

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GÉOTHERMIQUES

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

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

COLMATAGE DES PUIITS ET FORAGES

Manuel Pratique



Département EAU

Rapport du B.R.G.M.

85 SGN 051 EAU

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GÉOTHERMIQUES

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

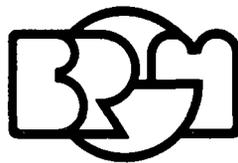
AGENCE FRANÇAISE
POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE
A.F.M.E.

COLMATAGE DES PUIITS ET FORAGES

Manuel Pratique

par

R. DEGALLIER



Département EAU

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

Rapport du B.R.G.M.

85 SGN 051 EAU

Février 1985

R E S U M E

Pour retarder le vieillissement, inéluctable, des puits et forages, une succession d'études et de traitements est recommandée.

Les études doivent d'abord établir la réalité d'une éventuelle baisse de débit d'un puits et en diagnostiquer la cause qui peut être imputable aussi bien à un système de pompage usé ou à une nappe épuisée qu'à un colmatage du système de captage lui-même.

Lorsqu'un colmatage est diagnostiqué, sa localisation et ses causes peuvent être déduites de :

- l'examen physico-chimique de l'eau : analyse sur place des éléments fugaces, analyse en laboratoire, présence de sable, argile, calcaire, oxyde de fer, bactéries, etc...,
- pompages d'essai à comparer avec des pompages analogues antérieurs,
- diagraphies au moulinet, par photographie ou par examen à la caméra de télévision.

Différents types de colmatage, généralement associés, mais demandant des traitements spécifiques, peuvent ainsi être identifiés. :

- colmatage mécanique par des sables,
- colmatage physico-chimique par des particules fines, argiles ou colloïdes, adsorbées,
- colmatage chimique par précipitation de carbonates à la suite d'un dégagement de CO_2 , ou par formation d'hydroxydes ferriques à la suite d'un apport d'oxygène,
- colmatage biologique, particulièrement répandu en Europe,
- colmatage par des produits de corrosion.

En dehors du brossage, du détartrage à l'explosif, et du doublage des crépines, les techniques de régénération sont identiques à celles du développement d'un puits neuf :

- alternance de pompage à l'émulseur, et d'injection d'eau ou d'air sous pression, par passes localisées dans les crépines,
- pistonnage mécanique ou à l'air comprimé dans le tubage ou dans les crépines,
- pompage intermittent à la pompe,
- traitement par les phosphates ou par l'acide chlorhydrique,
- stérilisation au chlore ou à l'hypochlorite de calcium.

L'ordre selon lequel ces techniques peuvent être appliquées est loin d'être indifférent, et est affaire d'expérience. Les travaux de BREMOND, KREMS et CLARKE sont particulièrement instructifs à cet égard.

Enfin, la prévention du colmatage et de la corrosion, si elle était faite systématiquement, rendrait sans objet tout ce qui précède. Une telle prévention est possible après reconnaissance hydrogéologique et caractérisation au besoin par forage de reconnaissance, de la granulométrie de la couche aquifère, de la qualité chimique de la nappe, et de ses paramètres hydrodynamiques. On peut alors établir l'avant-projet du puits, avec le bon choix des matériaux et dimensions des tubes, crépines, pompes et dispositifs de surveillance et d'entretien.

S O M M A I R E

1. <u>INTRODUCTION</u>	1
2. <u>DIAGNOSTIC D'UN VIEILLISSEMENT</u>	5
2.1. REALITE D'UNE BAISSSE DE DEBIT	5
2.2. DISPOSITIF DE POMPAGE	5
2.3. BAISSSE DU DEBIT SPECIFIQUE	6
2.4. BAISSSE DU DEBIT SPECIFIQUE CARACTERISTIQUE	6
2.5. AUGMENTATION DES PERTES DE CHARGES QUADRATIQUES	7
2.6. DISPOSITIF DE MESURES	7
3. <u>RECHERCHE DES CAUSES DE VIEILLISSEMENT</u>	11
3.1. POMPAGE D'ESSAI	11
3.2. RETRAIT DE LA POMPE	11
3.3. DIAGRAPHIES	12
3.4. LES DEPOTS COLMATANTS	12
3.4.1. Sable	12
3.4.2. Calcaire	13
3.4.3. Fer et Oxygène	14
3.4.4. Bactéries	15
4. <u>LES PHENOMENES DE VIEILLISSEMENT</u>	17
4.1. LE COLMATAGE MECANIQUE	17
4.2. LE COLMATAGE PHYSICO-CHIMIQUE	22
4.3. LE COLMATAGE CHIMIQUE	23
4.3.1. Les carbonates	23
4.3.2. Les dépôts ferrugineux	25
4.4. LE COLMATAGE BIOLOGIQUE	26
4.5. LA CORROSION	28
4.5.1. Corrosion par attaque acide	29
4.5.2. Corrosion par attaque électrolytique	32

