ce pays, il y avait en 1966/67, d'après REBHUN et SCHWARTZ (1968), 100 millions de m³ d'eau injectés dans 100 puits interconnectés. L'eau de recharge provenant du lac Kinnereth était au cours du trajet, préchlorée, chlorée, et arrivait au puits d'injection avec la qualité d'une eau de boisson. Malgré cela on observait un colmatage graduel des puits d'injection, tandis que l'eau repompée indiquait une dégradation de la qualité. Si l'on utilisait une autre eau pour la recharge, on n'observait pas ces phénomènes.

Différentes recherches ont été faites pour déterminer les causes de ce colmatage. L'effet de la recharge sur les propriétés hydrauliques, a montré qu'il n'y avait pas accumulation du colmatage pendant les périodes successives de recharge, et que le colmatage était limité à la proximité du puits.

A partir d'expériences de laboratoire et sur le terrain, on a pu démontrer que le colmatage était directement lié à l'eau du lac Kinnereth. L'eau de recharge du lac contient de la matière organique en suspension, et sous forme

colloïdale, dont le plancton, qui s'accumule près du puits. La teneur élevée en coliformes dans l'eau repompée était due à la multiplication bactérienne sur la matière organique quand il y avait un arrêt de longue durée entre la recharge et le pompage. Quand la recharge cessait, le Cl disparaissait, et la décomposition de la matière organique accumulée se produisait en même temps que la croissance de bactéries.

Pour minimiser ces problèmes, on évite les pauses longues, on pompe des petits volumes pour nettoyer et redévelopper. L'eau pompée lors des premières heures est rejetée et du Cl est ajouté.

Un autre exemple est celui du colmatage de puits d'exploitation aux Pays-Bas. Ce colmatage se produit principalement dans les puits qui prennent de l'eau anaérobie dans la nappe peu profonde au voisinage de la rivière (Van BEEK, KOOPER, 1980). Ces puits ont pu être régénérés facilement par l'hypochlorite de sodium, ce qui rendait improbable la présence de microorganismes oxydant Fe et Mn, comme on l'avait supposé. Les analyses et recherches effectuées ont montré qu'il s'agissait plutôt de colmatage dû à des réactions chimiques.

Le colmatage biologique est très fréquent dans les recharges de nappe par lagunage avec des eaux usées, mais ce n'est pas l'objet de ce rapport.

3.4. Colmatage dû à la formation de précipités dans les puits

C'est le cas du colmatage observé dans les puits des Pays-Bas, auxquels on fait allusion au paragraphe précédent. La solution d'hypochlorite ajoutée a été utilisée pour oxyder les sulfures de fer et la matière organique. De plus, sous l'action de l'acide formé par ces réactions d'oxydation, le CO_3Ca se dissout. Une partie du fer libéré lors de l'oxydation des sulfures de fer précipite sous forme de carbonate de fer et ou d'hydroxyde de fer.

OLSTHOORN (1982) cite le cas d'un puits à La Hague, dans lequel le Cl ajouté juste avant le puits, a entraîné la précipitation du dioxyde de manganèse. Le Mn était présent en tant qu'impureté et n'avait pas été éliminé. Le problème a été résolu quand le Cl a été ajouté plus tôt dans la chaîne de purification. Il vaut mieux que la dernière étape de purification soit la filtration. Il peut se produire des réactions entre eau souterraine et eau injectée,

en particulier si l'eau de la nappe contient du fer et l'eau injectée de l'oxygène, mais en fait ceci est extrêmement rare. Une réaction suite à un contact prolongé n'est concevable qu'en milieu fissuré ; en milieu poreux, il a été montré qu'un colmatage dû à ce type de réaction est peu fréquent. Il suffit alors de nettoyer le puits avec des jets horizontaux sous forte pression.

L'hypothèse de tels processus a cependant été retenue par GIRAUD et NEU (1971) qui ont étudié les deux cas limites de l'interaction due à la dispersion entre eau injectée et eau de la formation, et l'interaction entre eau d'injection et les sels cristallisés issus de l'eau de la formation. Les sels insolubles issus de l'interaction entre l'eau injectée et les sels cristallisés peuvent se trouver aux étranglements des pores, et entraîner une baisse de la perméabilité.

Il sera donc nécessaire de traiter l'eau injectée, et aussi de bien connaître la composition de l'eau de la formation et de l'eau injectée avant toute injection.

3.5. Colmatage dû à l'interaction eau injectée-roche

Le colmatage peut être dû au gonflement et à la dispersion des argiles présentes dans les roches. Ce phénomène a été identifié de longue date par les pétroliers dans les grès. De nombreux auteurs (GRAY et REX (1966), MUNGAN (1965), JONES (1964), SIX (1962) ont mis en évidence une relation entre baisse de perméabilité et argiles gonflantes.

On utilise souvent le SAR (sodium-adsorption-ratio) de l'eau comme mesure représentant le risque de gonflement et de dispersion des particules argileuses : selon OLSTHOORN (1982), plus le SAR de l'eau de la formation est grand (> 3 à 5) plus le risque est grand. Le SAR de l'eau injectée a moins d'importance. Le colmatage peut être réduit de 80 à 90 % par une injection préliminaire de plusieurs m³ d'eau à concentration élevée en CaCl₂. Les résultats d'études réalisées à ce sujet par JONES sont illustrés par les figures suivantes (fig. 5 et 6).

KHILAR (1983) a construit un modèle physique pour étudier le colmatage de grès par les argiles dispersées. Le même auteur présente un modèle mathématique basé sur ce mécanisme.

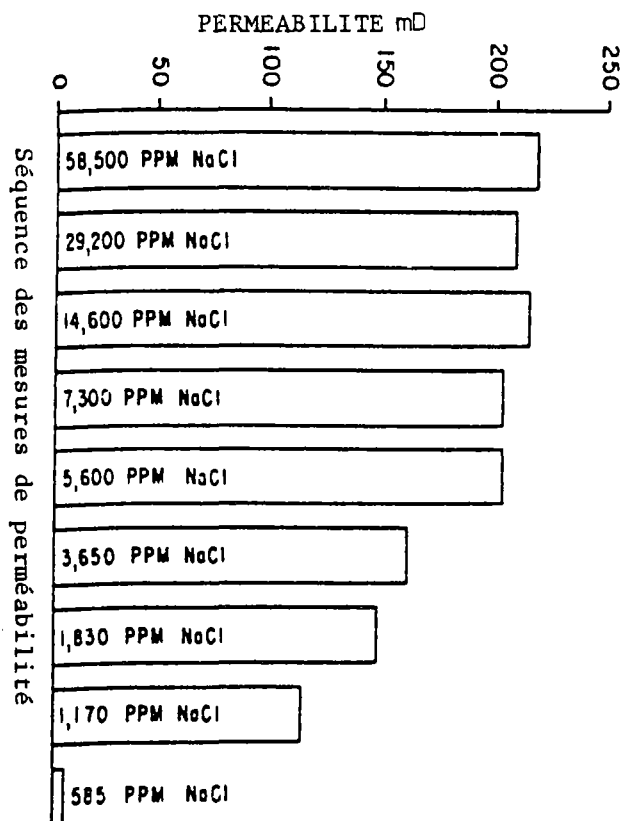


Fig. 5 - Effet de la diminution de concentration du ClNa sur la perméabilité du grès de Berea

(d'après JONES, 1964)

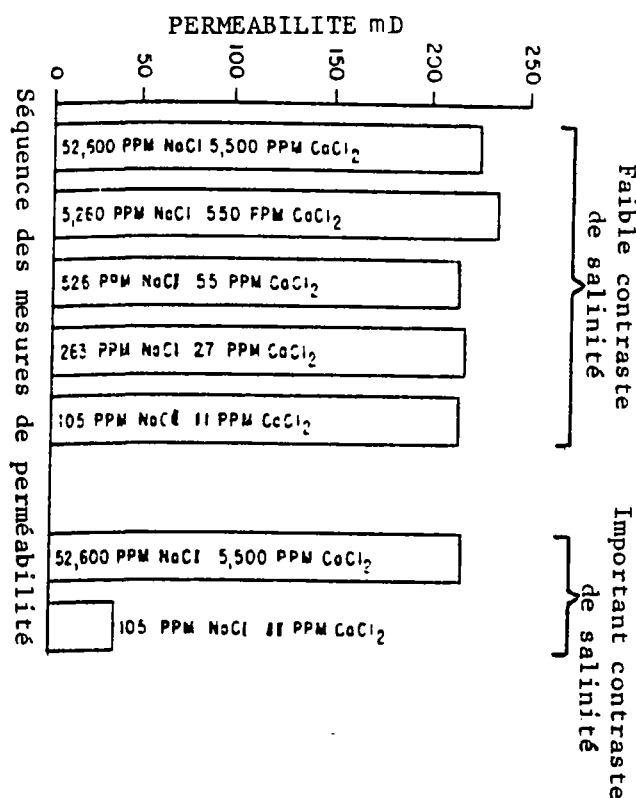


Fig. 6 - Prévention du blocage de l'argile par les sels de Ca et contrôle du contraste de salinité

Dans le modèle physique, les particules argileuses ne sont dispersées que quand la concentration en sel tombe au-dessous d'une concentration critique. Ces particules colloïdales vont boucher les pores. Le modèle mathématique développé à partir du modèle physique renferme deux paramètres des équations d'équilibre pour la libération et la rétention des particules argileuses.

Ce modèle permet de prévoir la diminution de perméabilité en fonction du temps, de la longueur de carotte, du débit et de la température.

4. DECOLMATAGE DES PUIITS

Le décolmatage des puits se fait par des méthodes mécaniques et chimiques.

Dans un puits d'injection, où l'eau n'a pas été prépurifiée, on redéveloppe à intervalles fréquents, c'est-à-dire une fois par jour à une fois par mois. Si le colmatage se produit lentement, l'intervalle est de 6 mois à 5 ans. Il faut alors un traitement plus efficace qu'un pompage-balayage. Le décolmatage intensif exige entre une demi et deux journées de travail.

4.1. Méthodes mécaniques

Par ordre d'importance pour les problèmes d'exploitation, ces méthodes sont pompage-balayage, injection d'air comprimé, et pompage pompage-balayage sur une section, balayage par aspersion à haute pression, pompage et curage, brossage, vibration haute fréquence, utilisation d'explosifs dans le puits, fracturation hydraulique.

4.1.1. Balayage par pompage

Cette méthode qui est la plus commune permet d'éliminer selon OLSTHOORN (1982) les 3/4 du colmatage. Le tableau 1 suivant présente des exemples de résultats obtenus par cette méthode, et qui sont très satisfaisants.

OLSTHOORN (1982) relate que le fait de pomper deux minutes ou une journée entière n'entraîne pas de différence du pourcentage de décolmatage.

Le refoulement de la pompe de balayage, a peu d'influence car même en augmentant cinq fois sa capacité, on ne fait passer le pourcentage décolmaté que de 75 à 85 %. Dans tous les cas, le débit à la paroi du puits est limité à quelques mètres/heure, ce qui est insuffisant pour un nettoyage parfait.

Le pompage intermittent semble n'avoir aucun résultat dans la pratique.

Puits ou essai de modélisation	v_i ⁵⁾ (m/h)	Q_p/Q_i ⁶⁾ (-)	Pourcentage décolmaté
Rebhun & Schwarz (coarse sand)	13	1)	40
Well GAT 24 (Final Report Israel)	13	2)	61
Hoogoven well	11	0)	72
The Hague	1.2	0)	73
Well GAT 21	37	2)	75
Hoogoven well	1.1	0)	76
Castricum	0.6	0)	76
Rebhun & Schwarz (fine sand)	13	1)	82
Well GAT 9	11	2)	83
Castricum	0.6	0)	85
Bichara (constant pressure drop, decreasing flowrate)	7.1	3)	89
Bichara	7.1	3)	92
Well GAT 6	8	2)	95
Veccioli test 7	0.6	4)	96
Moyenne			80

Tableau 1 (d'après OLSTHOORN, 1982)

- 0) Calculé à partir des mesures originales.
- 1) Calculé à partir des observations de REBHUN et SCHWARZ (1968).
- 2) Calculé à partir des données du rapport final Israël (1969).
- 3) Calculé à partir des données de thèse de BICHARA (1974).
- 4) Essai de 33 jours. Vitesse infiltration passe de 1,1 à 0,6 m/j/an au bout de 19 jours (VECCHIOLI, 1972).
- 5) v_i = vitesse d'infiltration calculée à la paroi du puits.
- 6) Noter le faible débit de la pompe par rapport au débit d'infiltration (Q_p/Q_i).

4.1.2. Injection d'air comprimé

L'air comprimé se comporte remarquablement bien pour le décolmatage des puits d'injection, selon OLSTHOORN (1982). Cet avis ne semble pas être partagé par BIZE et al. (1972).

L'injection d'air comprimé crée à une certaine profondeur un pompage par "air lift". Si le forage est fermé, l'air comprimé va pousser le niveau d'eau vers le bas et causer l'infiltration pendant un temps court. L'ouverture du robinet ensuite, entraîne une brusque chute de pression et une remontée rapide du niveau d'eau dans le puits et un débit d'extraction important pendant quelques secondes.

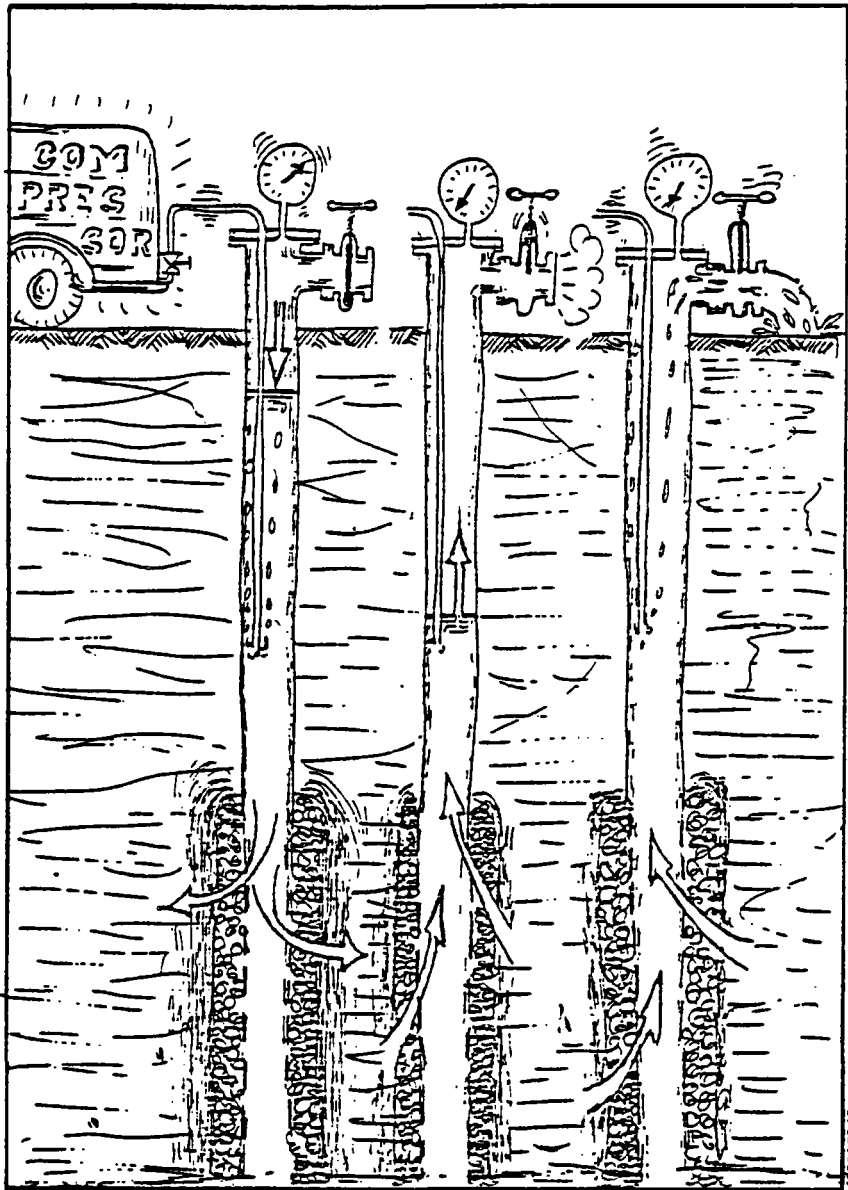


Fig. 7 (d'après OLSTHOORN, 1982)

Cette méthode est simple, précise et peu coûteuse.

Le bref débit dû à la remontée rapide du niveau d'eau après ouverture du robinet, peut être évalué ainsi :

$$Q = \Delta \phi / \left[W_c + \frac{1}{4\pi KH} \ln \left(\frac{2,25kHt}{Sr_0^2} \right) \right]$$

Q : débit en m³/s

k : perméabilité du sol, m/s

H : hauteur du massif de graviers, m
S : coefficient d'emmagasinement
 r_0 : rayon de forage, m
 $\Delta\phi$: rabattement maximal du niveau dans le puits, m
 W_C : résistance au colmatage dans le puits ($m/m^3/s$)

4.1.3. Pompage dans une section

Un appareillage limité à une section permet d'assurer une vitesse d'écoulement élevée, localement, c'est-à-dire dans le massif de gravier, avec un impact limité. Mais étant donné le court-circuitage important qui se produit dans le massif de gravier, il ne reste qu'une partie de la vitesse à la paroi du forage. Ceci signifie que cette méthode n'est valable que si le massif de gravier est très colmaté. Cette forme de colmatage se rencontre principalement quand il y a beaucoup de bactéries.

4.1.4. Jet d'eau sous haute pression

Cette méthode consiste à injecter de l'eau sous forte pression. Le matériau enlevé est repompé. Malgré la pression importante de 80 bars, le jet ne pénètre pas plus de quelques centimètres à l'intérieur du massif de gravier.

Cette méthode convient donc plutôt pour les puits dans lesquels, ce sont les fentes des crépines qui sont colmatées. Elle a été aussi utilisée avec succès pour injecter avec précision les produits chimiques.

4.1.5. Pistonage et puisage

Il s'agit du mouvement en avant et arrière, d'eau dans la formation, dû au déplacement alterné d'un piston dans la crépine. Si le piston est remplacé par un tube à clapet, le mouvement alterné aura en même temps un effet de pompage, tandis que le matériau récupéré pendant le curage sera éliminé. Cette dernière solution bien que préférable à la première, ne présente cependant aucun avantage sur la méthode par injection d'air (OLSTHOORN, 1982).

4.1.6. Brossage

N'est valable que pour nettoyer l'intérieur des tuyaux de refoulement et des fentes crépinées.