<u>5. LES TECHNIQUES DE REGENERATION</u>	35
5.1. POMPAGE A L'EMULSEUR	35
5.2. PISTONNAGE	38
5.3. POMPAGE A LA POMPE	38
5.4. DOUBLAGE DES CREPINES	39
5.5. PHOSPHATAGE	39
5.6. BROSSAGE ET GRATAGE	41
5.7. TIR A L'EXPLOSIF	41
5.8. ACIDIFICATION	41
5.9. STERILISATION	42
5.10 PROTECTION CATHODIQUE	43
5.11 MISE EN OEUVRE	43
<u>6. PREVENTION DU COLMATAGE</u>	45
6.1. RECONNAISSANCE HYDROGEOLOGIQUE	45
6.2. FORAGE DE RECONNAISSANCE ET D'EXPLOITATION	46
6.3. POMPAGES D'ESSAI	48
6.4. LES ANALYSES D'EAU	50
6.5. LES RESULTATS	53
6.5.1. H ₂ S	53
6.5.2. O ₂	54
6.5.3. CO ₂ libre	54
6.5.4. Fe	54
6.5.5. Diagramme pH-Eh	54
6.5.6. Indice de Langelier (I _L)	54
6.5.7. Indice de Ryznar (I _R)	55
6.6. AVANT PROJET	56
<u>7. CONCLUSIONS</u>	59
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	61

1. INTRODUCTION

Le vieillissement d'un puits ou d'un forage, c'est-à-dire sa diminution de productivité avec le temps, est un phénomène inéluctable qu'il s'agit de retarder le plus possible.

Dans la pratique, l'amortissement d'un ouvrage est généralement programmé sur 20 ans, mais sans qu'il n'y ait jamais eu d'études fiables de la longévité moyenne des forages. On connaît certes des ouvrages fonctionnant depuis plus de 20 ans, mais il semble que le plus souvent ce chiffre soit très exagéré. Comme l'eau est un besoin que l'on ne discute pas, au moins l'eau potable, on s'est peu préoccupé jusqu'ici de concepts économiques : lorsqu'un puits ne fournit plus ce qu'il devrait, on le régénère ou on le remplace, quelle que soit la dépense.

Or le développement actuel du captage industriel non plus seulement chez les exploitants d'eau traditionnels, mais aussi pour l'utilisation thermique des aquifères et surtout dans d'immenses projets d'irrigation, impose de serrer de plus près les problèmes techniques et économiques posés par le vieillissement des forages.

De nombreuses publications ont été faites ces dernières années, essentiellement sur des problèmes locaux pour lesquels des explications parfois mathématiques ont été proposées. La conclusion de quelques synthèses de ces documents est qu'aucune explication d'ensemble ne peut encore en être tirée.

Par contre, les auteurs qui ont examiné eux-mêmes un grand nombre d'ouvrages de captage d'eau, en ont tiré des conclusions d'un grand intérêt pratique, valables au moins dans la région d'étude. Ainsi, R. BREMOND (1956) a suivi quelques 200 forages en Afrique Occidentale, et propose des remèdes au colmatage par le sable ou par les particules fines, ainsi qu'au colmatage par incrustation de précipités.

G. KREMS (1972) a traité de façon détaillée le problème du colmatage biologique, prépondérant dans la région de Berlin.

Plus récemment, 68 forages, échantillonnés dans une population de 258, ont été soumis à enquête (L. BOURGUET, 1984), et ont été traités statistiquement. Des données précieuses sur les durées de vie des forages ont été obtenues, valables dans un secteur particulier de la région parisienne.

Les ouvrages de base sur la corrosion des forages d'eau ont été rassemblés par M. BOURGEOIS (1976), et synthétisés par F.E. CLARKE (1980) dont l'expérience provient de l'examen de plusieurs centaines de puits, notamment en Inde, aux Etats-Unis et en Afrique.

Chaque région est caractérisée par certains types de vieillissement des captages d'eau, et il est probable que l'on ne dispose pas encore d'un échantillon suffisant pour que le problème puisse être résolu par approche statistique. Il est donc nécessaire de se faire une idée des phénomènes physiques ou biophysiques en jeu et de leur interdépendance dans le plus grand nombre possible de situations, car ce qui manque encore le plus ce sont les observations de cas concrets.

C'est essentiellement sur la base des documents cités plus haut que nous nous proposons d'examiner comment se manifeste le vieillissement des puits de captage d'eau, quels phénomènes en sont responsables, de quelle façon ils agissent, et comment on peut en retarder les effets.

Ces phénomènes peuvent affecter le puits-lui-même et ses environs immédiats, ou se produire dans le terrain à quelque distance du puits. Les problèmes posés pour les puits de pompage peuvent être très différents de ceux affectant des ouvrages d'injection, mais tous les mécanismes en jeu peuvent aussi affecter d'autres systèmes hydrauliques, tels que berges de rivière, sites d'épandage, tranchées d'infiltration ou de drainage.