4.2. Méthodes chimiques

Dans les cas où le matériau colmatant adhère fortement au support, et que les moyens mécaniques ne suffisent pas à le décoller, on renforce le décolmatage en introduisant des produits chimiques avant d'utiliser un moyen mécanique.

Parmi les produits chimiques les plus fréquemment utilisés, on trouve :

4.2.1. Le chlore

Le chlore et les agents à base de chlore sont utilisés pour détruire les dépôts organiques et tuer les bactéries. Les concentrations introduites vont de plusieurs centaines à plusieurs milliers de milligrammes par litre de chlore. La quantité de chlore doit permettre d'atteindre 5 dm au-delà du massif de gravier. Si le colmatage n'est pas uniquement le fait de composés organiques, il faut un double traitement, au chlore pour éliminer les produits organiques, puis à l'acide pour les particules minérales.

Pour des raisons de sécurité, il est préférable d'injecter le chlore dans l'eau de recharge. L'eau de javel ou l'hypochlorite de calcium (grains) sont injectés au fond du puits à l'aide d'un tuyau. Les produits chimiques sont ensuite transportés avec l'eau dans le massif de gravier et la formation.

4.2.2. Les acides

L'acide utilisé en général, est l'acide chlorhydrique, ou l'acide sulfamique $\text{HSO}_3 \text{NH}_2$ (grains).

On utilise un acide pour enlever les dépôts d'hydroxydes de fer et d'aluminium.

La concentration d'acide doit être telle que le pH de l'eau acidifiée soit égal ou inférieur à zéro. La quantité d'acide doit être suffisante pour atteindre 20 à 50 m au-delà de la paroi du puits. Cette profondeur d'investigation est suffisante dans les formations de sable fin et pour les débits de plusieurs mètres/heure à la paroi du forage, ce qui limite la consommation de produits chimiques. Dans les formations contenant du calcaire, l'acide engendre des bulles de CO₂, mais elles sont éliminées avec l'eau pompée, sans laisser de colmatage résiduel. Si les crépines ou la tuyauterie est en métal, il est recommandé d'utiliser des inhibiteurs qui protègent.

4.2.3. Les polyphosphates

Les polyphosphates sont utilisés pour éliminer les particules d'argile, les boues, silts et bulles d'air.

Les polyphosphates agissent en complexant les ions métalliques, en dispersant l'argile et les particules d'hydroxyde, en empêchant la formation de précipités en renforçant l'action des détergents par abaissement de la concentration critique de micelles, en cassant et émulsifiant les graisses et les alcanes.

Les polyphosphates n'agissent que si l'eau est agitée. Ceci peut être obtenu par injection d'air comprimé. Le traitement doit être rejeté plusieurs fois pour obtenir l'effet maximum.

On ne connaît pas la concentration optimale des polyphosphates ; on essaie d'en dissoudre le plus possible, bien que la dissolution ne soit pas facile.

Etant donné que les particules argileuses peuvent pénétrer assez profondément dans le milieu poreux, il faut traiter par les polyphosphates sur une profondeur de 50 cm à 1 m.

En général, on ajoute l'eau de javel ou l'hypochlorite de Ca aux polyphosphates de manière à éliminer la matière organique éventuellement présente.

4.3. Choix du produit chimique

Le choix du produit chimique à utiliser, sera fonction de la nature du matériau colmatant. S'il s'agit d'un mélange de produits organiques et minéraux, différents traitements seront nécessaires, par exemple polyphosphates et chlore, puis traitement à l'acide. S'il s'agit d'un dépôt bactérien, un traitement au chlore sera suffisant. La détermination de la cause du colmatage ne peut être faite qu'indirectement d'après différentes indications telles que le développement du colmatage, l'origine, la composition de l'eau injectée, la méthode de prépurification employée, la teneur en suspensions de l'eau injectée, la composition du sol.

L'étude réalisée par BURGEAP pour le compte de l'AFME n'est pas très optimiste quant aux résultats des opérations de décolmatage pratiquées en France sur les forages qu'ils ont analysés (tableau 2). Il semble que les mauvais résultats obtenus soient le fait que les traitements chimiques ont été pratiqués à l'aveuglette, sans que la nature réelle du produit colmatant soit connue.

4.4. Programmation du décolmatage

De nombreux systèmes d'injection ont un dispositif pompage-balayage installé en permanence, dont le coût est compris dans le coût total du puits. Les coûts de décolmatage sont donc limités aux coûts entraînés par un nettoyage intensif du puits. Le point de départ de l'optimisation est le choix d'un critère de décolmatage, qui permette de dire à quel moment il est nécessaire d'intervenir. D'après OLSTHOORN (1982), il est préférable de prendre comme critère, l'augmentation de résistance depuis le colmatage précédent, plutôt que l'obtention de la pression d'injection maximale admissible.

Une fois connu le temps au bout duquel on atteint ce critère, on peut déterminer la fréquence de décolmatage.

Cette fréquence de décolmatage rf_0 dépendra de facteurs tels que la taille du puits, la formation, et le débit, la composition de l'eau, et le traitement qu'a subi l'eau avant injection.

N° fiche	Date de création	Décoimatage		NATURE [1 DOSES (en l) CLH : Acide chlorhydrique ASFH : Acide sulfamique HMP : Hexametaphosphate HYP : Hypochlorite	Débits spécifiques m³/h/m				Gain en % du Q/s d'origine
		1er (années après création)	suivants (après décoimatage précédent)		Q/S original	Avant	Après	Gain	
1	1948	10		Inconnu	5,1				?
			22	HYP 0,2 + HMP 0,1					?
6	1953	10		CLH 3,5) CLH 4)	5,4	1,8	5,1	3,3	61 %
				HMP 0,2 + ASFH 0,6		5,1	13,7	8,6	159 %
7	1963	17							
9	1967	8		Inconnu (*)	2		1,12		
10	1964	5		HMP 0,15 + CLH 0,4	1,86	1,82	1,97	0,15	8 %
			4	CLH ? 2 + HMP 0,1					
11	1947	31		ASFH 0,8 + HMP 0,4	11,1	?	8,5		
13	1962	5		HMP dose inconnue	17,3	4,6	5,2	0,6	3,4 %
			2	HMP " "		2,3	2,8	0,5	2,8 %
			2	HMP " "					
14	1953	11		Inconnu	15,8	?	6,5		
			1	HMP (Lavnite) dose inconnue		1,9	3,7	1,8	11 %
			3	HMP dose inconnue		2,1	3,7	1,6	10 %
			3	HMP + CLH doses inconnues		1,8	3,0	1,2	7,6 %
			3	HCL + HMP " "		1,8	2,3	0,5	3 %
15	1953	12		HMP Lavnite dose ?	15,6	5,3	6,4	1,1	7 %
			4	HMP + CLH					
			6	HYP + CLH		1,85	2,44	0,6	3,8 %
16	1963	4		HMP (Lavnite)	14,1	5,4	7,3	1,9	13,5 %
			2	HMP		3,1	4,7	1,6	11,3 %
			2	HMP + CLH ?					
			4	HCL 3 + HYP + HCL 6		0,56	2,2	1,6	11,3 %
			4	HCL 9 dans 3 forages périphériques		1,4	1,8	0,4	2,8 %
17	1934	16		HCL ?	6,6				
			16	HCL ?					
			6	HMP (Giltex)					
			1	HMP sans résultat					0 %
18	1955	18		HMP (Giltex)	9,7				
19	1957	16		HMP (Giltex)	12,1	6,8 ?	8,8 ?	2	16,5 %
			9	HMP		3,7 ?	5,9 ?	2,2	18 %
22	1934	9		HCL ?	6,7				
			7	HCL ?					
23	1934	16		HCL ? Sans résultat					0 %
			4	HMP					
			17	HCL ? Sans résultat					0 %
25	1967	3		HMP	15,2	6,7	11,3 ?	4,6	30 %
			4	HMP (Giltex)		7,2	10,4	3,2	21 %
			5	HMP		6,4	12,1	5,7	37 %
			3	HMP		7,4	9,5	2,1	13,8 %
27	1976	5		Merli Rapid 2,4	19,1	4,6	8,4	3,8	19,8 %
28	1976	6		Lancaoe et Merli Rapid	15,4		5,9		
30	1968	15		ASFH 0,05 + HMP 0,1	10				
34	1933	28		HMP (Lavnite)	22,1		5,8		
			4	Traitement inconnu		24,6	6,8		-
			7	Traitement inconnu			6,9		
35	1956	6		Traitement inconnu	8,6	4,1	8,4	4,3	50 %
			14	ASFH 0,6					
36	1956	6		Traitement inconnu	18		4,7		
37	1965	13		CLH 6 + HMP 0,2 + HYP 1	15,3		8,78		
38	1965	11		ASFH 0,6	8,5				
47	1959	12		HMP (Giltex) 1 enchainé avec	17,8	5,2	3,7		-
				CLH 0,7 puis CLH 2			5,5	0,3	1,6 %
49	1956	21		HMP 0,2 puis CLH 1,5	4,6	1,8	2,4	0,6	13 %

NOTE : (*) l'apparition de boues rouges fut la raison du décoimatage entrepris.

Tableau 2 d'après BURGEAP pour AFME

OLSTHOORN (1982) donne les valeurs suivantes à titre indicatif :

<u>Essai de prépurification</u>	<u>Fréquence de redéveloppement</u> rf ₀ /an	<u>Coûts de purification</u> (fl/m ³) *
1. Chlorination	52	0,02
2. Surchloration + filtration sur sable	12	0,05
3. Surchloration + coagulation + filtre sur sable	4	0,11
4. Surchloration + coagulation + filtration + coagulation secondaire + filtration sur sable	0,5	0,25
5. Surchloration + coagulation + filtration sur sable + filtration sur charbon actif + hyper-filtration	0,1	0,50

* fl = guilders hollandais = 0,4 dollars 1982.

Ceci est valable avec une certaine section A₀ (m²) de puits et un débit donné Q₀.

Pour un autre débit, Q et une taille A, on peut calculer la fréquence de décolmatage par :

$$r_f = \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 r_{f_0}$$

$$v = Q/A$$

$$v_0 = Q_0/A_0$$

flux à la paroi du puits

$$A = 2\pi r H$$

$$A_0 = 2\pi r_0 H_0$$

H et H₀ : hauteurs des massifs de graviers

5. COLMATAGE DES BERGES PAR LES PARTICULES EN SUSPENSION

Ainsi que le font remarquer M. BONNET et J. MARGAT (1976), une part notable des quantités d'eau souterraine exploitées en France est prélevée dans des aquifères subordonnés à des cours d'eau, dont les aquifères alluviaux. Aussi l'évaluation correcte des ressources en eau de ces aquifères revêt-elle une importance particulière. La réalimentation de la nappe par la rivière peut être limitée notamment si la rivière est colmatée : c'est pourquoi différents auteurs se sont penchés sur ce problème.

BANSCHER (1976) a étudié l'influence des facteurs suivants sur le développement du colmatage des berges : temps, vitesse de filtration, flux, vitesse de pores, teneur en suspensions.

Pour connaître les paramètres à entrer dans les modèles, des mesures in situ ont été réalisées pendant des années.

5.1. Etude expérimentale du colmatage

On essaie tout d'abord de quantifier le colmatage. La diminution de perméabilité consécutive au colmatage d'un milieu poreux n'a lieu que sur une épaisseur donnée, qui est appelée épaisseur de colmatage d . Cette épaisseur colmatée d , a un coefficient de perméabilité k' . On appelle résistance à l'infiltration w , le rapport qui permet de quantifier le colmatage (BANSCHER, 1976) :

$$w = \frac{d}{k'}$$

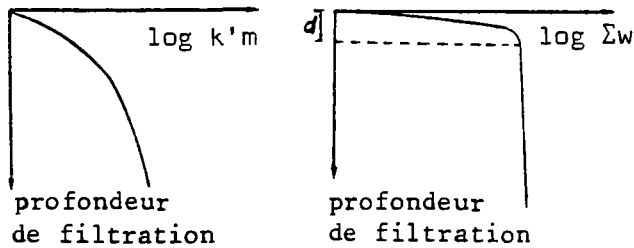
Notons que BERAUD et CLOUET D'ORVAL (1976) utilisent le même rapport dénommé par eux $C = \frac{bc}{kc}$ pour décrire le colmatage des berges de rivière.

Selon BANSCHER (1976), on peut écrire :

$$w = \frac{d}{k'} = \frac{\Delta h}{v_f}$$

Δh : perte de charge

v_f : vitesse de filtration



d'après BANSCHER
(1976)

à gauche : perméabilité moyenne $k'm$ en fonction de la profondeur de filtration.
à droite : résistance à l'infiltration w en fonction de la profondeur de filtration.
 d : épaisseur de colmatage

- BANSCHER (1976) a étudié le développement du colmatage en fonction du temps.

Les études conduites avec l'eau de l'Elbe et un sable grossier montrent que la pression diminue de façon exponentielle avec le temps.

On peut exprimer ceci par :

$$w = C.t^\alpha$$

C : coefficient de colmatage

t : temps

α : exposant du colmatage.

On constate que dans le domaine de vitesses comprises entre 0,017 et 0,3 cm/mn, la résistance à l'infiltration est très peu influencée par la vitesse ; par contre pour des vitesses supérieures à 0,3 cm/mn, il y a une augmentation de résistance qui peut être exprimée par :

$$C = C_0 e^{\alpha v f}$$

La figure 8 ci-après montre que le colmatage se fait en deux phases : la première phase limitée par un coude dans la courbe concerne le colmatage interne, dans la deuxième phase, les courbes se rejoignent pour tendre vers une condition limite caractéristique du matériau filtrant.

La masse colmatée dans le support poreux se comporte comme un matériau plastique.

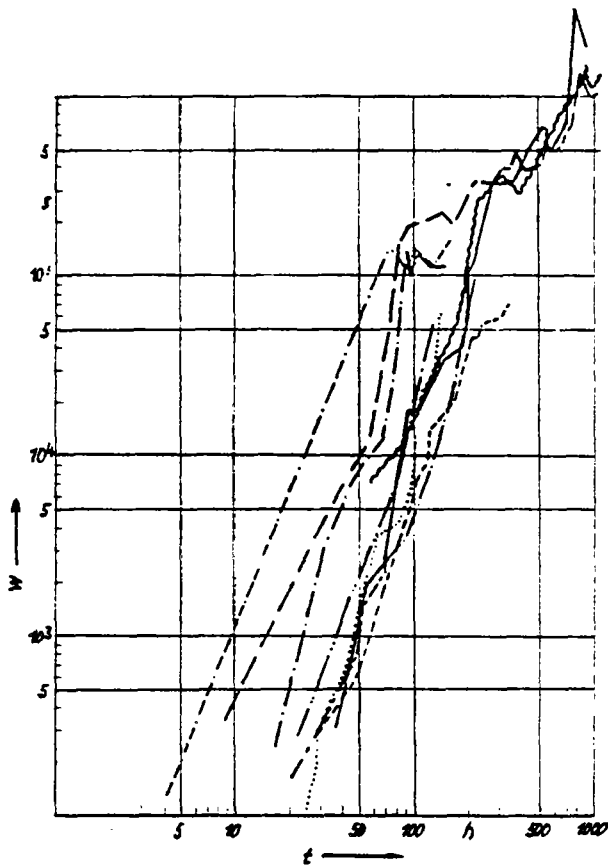


Fig. 8
 Développement du colmatage
 en fonction du temps
 (BANSCHER, 1976)

-----	$v_f = 1,12 \text{ cm/min}$	$(1,86 \cdot 10^{-4} \text{ m/s})$
-----	$v_f = 0,60 \text{ cm/min}$	$(1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/s})$
-----	$v_f = 0,56 \text{ cm/min}$	$(9,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s})$
.....	$v_f = 0,28 \text{ cm/min}$	$(4,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s})$
-----	$v_f = 0,20 \text{ cm/min}$	$(3,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s})$
-----	$v_f = 0,14 \text{ cm/min}$	$(2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s})$
-----	$v_f = 0,07 \text{ cm/min}$	$(1,16 \cdot 10^{-5} \text{ m/s})$
.....	$v_f = 0,0235 \text{ cm/min}$	$(3,9 \cdot 10^{-6} \text{ m/s})$
-----	$v_f = 0,017 \text{ cm/min}$	$(2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s})$

Il y a interaction entre pression due à l'écoulement et section des pores ; cette interaction peut être représentée par l'équilibre entre force active de l'écoulement et force passive du frottement dans les pores.

La figure 9 ci-après montre le processus du colmatage en fonction du temps et de la vitesse.

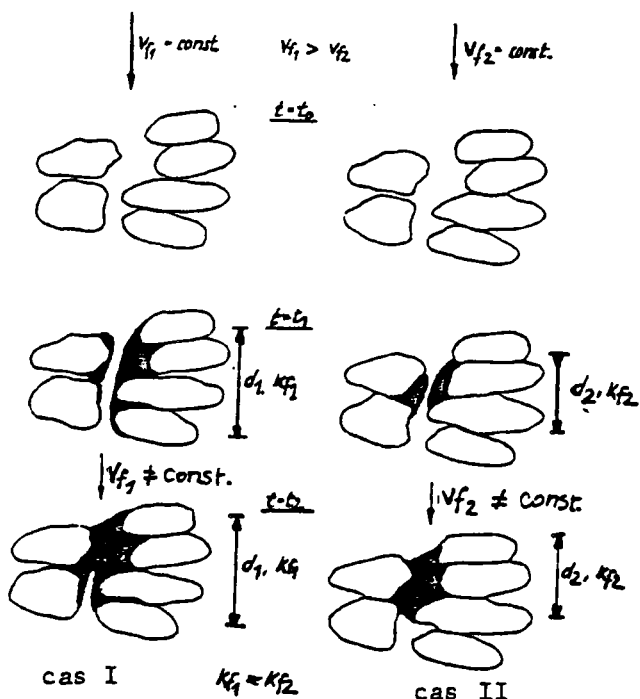


Fig. 9
(d'après BANSCHER, 1976)

Si la vitesse est plus faible (cas II) la pression d'écoulement dans les pores est plus petite, d'où un espace poreux intéressé par le colmatage plus réduit, et une résistance à l'infiltration moindre. Avec des vitesses plus grandes, le dépôt est réparti sur une distance plus importante.

Les valeurs de w se différencient lorsque l'on franchit une vitesse critique pour laquelle l'influence de la profondeur de colmatage est plus grande que l'influence de la section de pores colmatés, et donc de la perméabilité. Cette vitesse critique pour le cas d'un sable est de 0,3 cm/mn.