Le vieillissement des ouvrages de captage d'eau résulte essentiellement de l'augmentation de la vitesse de l'eau autour du puits, et de la tendance que présente tout matériau à se mettre en équilibre avec le milieu dans lequel il se trouve: Dans les deux cas, il y aura colmatage par des produits en solution ou en suspension dans l'eau, ou par des produits de corrosion de matériaux artificiels.

Ce colmatage peut provenir de nombreux phénomènes qu'il s'agit d'identifier. Il peut y avoir colmatage par apport de matières en suspension (sables ou colloïdes), bouchage par action bactérienne, corrosion par attaque chimique ou bactérienne, accompagnée ou non d'incrustation par des précipités. Le traitement ne sera efficace que si le diagnostic est bien fait.

L'ordre logique serait de présenter d'abord les techniques préventives à appliquer lors de la construction des ouvrages, puis d'établir les diagnostics des causes de colmatage éventuel, et enfin de donner un aperçu des techniques de régénération des ouvrages. Cependant, l'intervention du praticien est le plus souvent demandée après de graves échecs ou lorsque le vieillissement d'un ouvrage est déjà avancé.

Le diagnostic du vieillissement est alors la première chose à faire avant de proposer un traitement curatif, et ce n'est que pour les ouvrages ultérieurs que des techniques de construction appropriées pourront être appliquées.

Dans ce qui suit, nous étudierons donc tout d'abord comment établir des diagnostics sur les causes du vieillissement d'ouvrages, puis nous décrirons les différents phénomènes impliqués, et enfin, après avoir présenté les techniques de décolmatage généralement appliquées, nous proposerons des méthodes de prévention à mettre en oeuvre dès la conception des ouvrages.

2. DIAGNOSTIC D'UN VIEILLISSEMENT

La première alerte est généralement celle d'une baisse de débit, dont il faut alors chercher la ou les causes.

2.1. REALITE D'UNE BAISSSE DE DEBIT

Il faut d'abord s'assurer que la baisse de débit est réelle, relativement à des mesures antérieures existantes, et n'est pas une impression subjective venant d'un débit devenu insuffisant pour satisfaire des besoins accrus. On commencera à vérifier la méthode de mesure du débit :

- * Un compteur volumétrique n'est généralement pas fidèle longtemps et peut rapidement être freiné par des dépôts de sable. Les mesures initiales ou antérieures peuvent aussi être très exagérées si le tuyau contenait de l'air à l'origine, car on sait qu'un passage d'air dans un compteur à hélice peut lancer celle-ci à grande vitesse.
- * Le meilleur étalonnage est la mesure du temps de remplissage d'un récipient calibré ou d'un réservoir entre deux repères connus, à condition que la durée du remplissage soit bien supérieure à l'erreur que l'on fait sur sa mesure.
- * La méthode du tube de Pitot, dans laquelle on mesure la surpression apportée par un obturateur calibré par rapport à la pression atmosphérique, ne fonctionne que si le tuyau débouche à l'air libre. Si le puits est connecté à un réseau de distribution, il faut qu'un système Venturi soit installé, comprenant deux points de mesure de pression de part et d'autre d'un étranglement de la conduite.

2.2. DISPOSITIF DE POMPAGE

Si la baisse du débit est manifestement établie, avant d'incriminer le puits lui-même, il faut s'assurer que le dispositif de pompage n'en est pas responsable :

- * Le régime du moteur doit être contrôlé et comparé à des mesures antérieures (compte-tours pour un moteur à axe vertical ou consommation de courant pour une pompe immergée).
- * Une baisse de débit peut résulter d'une augmentation sensible de la hauteur de refoulement par suite d'une baisse du niveau de la nappe,

de la mise en service d'un nouveau château d'eau, ou d'une obturation partielle du réseau de distribution, par exemple par entartrage de buses d'arrosage.

- * Il peut y avoir une baisse du rendement du système de pompage causée par l'usure ou la corrosion du corps de pompe, par l'entartrage de la crépine d'aspiration de la pompe, par le percement par corrosion du carter de pompe ou du tuyau de refoulement. La pression de refoulement et le débit seront alors plus faibles si le régime du moteur n'a pas varié.

2.3. BAISSSE DU DEBIT SPECIFIQUE

Toutes ces causes entraînent une baisse du débit mais pas nécessairement une baisse du débit spécifique ou débit divisé par le rabattement, ce dernier étant la différence entre la pression de la nappe après un arrêt prolongé et la pression de la nappe après une durée donnée après le début du pompage.

Avant de calculer un débit spécifique, il convient de soustraire de ce rabattement les pertes de charge dues à des écoulements linéaires ou non linéaires dans la colonne de captage (tubes et crépines), sinon les débits spécifiques actuels et antérieurs pourraient ne pas être comparables s'ils correspondent à des débits différents (voir plus loin).