La résistance à l'infiltration w ne peut pas augmenter indéfiniment en fonction du temps : quand la pente maximale de la courbe (fig. 8) est atteinte, la vitesse d'infiltration diminue. On arrive à un remplissage des pores qui ne peut pas atteindre l'épaisseur totale de colmatage (fig. 9 - cas I, $t = t_2$).

La perméabilité sera fonction de celle de la masse colmatée.

- Le colmatage a été considéré ensuite, en fonction du flux entrant, c'est-à-dire du volume d'eau infiltré au travers d'une surface constante. BANSCHER (1976) introduit la valeur \bar{Q} (flux spécifique) :

$$\bar{Q} = \frac{Q \cdot t}{F} \text{ (m}^3/\text{m}^2\text{)}$$

Q : débit

F : section

L'influence de la perméabilité est évidente : par percolation d'une eau chargée en suspensions, on peut obtenir des valeurs variées de w , suivant la vitesse à laquelle cette masse d'eau traverse le filtre. Plus la vitesse est faible, et plus les valeurs de w sont grandes pour des flux spécifiques identiques (fig. 10).

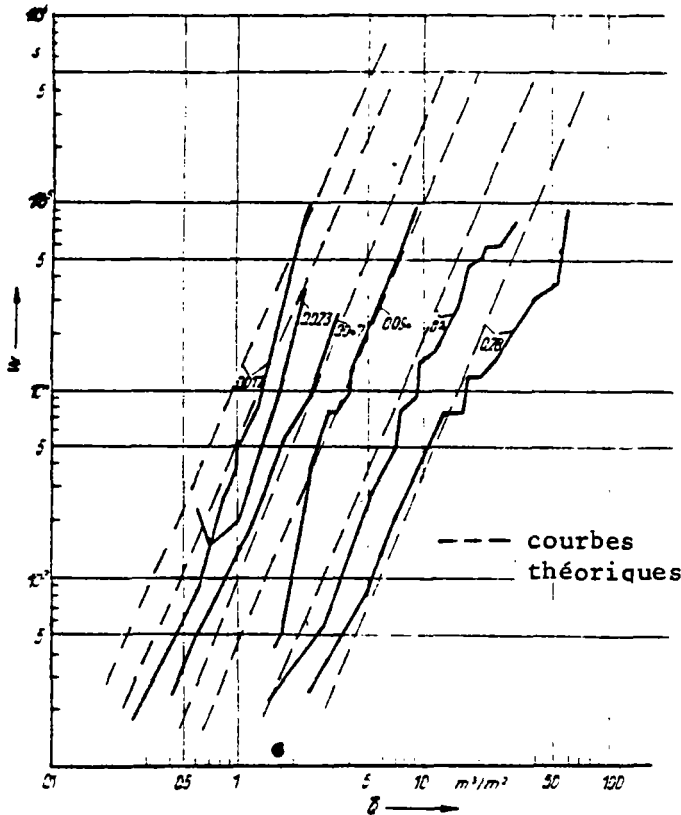


Fig. 10

Développement du colmatage en fonction du flux spécifique pour des vitesses comprises entre 0,017 et 0,28 cm/mn ($2.8 \cdot 10^{-6}$ m/s et $4,6 \cdot 10^{-5}$ m/s)

(d'après BANSCHER, 1976)

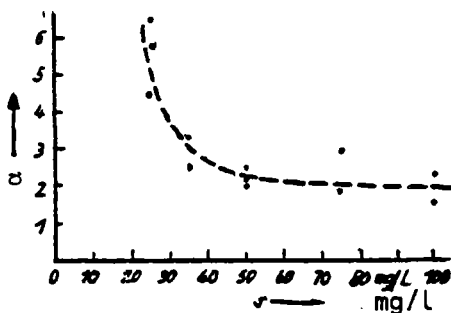
- Les recherches ont montré aussi que la vitesse de pores influence la résistance à l'infiltration.

Si la vitesse de pores est grande, le colmatage commence plus tard et est interne. Par contre, si la vitesse de pores est faible, il se forme rapidement une couche colmatée à l'extérieur du milieu poreux qui empêche l'infiltration des particules à l'intérieur du milieu poreux. Quand la vitesse des pores est plus grande, il se produit un colmatage interne important avant que ne se développe le colmatage externe, de sorte qu'il y a une plus forte résistance à l'infiltration.

- Influence de la concentration en particules en suspensions dans l'eau.

Cette influence a été étudiée avec des concentrations de 25, 35, 50, 75, 100 mg/l. Il a été constaté que la concentration a un effet sur le coefficient de colmatage et sur l'exposant de colmatage.

La figure 11 donne le coefficient de colmatage α en fonction de la concentration en suspension en suspensions.



Si la concentration diminue, le dépôt commence plus tard et se développe plus vite.

Fig. 11 (d'après BANSCHER, 1976)

Une caractéristique du phénomène de colmatage semble être le fait que chaque évènement tend vers un état d'équilibre, lequel résulte de différentes conditions d'infiltration. Cet état aboutit finalement à la même résistance hydraulique.

5.2. Mesure du colmatage

BERAUD et CLOUET D'ORVAL (1976) ont choisi comme paramètre de colmatage, le rapport $C = \frac{bc}{Kc}$ représentant l'épaisseur bc d'une tranche de milieu colmaté entourant le fond et la berge de la rivière, rapportée à la perméabilité Kc de cette tranche supposée homogène.



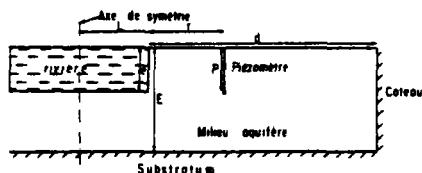
Fig. 12 (BERAUD et CLOUET D'ORVAL, 1976)

Les relations entre une nappe et une rivière ont été étudiées par P. PEAUDECERF (1970) et R. LELIEVRE et al. (1976).

BERAUD et CLOUET d'ORVAL (1976) proposent de déterminer le colmatage en analysant l'écoulement souterrain induit par les fluctuations naturelles de la rivière.

Le plan médian de la rivière est supposé être un axe de symétrie du système (fig. 12 bis).

- d = distance entre le bord de la rivière et le coteau supposé imperméable,
- e = profondeur de la rivière,
- E = épaisseur du milieu aquifère,
- L = demi-largeur de la rivière,
- p = profondeur de la prise de pression du piézomètre,
- r = distance du piézomètre au bord de la rivière.



La fonction utilisée est l'amplitude du niveau piézométrique observé dans la nappe pour différentes distances à la rivière. Cette fonction est présentée sous forme d'abaques utilisant des coordonnées réduites adimensionnelles et indexés sur des paramètres également adimensionnels.

On définit les paramètres adimensionnels suivants de façon à pouvoir employer les abaques dans tous les cas de figure :

- coefficient de profondeur de la prise piézométrique :

$$\beta = \frac{D}{E}$$

E : épaisseur du milieu aquifère

p : profondeur de la prise de pression du piézomètre

- coefficient de profondeur de la rivière :

$$\gamma = \frac{e}{E}$$

e : profondeur de la rivière

- coefficient de largeur équivalente de la nappe :

$$\delta = [d+1 (1-\gamma)L] \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}$$

d : distance bord de la rivière au coteau imperméable

L : demi-largeur de la rivière

- coefficient de colmatage :

$$\alpha = \frac{1}{KC} [e+L (1-\gamma)]$$

S : coefficient emmagasinement

T : transmissivité

t₀ : période

K : perméabilité de l'aquifère

Les abaques expriment la quantité $\frac{a}{A}$

a : amplitude maximale recueillie sur le piézomètre

A : amplitude maximale de la crue en fonction de la distance réduite

$$R = [(r+1 - \gamma)] L \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}$$

- Une autre approche de calcul du colmatage des lits de rivière est présentée par les auteurs allemands, en particulier GELDNER (1982) et GONSOWSKI (1983).

Ces auteurs distinguent un colmatage à l'intérieur du milieu poreux à partir de la surface, et une couche qui se dépose à la surface : dans tous les cas ces deux couches se forment ensemble. Cette même distinction a déjà été faite par HERZIG (1962) ou TRZASKA (1965). Elle est faite aussi par HANSEL (1967).

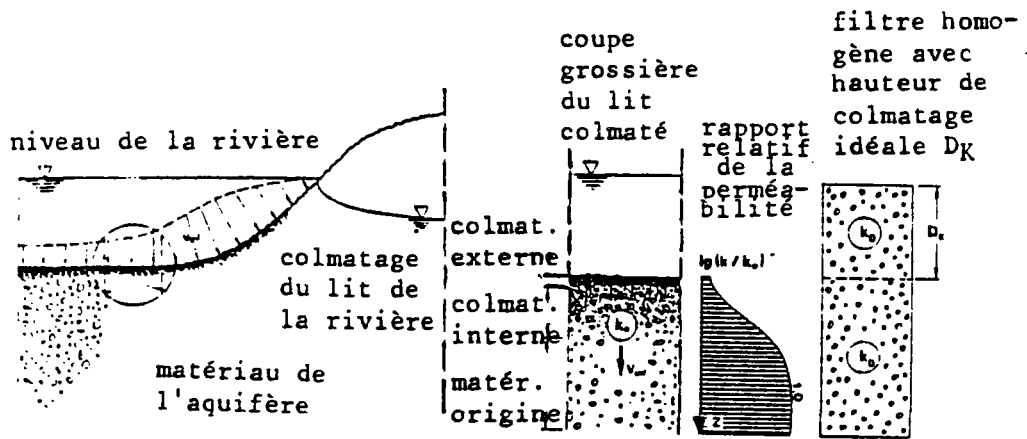
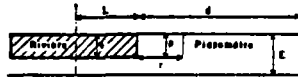


Fig. 13 (d'après GELDNER, 1982)

Dans le cas du colmatage interne, la migration des particules est liée aux conditions géométriques du milieu. Les grosses particules se déposent les premières ensuite se déposent les autres particules de plus en plus fines. La vitesse de percolation varie de façon exponentielle avec le phénomène de colmatage. Quand tous les espaces poreux sont remplis, le dépôt se fait en surface. Au fur et à mesure que l'épaisseur de la couche colmatée augmente, la perméabilité diminue. Une fois la couche formée, les processus chimiques et biologiques anaérobies peuvent intervenir. La formation de la couche de colmatage dépend beaucoup de l'écoulement et du débit (BANSCHER, 1976). La perméabilité diminue beaucoup dans une première phase, puis très lentement.