Si l'on pompe à niveau constant, ou qu'on exploite une nappe artésienne à niveau constant, une baisse de débit s'accompagnera d'une baisse apparente du débit spécifique, s'il y a une baisse générale non mesurée de la pression de la nappe. Si le rabattement est bien calculé par rapport à la pression vraie de la nappe, une baisse du débit qui n'est pas accompagnée d'une baisse du débit spécifique n'est pas une indication de vieillissement, ni d'ailleurs d'une baisse du débit spécifique qui résulterait d'une diminution d'épaisseur d'une nappe libre dont le niveau aurait fortement baissé.

2.4. BAISSSE DU DEBIT SPECIFIQUE CARACTERISTIQUE

Finalement, l'un des diagnostics de vieillissement d'un ouvrage de captage sera une baisse du "débit spécifique caractéristique" ou débit par unité de rabattement par unité de hauteur captée, ceci dans le cas d'un milieu homogène.

Au contraire, une augmentation du débit spécifique caractéristique est l'indication d'un rajeunissement ou d'un développement du puits. Ce sera la mesure de l'efficacité d'un traitement curatif.

2.5. AUGMENTATION DES PERTES DE CHARGE QUADRATIQUES

Un fort accroissement des pertes de charge dû à des écoulements non linéaires, généralement supposés suivre une loi quadratique, peut aussi être la preuve d'un colmatage.

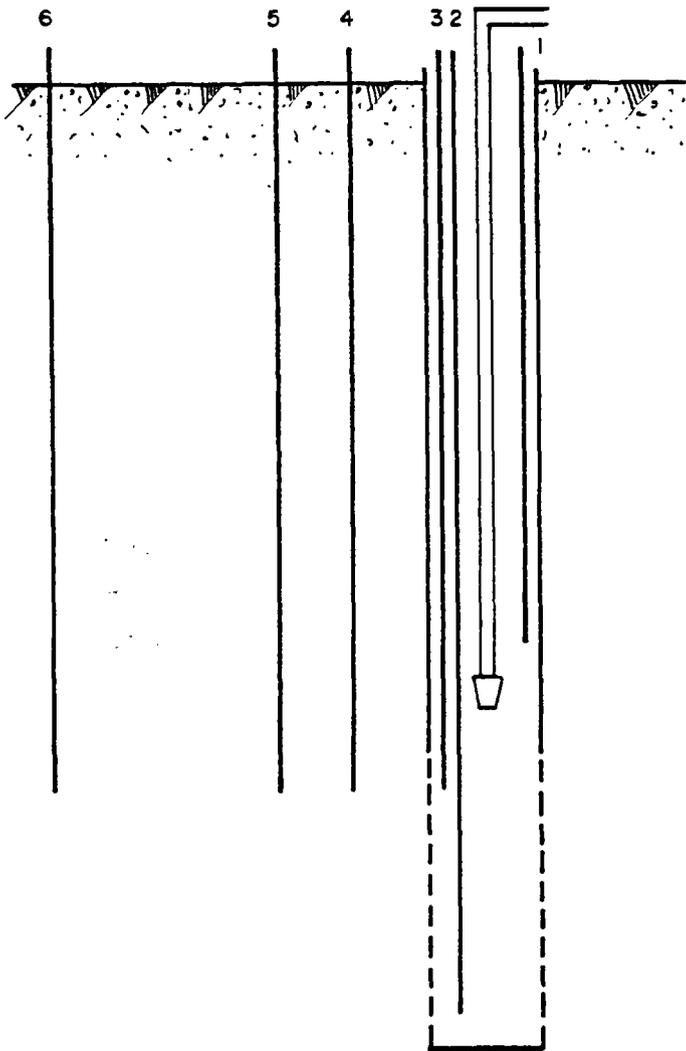
Pour être comparées, ces pertes de charge doivent être déterminées par les mêmes méthodes, à partir des mesures antérieures et actuelles. Il est recommandé aussi de comparer les résultats de la méthode théorique, utilisant les tables existantes et les coefficients de rugosité qui conviennent, et ceux des méthodes classiques sur forage, par pompage par paliers de débits, ou par l'interprétation de l'écart entre courbes de descente et de remontée en coordonnées semi-logarithmiques (BESBES, 1971).

La différence entre les pertes de charge totales mesurées sur les ouvrages et les pertes de charges théoriques provenant de l'écoulement vertical dans les crépines et tubages, correspond à des composantes turbulentes de l'écoulement, résultant principalement de la rencontre de l'écoulement radial à travers les crépines avec l'écoulement vertical à l'intérieur. A débit égal, une augmentation de ces pertes est l'indice d'un colmatage d'une partie des crépines pouvant être associé à une augmentation de vitesse de l'eau dans une autre partie.