AMPLITUDE DE L'ONDE DE CRUE
EN FONCTION
DE LA DISTANCE A LA RIVIERE



$\delta = 7.10$

$\gamma = 1$

$$\alpha = \frac{1}{KE} (e - L \frac{E+2}{E})$$

$$p = \frac{e}{E}$$

$$T = \frac{e}{E}$$

$$\delta = \left[e + (1-\gamma)L \right] \sqrt{\frac{\pi S}{toT}}$$

$C = \frac{E+2}{E}$ Paramètre de amortissement
 $K =$ Perméabilité du milieu équivalent
 $T =$ Transmissivité de l'aquifère = KE

$S =$ Coefficient d'emmagasinement
 $to =$ Période de crue
 $A =$ Amplitude de la crue
 $a =$ Amplitude de la réponse piézométrique

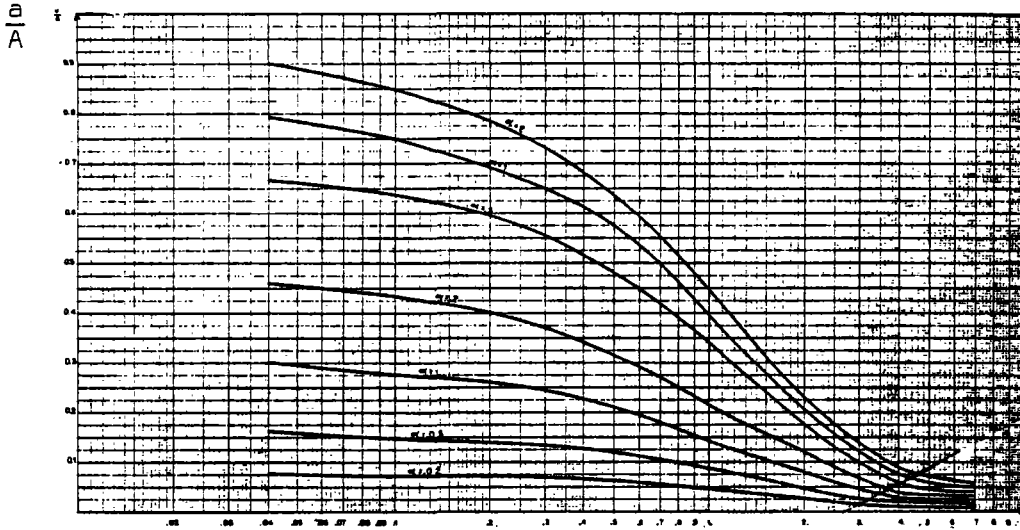
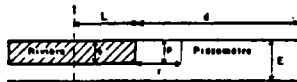


Fig. 14

$$R = [e + (1-\gamma)L] \sqrt{\frac{\pi S}{toT}}$$

AMPLITUDE DE L'ONDE DE CRUE
EN FONCTION
DE LA DISTANCE A LA RIVIERE



$\delta = 7.17$

$\gamma = 0.5$

$$\alpha = \frac{1}{KE} (e - L \frac{E+2}{E})$$

$$p = \frac{e}{E}$$

$$T = \frac{e}{E}$$

$$\delta = \left[e + (1-\gamma)L \right] \sqrt{\frac{\pi S}{toT}}$$

$C = \frac{E+2}{E}$ Paramètre de amortissement
 $K =$ Perméabilité du milieu équivalent
 $T =$ Transmissivité de l'aquifère = KE

$S =$ Coefficient d'emmagasinement
 $to =$ Période de crue
 $A =$ Amplitude de la crue
 $a =$ Amplitude de la réponse piézométrique

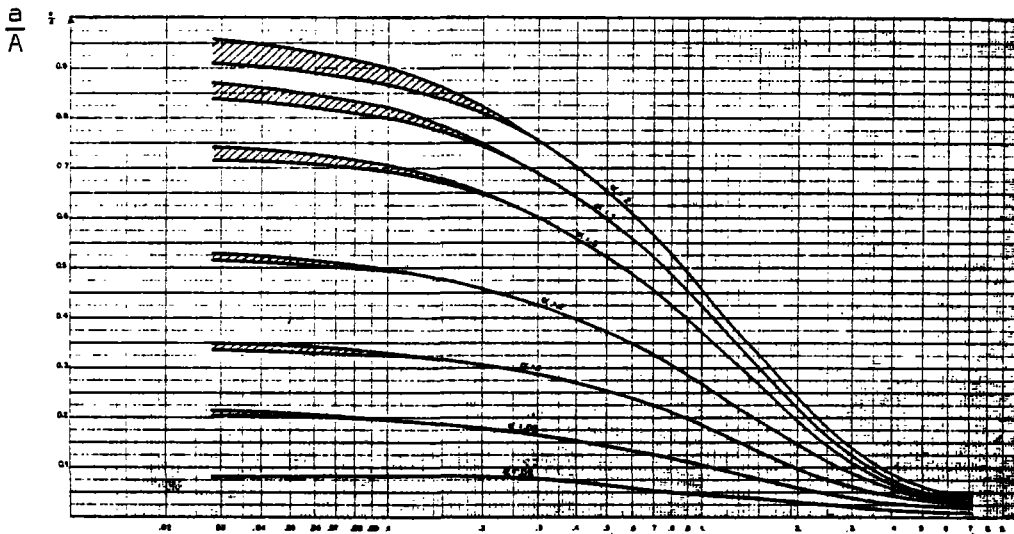


Fig. 15

$$R = [e + (1-\gamma)L] \sqrt{\frac{\pi S}{toT}}$$

d'après BERAUD et CLOUET D'ORVAL (1976)

Le colmatage se modifie avec le gradient d'infiltration. Ce dernier est maximal à proximité des berges et favorise le processus de colmatage. Quand le colmatage augmente, ce gradient diminue et la répartition de l'infiltration s'égalise.

GELDNER (1982) tout comme GONSOWSKI (1983) définissent une "hauteur idéale de colmatage" D_K . Sa perméabilité est k_0 comme pour le terrain non colmaté, et représente la résistance hydraulique à l'origine.

GELDNER (1982) exprime cette hauteur idéale de colmatage, comme :

$$D_K = k_0 \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{k(z)} - \frac{1}{k_0} \right) dz$$

$k(z)$ étant la perméabilité à la profondeur z .

Cette "hauteur idéale" a permis de comparer différentes mesures, à l'aide de la fonction sans dimensions de la forme (voir exemple, fig. 17) :

$$\left(\frac{D_K}{\sqrt{k_0}} \right) = Fkt \left\{ \left(\frac{tg^{1/2}}{k_0^{1/4}} \right), \left(\frac{v_f C_0}{k_0 g / v} \right), Q.P \right\}$$

C_0 : concentration

v_f : vitesse de filtration

v : viscosité

t : temps

g : accélération de la pesanteur

Q.P : paramètres qualitatifs

Si l'on porte $\frac{D_K}{\sqrt{k_0}}$ en fonction de $t \sqrt{g/\sqrt{k_0}}$ (coord. log.), on constate qu'on ne peut rien généraliser et que les mesures sont extrêmement dispersées (fig. 16).

GELDNER (1982) propose une approche mathématique, en mesurant les niveaux d'eau au voisinage de la rivière. Il développe un concept du "champ rapproché" : l'écoulement dans la zone de contact direct entre eaux de surface et nappe fonctionne comme un système fermé. Cet écoulement en "champ rapproché", contrairement à l'écoulement en "champ éloigné" est marqué par des composantes de vitesse verticale non négligeables.