Le colmatage peut fortement réduire ces pertes, et alors le débit spécifique caractéristique peut même paraître avoir augmenté, si l'on n'a pas enlevé du rabattement antérieur ce qui provient des écoulements, linéaires ou non, à l'entrée et à l'intérieur de la colonne de captage. Le diagnostic du colmatage est alors au départ un débit plus faible correspondant à un rabattement spécifique caractéristique corrigé augmenté.

2.6. DISPOSITIF DE MESURE

Pour localiser et mieux séparer les différentes causes de colmatage, le plus simple est de faire des mesures de pression dans et autour des puits. Dans le puits, des mesures à différentes profondeurs renseigneront sur les pertes de charge entre le haut et le bas des crépines, et dans le tubage entre les crépines et la pompe. Radialement, des dif-



(1) Prise de pression habituelle par ligne d'air ou tube d'accès d'une sonde électrique

(2) } Prises de pression pour la mesure des pertes de charge dans la colonne (entre (1) et (2)) et dans les crépines (entre (2) et (3))

(2) } Prises de pression pour la détection (4) } du colmatage des crépines (entre (2) (5) } et (4)) du massif (entre (4) et (5)) (6) } et du terrain (entre (5) et (6))

FIGURE 1 - Equipement souhaitable en prises de pression

férences de pression et leurs variations entre l'intérieur du puits, l'extérieur des crépines et le terrain naturel à l'extérieur du massif de gravier, renseigneront sur la localisation et l'évolution d'éventuels colmatages. La figure 1 donne le schéma des équipements de mesure souhaitables dans toute région à risques de colmatage.

En général, dans les conditions qui règnent en Europe, les mesures doivent être faites en cours d'exploitation, 3 à 4 fois par an, et les graphiques dessinés aussitôt.

Lorsque les prises de pression sont faites dans des tubes d'accès, ceux-ci ne sont pas utiles seulement pour suivre un colmatage, mais aussi pour appliquer par injection des traitements régénérateurs ou inhibiteurs de colmatage ou de corrosion

Tous ces points doivent être examinés avec soin au cours d'enquêtes ou de campagnes de mesures. En principe, si l'on a décelé une baisse du débit, c'est que la mesure était possible. Souvent, les mesures de niveau dans le puits sont impossibles lorsque la pompe occupe tout l'espace disponible, et qu'aucune ligne d'air n'a été installée, par exemple dans des encoches dans les raccords des tubes d'exhaure. Il faut aussi que l'on puisse mesurer la pression du refoulement dans le réseau de distribution à la sortie du puits (manomètres) et que l'on puisse contrôler le régime du moteur (compte-tours).

3. RECHERCHE DES CAUSES DE VIEILLISSEMENT

Lorsque le vieillissement d'un puits ou de son système de pompage a été mis en évidence, il y a lieu d'en trouver la cause et de la localiser.

L'examen physico-chimique de l'eau renseignera sur quelques causes possibles :

- présence de sable, d'argile, ou d'autres produits de colmatage dans l'eau,
- analyse sur place des éléments fugaces,
- prélèvement d'échantillons pour analyse chimique en laboratoire.

Ces examens renseigneront déjà sur le degré de corrosivité de l'eau et sur la nature du colmatage. Il restera à localiser les zones colmatées, ce qui peut se faire par différentes techniques citées selon leur complexité croissante.

3.1. POMPAGE D'ESSAI

Tout d'abord, lorsque la pompe est encore en place, un essai de choc hydraulique (slug test), à comparer avec des essais antérieurs dont il faudrait disposer, renseignera sur la distance de la zone colmatée par rapport à l'axe du puits ; l'allure des courbes dépendra en effet de la situation d'une couche cylindrique colmatée contre les parois du forage (résistance de contact ou réaction de bicouche cylindrique) ou à distance (réaction de milieu homogène). Ces méthodes sont développées dans DEGALLIER et DE MARSILY (1978).

Ensuite, des pompages par paliers à débit croissant ou décroissant, comparés à des essais antérieurs identiques, montreront s'il y a augmentation des pertes de charges anormales dues à l'augmentation de la vitesse de l'eau dans les ouvertures testées libres, ou au contraire si le colmatage est tel qu'il n'y a plus d'ouverture où les vitesses de l'eau peuvent être notables.

3.2. RETRAIT DE LA POMPE

Le pas suivant est le retrait de la pompe et de la colonne de refoulement, qu'on examinera avec soin, surtout si le système de pompa-

ge a pu être rendu responsable de la baisse de production, par les mesures évoquées ci-dessus. La crépine de la pompe peut être colmatée par des produits de corrosion. Le corps de pompe peut avoir été usé par du sable. Le carter peut être corrodé et percé, ainsi que le tuyau de refoulement, notamment près des raccords rendus plus sensibles à la corrosion par les usinages subis.

3.3. DIAGRAPHIES

Après retrait de la pompe, des diagraphies au moulinet, pendant une injection d'eau, renseigneront sur le champ des vitesses dans la zone captée et dans les tubages. Là-aussi, la comparaison avec des mesures antérieures fera apparaître les zones colmatées et les perforations éventuelles des tubages.