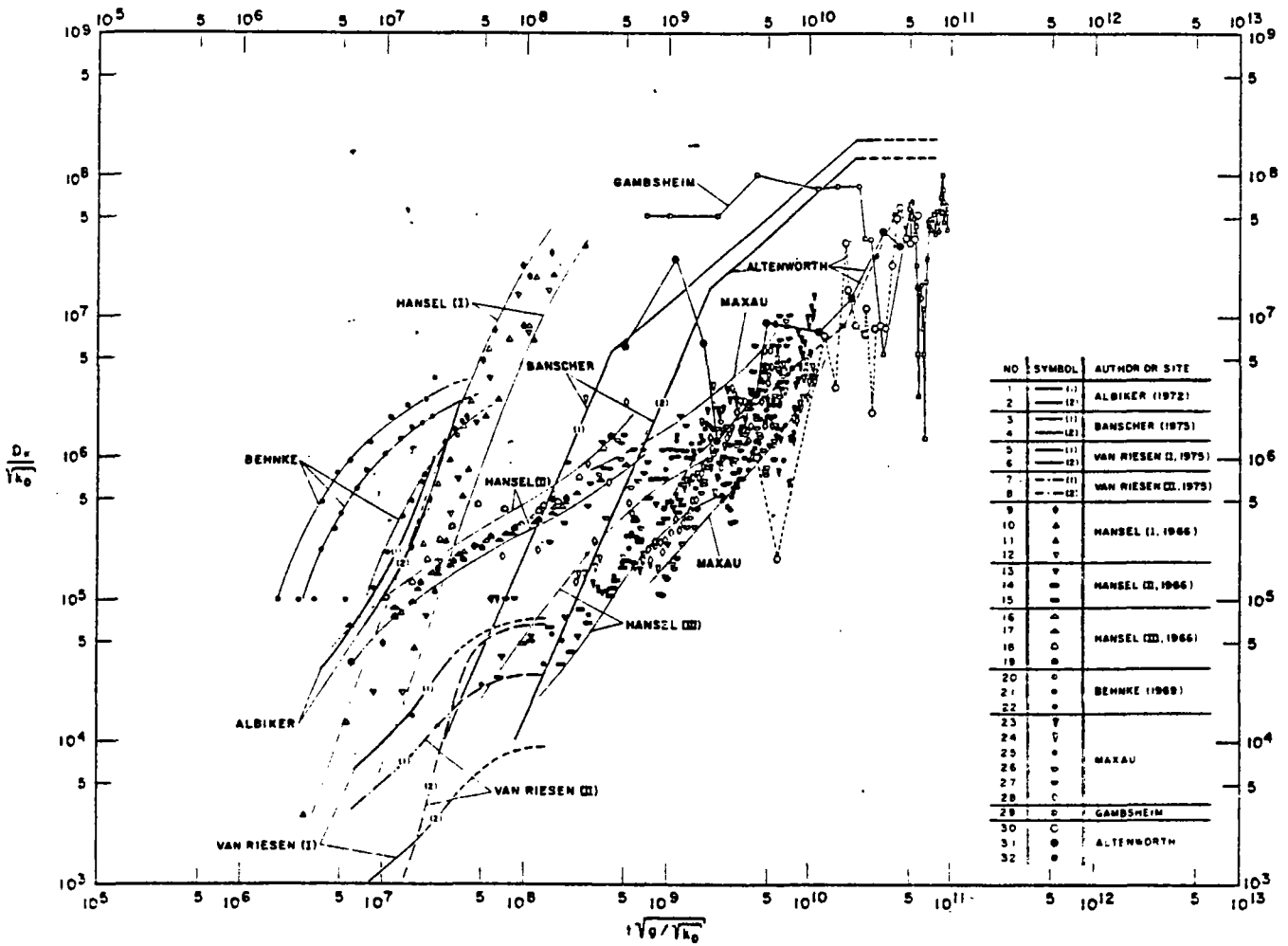
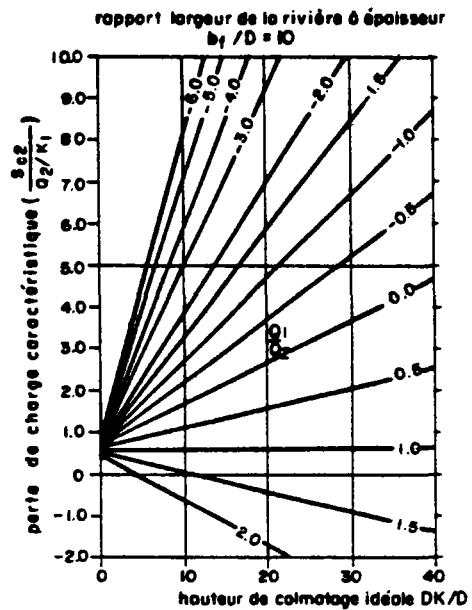
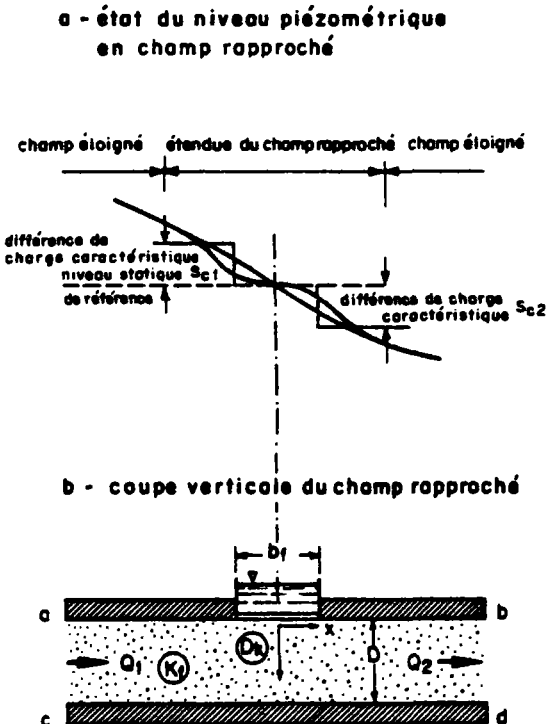


Fig. 16 - Comparaison d'exemples de colmatage en fonction du temps
(d'après GELDNER, 1982)



(d'après GELDNER, 1982)

C. Exemple de courbes types pour différentes valeurs Q_1 / Q_2

Fig. 17

Les différentes grandeurs d'entrée dans cette fonction de "champ proche" sont la géométrie du champ proche, les conditions hydrauliques aux limites, les conditions de perméabilité, le colmatage du lit de la rivière. Par exemple, le colmatage du lit est caractérisé par D_K constante sur la largeur du cours d'eau.

Les débits d'entrée et de sortie Q_1 et Q_2 sont positifs. La fonction a la forme :

$$\left(\frac{S_{c1,2}}{Q_{1,2}/k_f} \right) = Fkt \left\{ \left(\frac{bf}{D} \right) , \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) , \left(\frac{D_K}{D} \right) \right\}$$

Les paramètres constants sont bf/D la largeur relative d'écoulement, le rapport des débits du champ éloigné $\frac{Q_1}{Q_2}$, et le rapport $\frac{D_K}{D}$ (hauteur du colmatage sur épaisseur de l'aquifère). (Fig. 17)

Les paramètres variables sont les différences de charge de chaque côté de la rivière $S_{c1}/(Q_1/k_f)$ et $S_{c2}/(Q_2/k_f)$: ces différences de charge caractéristiques, sont les différences virtuelles entre le niveau de la rivière et la hauteur piézométrique dans le champ éloigné. Ces différences de charge permettent une approche simplifiée, unidimensionnelle du calcul de l'écoulement en champ proche.

La différence de charge a été longtemps utilisée comme une constante indépendante de l'écoulement.

Cette approche de calcul est limitée à des variations d'écoulement, lentes dans le temps.

- Une autre approche qui est une approche stochastique repose sur la résolution par analyse spectrale des écoulements.

L'approche stochastique repose en gros, sur le calcul d'une fonction de transfert G qui dépend de la fréquence ω , et qui donne le rapport entre une excitation de l'écoulement et la réponse des oscillations dans la nappe.

$$G(\omega) = \int_0^{\infty} g(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

$g(\tau)$: réponse à l'impulsion

τ : temps entre excitation et observation de la réponse

Un exemple de calcul est illustré dans la figure suivante.

La largeur de la rivière est grande : $bf = \infty$.

La différence de charge est fonction du colmatage :

$$\left(\frac{S_c}{Q/k_f} \right) = Fkt \left(\frac{DK}{D} \right)$$

Le coefficient d'emménagement dans le champ rapproché peut être négligé ($S_{NF} = 0$) et la hauteur idéale de colmatage du lit de la rivière supposée constante sur toute la largeur et dans le temps ($DK = \text{const.}$). La rivière se trouve sur un aquifère de longueur L au bout de laquelle règne un niveau d'eau constant h_0 . On obtient :

$$|G|^2 = Fkt \left\{ \left(\frac{\omega x^2}{T/S} \right), \left(\frac{L}{x} \right), \left(\frac{S_c}{Q/k_f} / \frac{x}{D} \right) \right\}$$

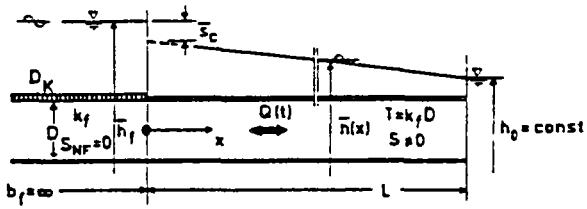
$\left(\frac{\omega x^2}{T/S} \right)$ fréquence sans dimension

$\left(\frac{L}{x} \right)$ longueur de l'aquifère/distance au point de mesure)

$\left(\frac{S_c}{Q/k_f} / \frac{x}{D} \right)$ coefficient d'écoulement sans dimension.