De précieux renseignements sont aussi apportés par l'observation du puits par caméras de télévision ou photographies. La corrosion et le colmatage des crépines y sont généralement bien visibles et la couleur des dépôts peut renseigner sur leur nature.

3.4. LES DEPOTS COLMATANTS

Il est fondamental de connaître la nature des dépôts colmatants. Ceux-ci se délitent parfois, et peuvent être retrouvés dans le réseau de distribution, par exemple dans les compteurs, aux endroits où le diamètre des conduites augmente, au robinet de l'utilisateur, derrière les gicleurs des asperseurs, ou dans des trappes à sédiments qui devraient toujours être installées dans les réseaux.

3.4.1. Sable

La présence de sable de calibre inférieur à celui des pores du massif de graviers ou à celui des fentes des crépines ne doit pas inquiéter, car elle peut correspondre alors à une amélioration de la qualité du puits. Cependant, c'est l'indice d'un développement insuffisant, à un débit supérieur de trop peu au débit d'exploitation, pendant une durée trop courte ou par une méthode inadéquate. En outre le sable est un abrasif puissant de dureté 7 vis à vis de l'acier de dureté inférieure à 6. Une teneur en sable de quelques grains par litre, de diamètre inférieur au

millimètre, est capable de mettre hors d'usage une pompe en 1 à 2 ans de service à 50 m³/h, soit en quelques 10 000 heures de service. L'usure est proportionnelle au volume des grains et au cube de leur vitesse. Elle se manifeste aussi dans les crépines, dont elle agrandit les ouvertures, qui laissent passer des sables de plus en plus grossiers.

Si la présence de sable s'accompagne d'une baisse de débit spécifique caractéristique, il se peut qu'il ait rempli une partie du puits et qu'il empêche de ce fait une partie des crépines de fonctionner. Juste au dessus du niveau du sable, la vitesse de l'eau restera trop faible pour enlever tout nouveau dépôt et l'ensablement du puits se poursuivra.

Si la quantité de sable ainsi enlevé au terrain est grande, il y a lieu de vérifier le niveau du massif de gravier s'il en existe, et l'on peut craindre des affaissements de terrain en l'absence de couche résistante dans la série géologique.

Si le sable est plus gros que les pores du massif de graviers, mais plus fin que les fentes des crépines, on peut suspecter le massif de n'être pas en place ou pas homogène. Dans les deux cas, des tassements peuvent s'y être produits.

Si le sable est plus gros que les fentes des crépines, il y a à craindre une usure ou une rupture, de celles-ci. S'il y a aussi baisse du débit spécifique caractéristique, le colmatage d'une partie des crépines peut avoir causé une augmentation de la vitesse dans une autre partie et sa corrosion totale.

Si le sable est abondant, il peut à l'arrêt se sédimenter dans la colonne de pompage et se déposer sur la pompe jusqu'à bloquer tout redémarrage. Si l'on insiste pour démarrer, on risque à ce moment de casser l'arbre de transmission ou de faire brûler le moteur.

3.4.2. Calcaire

La présence de calcaire en grains ou paillettes délités ou arrachés aux crépines est la preuve d'une sursaturation en calcaire qui peut provenir d'un dégazage de CO² libre lors d'un passage trop rapide de l'eau à travers le massif de graviers ou à travers les crépines.

Si le calcaire précipite par endroits, il y a tout lieu de craindre qu'il y ait ailleurs excès de CO_2 et que l'eau soit devenue corrosive. Les deux effets peuvent se produire simultanément dans les crépines : entartrage de calcaire, perforation par corrosion généralement associée à un entartrage supplémentaire par les produits de corrosion.

Dans la crépine de la pompe, dont la surface d'entrée est faible, et a fortiori dans le corps de pompe, les vitesses de l'eau deviennent très grandes et leur gradient près des parois conduit à un cisaillement de l'eau qui entraîne, comme dans un verre de champagne que l'on remue, un fort dégagement de CO_2 .

Ainsi, une eau à l'origine neutre peut devenir acide et corrosive simplement par effet de vitesse, lorsque le CO_2 se redissout après que des carbonates aient précipité, et attaquer corps de pompe, carter de pompe et tuyaux de refoulement, spécialement à la hauteur des raccords, où il peut y avoir rétrécissement et, comme nous l'avons vu plus haut, où le métal a nécessairement été travaillé et soumis à contrainte.

Les incrustations sont en fait rarement purement calcaires, mais le plus souvent, elles consistent en un mélange de carbonates, d'hydroxydes et de sulfates de chaux, de fer et manganèse.

3.4.3. Fer et Oxygène

La présence de fer sous forme de flocons ou de paillettes d'oxydes ou d'hydroxydes est caractéristique de phénomènes de corrosion, parfois difficiles à localiser, dont la cause est toujours difficile à déterminer, et dont l'inhibition n'est pas toujours possible.