On peut écrire une forme simplifiée :

$$\left(\frac{S_c}{Q/k_f} / \frac{x}{D} \right) = \left(\frac{x_0}{x} \right) \quad \text{où } x_0 \text{ est une prolongation virtuelle de la nappe}$$



a. système d'écoulement

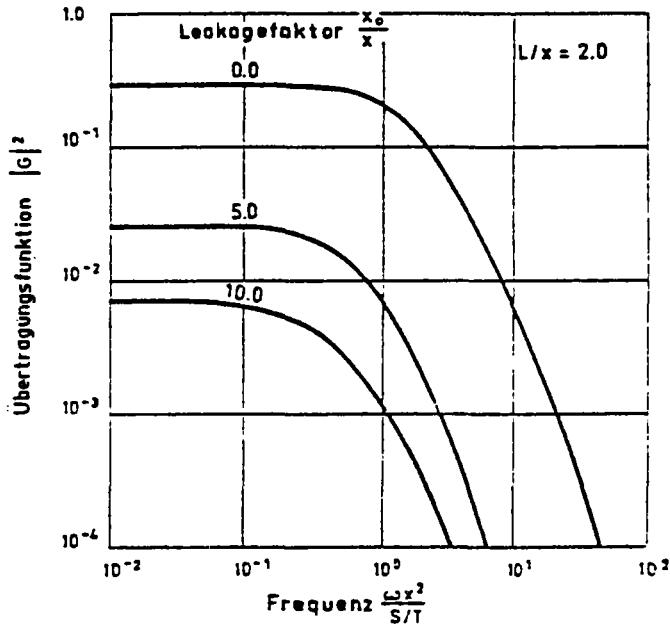


Fig. 18 - Courbes-typiques pour un écoulement unidimensionnel (d'après GELDNER, 1982)

b. courbes-typés

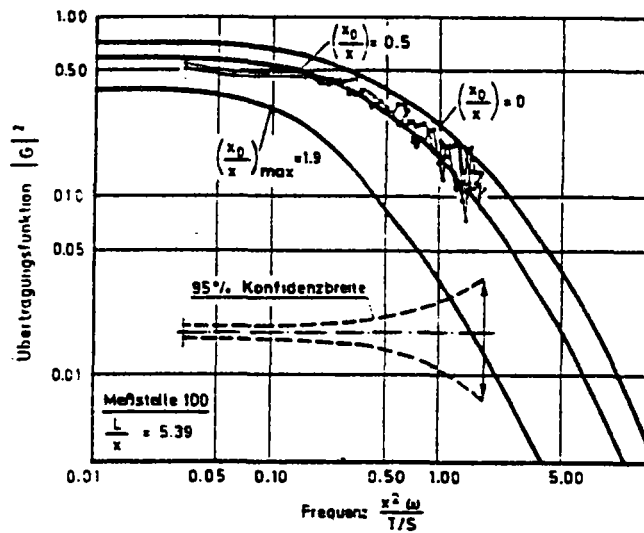


Fig. 19 - Exemple d'application - Comparaison de mesures et de valeurs calculées dans la vallée du Rhin (d'après GELDNER, 1982)

CONCLUSION

Le phénomène de colmatage dont les mécanismes semblent relativement bien connus sont parfois inévitables ; c'est le cas du colmatage du lit et des berges de rivières lié aux matériaux en suspension dont on n'est pas maître. Mais ils peuvent être en partie évités, c'est le cas du colmatage des puits d'injection. Dans le cas des puits d'injection, le phénomène est plus facilement maîtrisable, si l'on prend soin de purifier l'eau injectée, et de prendre les précautions opératoires au niveau de l'injection. En ce qui concerne les puits d'exhaure, il est plus difficile d'éviter le colmatage.

Avant de mettre en oeuvre un procédé de décolmatage, on prendra soin d'identifier la cause du colmatage, et le produit colmatant ; le procédé de décolmatage, en effet, ne sera efficace que s'il est adapté au produit colmatant, sinon il peut même avoir l'effet contraire d'aggraver le colmatage.

Le balayage par pompage semble être efficace et il semble que des pompages fréquents et de courte durée sont suffisants pour obtenir un taux de décolmatage intéressant.

L'injection d'air comprimé donne de bons résultats pour le décolmatage des puits d'injection.

Le décolmatage par injection de produits chimiques n'est utilisé que lorsque le décolmatage par procédé mécanique est resté sans résultat.

BIBLIOGRAPHIE

- ANONYME (1984) .- Etude du colmatage des forages de l'Yprésien .- rapport BURGEAP pour A.F.M.E.
- APPERT J. (1959) .- Bactériologie de l'injection d'eau .- Revue de l'Institut français du pétrole, XIV, n° 3, mai 1959 .
- BANSCHER E. (1976) .- Gesetzmässigkeiten der Kolmationsentwicklung (lois du développement du colmatage) .- Wasserwirtschaft, Wassertechnik, vol. 9.
- VAN BEEK, KOOPER (1980) .- The clogging of shallow discharge wells in the Netherland's river region .- Groundwater, 18(6), 566-578.
- VAN BEEK, VAN DER KOOIJ (1982) .- Sulfate, reducing bacteria in ground water from clogging and non clogging shallow wells in the Netherlands River Region .- Groundwater, vol. 20, n° 3, mai-juin 1982.
- BERAUD J.F., CLOUET D'ORVAL M. (1976) .- Détermination du colmatage du lit d'une rivière, en relation avec une nappe souterraine .² Bull. BRGM, Deuxième série, Section III, n° 3/4.
- BIZE J., BOURGUET L., LEMOINE J. (1972) .- L'alimentation artificielle des nappes souterraines .- Masson éd.
- BONNET M., MARGAT J. (1976) .- Aide-mémoire sur l'évaluation des ressources en eau des aquifères subordonnés aux cours d'eau .- Bulletin du BRGM, Section III, n° 3/4.
- BOURGUET L., GATELLIER C. (1984) .- Colmatage des forages - Causes et remèdes .- Bull. BRGM Hydrogéologie-Géologie de l'ingénieur n° 1 .
- Mc CORMICK R. (1975) .- Filter-pack installation and redevelopment techniques for shallow recharge shafts .- Groundwater, vol. 13, n° 5, sept-oct. 1975 .

GELDNER P. (1982).- Ein strömungsmechanischer Ansatz zur Bestimmung der selbstdichtung in natürlichen gewässern (Approche hydrodynamique pour l'interprétation du colmatage des berges).- Wasserwirtschaft 72 (1982) 9.

GIRAUD A., NEU J.M. (1971).- Injection d'eau : interaction entre l'eau injectée et le réservoir.- Revue de l'Institut français du pétrole, nov, 1971.

GONSOWSKI P. (1983).- Selbstdichtung von gewässern (Colmatage des berges).- Wasser und Boden 9, 1983.

GRAY D.H., REX R.W. (1966).- Formation damage in sandstones caused by clay dispersion and migration.- 14th Ntl. Conf. on clays and clay minerals, London Chevron Research Co (1966) 355.

GYLYBOV M. (1969).- Calcul des captages en berge, tenant compte du colmatage progressif du lit du cours d'eau.- Trad. BRGM 5375, 1969.

HANSEL N. (1967).- Über natürliche selbstdichtung von gewässern mit porösen untergrund und ihre hydrologisch Wasserwirtschaftlichen auswirkungen (Colmatage naturel des berges en milieu poreux et conséquences hydrologiques).- Wissenschaftliche zeitschrift der Hochschule für Bauwesen, Leipzig, Heft 4 (1967).

HERZIG J.P., LECLERC D.M., LE GOFF P. (1970).- Flow of suspensions through porous media - application to deep filtration.- Ind. and Eng. chemistry, mai 1970, vol. 62 n° 5.

JONES F.O. (1964).- Influence of chemical composition of water on clay blocking of permeability.- Journal of petroleum technology, avril 1964.

KHILAR K.C. (1983).- Water sensitivity of sandstones.- Society of Petroleum Engineers Journal, février 1983.

LELIEVRE R.E., PEAUDECERF P., PRUDHOMME P.- Influence des pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage des cours d'eau.- Bull. BRGM (deuxième série), section III, n° 3/4 1976.

MONAGHAN P., SALATHIEL R., MORGAN B., KAISER A. (1959).- Laboratory studies of formation damage in sands containing clays.- Petroleum transactions, AIME, vol. 216.

MUNGAN N. (1965).- Permeability reduction through changes in pH and salinity.-
Journal of petroleum technology, décembre 1965.

OLTHORN T.N. (1982).- The clogging of recharge wells, main subjects KIWA.-
Communications 72, Rijswijk, août 1982.

PEAUDECERF P.- Calcul automatique de la diffusivité des nappes en relation
avec un plan d'eau libre.- Rapport BRGM 70 SGN 083 HYD.

PONTIN J.M.A. (1978).- Hydraulics of well recharge into an unconfined aquifer
with a deep water-table.- Intern. Commission on irrigation and drainage
Symposium R7, Athènes.

RAHMAN A., SMERDON E., HILER E. (1969).- Effect of sediment concentration on
well recharge in a fine sand aquifer.- Water Res. Res., vol. 5, n° 3,
juin 1969.

RIPLEY D.P., SALEEM Z.A. (1973).- Clogging in simulated glacial aquifers due
to artificial recharge.- Water Res. Res., vol. 9, n° 4, août 1973.

REBHUN M., SCHWARTZ J. (1968).- Clogging and contamination processes in
recharge wells.- Wat. Res. Res. 4 (1968), 6, pp. 1207-1217.

SIX P. (1962).- Contribution à l'étude de la perméabilité d'une roche poreuse
à un liquide.- Revue de l'Institut Français du Pétrole, XVII n° 12.

SNIEGOCKI R.T., BROWN R. (1970).- Clogging of recharge wells, causes and
cures.- In : Artificial recharge conference Reading, 21-28 sept. 1970.

TRZASKA A. (1965).- Experimental research on the phenomenon of colmatage.-
Bull. Acad. polonaise des Sciences, vol. XIII, n° 9.