S'il n'y a pas de baisse du débit spécifique caractéristique, l'origine la plus probable est dans le système de pompage, ou dans le tubage entre les crépines et l'orifice d'aspiration de la pompe.

Si l'apparition de particules ferrugineuses est associée à une baisse du débit spécifique caractéristique, il y a tout lieu de supposer que ces particules sont un produit du colmatage ou de la corrosion des crépines.

En l'absence d'oxygène, le fer peut être en solution dans l'eau de la nappe, ou provenir de la corrosion des crépines ou tubages. Dans ce dernier cas, sa teneur ne dépasse généralement pas 0,5 mg/l (exprimée en Fe^{++}). Le changement de pH consécutif à un départ de CO_2 suffit à modifier les équilibres entre fer soluble bivalent et moins soluble trivalent, ainsi qu'entre l'oxygène dissous, même à l'état de traces, et les composés oxygénés. Des hydroxydes et oxydes de fer peuvent alors précipiter.

Un apport d'oxygène peut se faire par le forage lui-même en nappe captive, ou en nappe libre aussi par la surface de la nappe au contact de l'air du sol non saturé.

Dans le premier cas, les choses sont aggravées en l'absence de clapet anti-retour dans la colonne de pompage, car alors à chaque arrêt du pompage la colonne d'eau du circuit de refoulement redescend à travers la pompe dans l'espace annulaire entre la colonne de refoulement et le tubage, ainsi que dans la nappe. Des brassages peuvent alors se produire entre l'eau et l'air à sa surface.

Dans le second cas, les choses sont aggravées si les crépines ne sont pas limitées à la partie profonde de la nappe, aussi loin que possible de la surface phréatique où se produit l'oxygénation. Des crépines qui se trouveraient dans la zone de battement de la surface libre, seraient rapidement entartrées par des oxydes de fer.

L'oxygène peut aussi être produit par des bactéries. Ce cas sera étudié plus loin .

3.4.4. Bactéries

De mauvaises odeurs, la présence de flocons, de gels ou de boues peuvent indiquer la présence de bactéries très souvent responsables de baisses de productivité d'ouvrages. Parmi les bactéries qui ont été identifiées, on trouve Crenothrix, Polyspora, Gallionella, Leptothrix sidérocapsa, sidérococcus, désulfovibrio désulfuricans, pseudomonas, des sidéro-ou ferro-bactéries, etc..., ainsi que diverses bactéries mucilogènes qui

ont des besoins nutritifs importants en matière organique, et qui produisent des polysaccharides, masses ou paquets de filaments, parfois entraînés par l'eau, brunissant à l'air et dégageant ensuite des odeurs désagréables.

Il sera à nouveau question de plusieurs de ces bactéries plus loin.

4. LES PHENOMENES DE VIEILLISSEMENT

Lorsque le vieillissement d'un ouvrage est constaté et sa cause principale identifiée, on peut songer à traiter l'ouvrage pour en régénérer au mieux les caractéristiques initiales. Mais une identification plus précise du phénomène contre lequel on veut lutter est indispensable, car certains remèdes mal adaptés ont des effets contraires à ceux recherchés. L'exemple classique est le traitement d'un milieu avec argiles sodiques par des polyphosphates de sodium, qui ne contribue souvent qu'à augmenter le colmatage.

Les cinq principaux facteurs du vieillissement sont liés entre eux et agissent presque toujours simultanément, mais pour la commodité de l'exposé, et aussi pour mieux diagnostiquer leurs effets spécifiques, nous nous proposons de les décrire séparément. Ce sont :

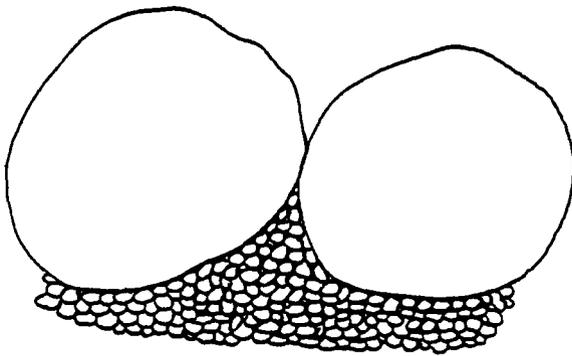
- le colmatage mécanique, où le volume des particules est en jeu,
- le colmatage physico-chimique, où la surface des particules est le facteur prépondérant,
- le colmatage chimique par des précipités,
- le colmatage biologique par action bactérienne,
- la corrosion.

4.1. LE COLMATAGE MECANIQUE

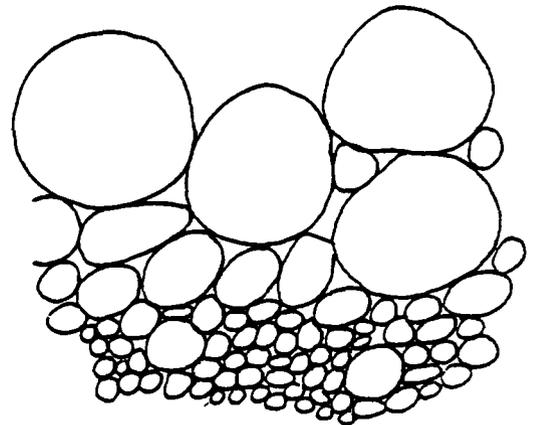
L'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux est souvent appelé filtration, mais ce terme a en fait un sens double puisqu'il désigne à la fois la percolation ou le passage d'une composante du fluide et la rétention d'une autre composante.

La filtration met en présence un fluide contenant des matières en suspension et un ou plusieurs milieux à traverser. Dans un puits, le fluide est l'eau, et les matières en suspension sont arrachées à la roche. L'eau passe de la roche dans le massif de gravier, et du massif de gravier dans la crépine. Entre ces trois milieux, il y a deux interfaces à franchir.

Plus le passage du matériau fin (le terrain) vers le matériau grossier (le massif de gravier) est progressif, plus la perméabilité est grande, et plus les particules en suspension passent d'un milieu dans



Granulométrie à variation brusque :
Les petits pores sont fermés par
les gros grains



Granulométrie à variation progressive :
Perméabilité maximale

FIGURE 2 - Influence de variations de granulométrie
sur la perméabilité

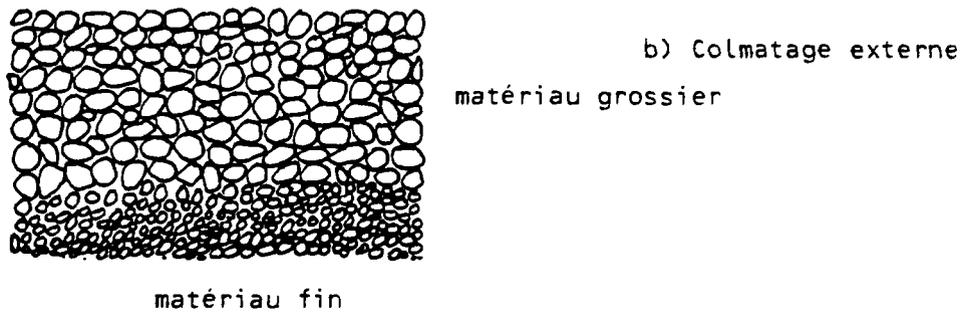
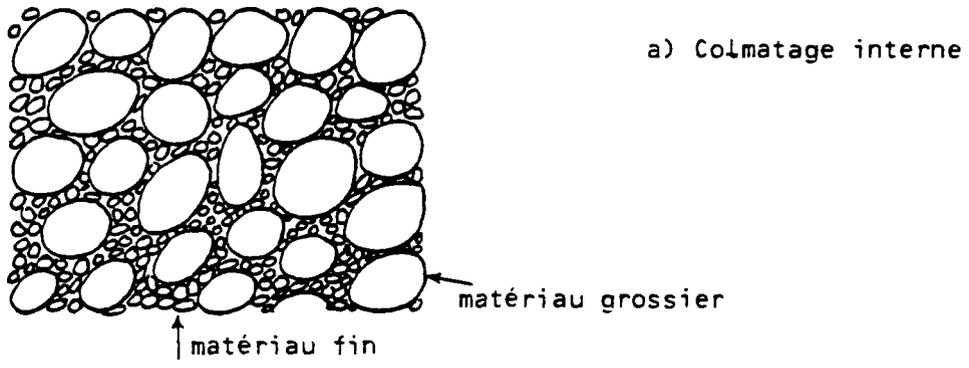


FIGURE 3 - Colmatages interne et externe

L'autre. Plus les granulométries sont différentes, plus grand est le nombre de gros grains fermant de petits pores du matériau fin et plus le passage de l'eau du matériau se limite aux pores restés ouverts en face des plus gros pores du matériau grossier (figure 2).

Si les pores du matériau grossier sont plus grands que certains des grains du matériau fin, ces derniers pénétreront le matériau grossier pour y être éventuellement capturés dans des étranglements ou adsorbés contre des surfaces. C'est le phénomène du colmatage interne, ou de filtration interne ou profonde (figure 3).

Si un fluide contenant des matières en suspension pénètre dans un milieu dont les pores sont plus petits que les matières en suspension, celles-ci seront bloquées à l'extérieur du matériau où elles constitueront un cake tendant à s'opposer au phénomène qui lui a donné naissance. C'est le phénomène du colmatage externe.

Des données plus quantitatives sur les rapports de dimension caractérisant ces phénomènes seront présentées plus loin.

Plusieurs auteurs ont établi des formules pour simuler l'entraînement de particules, en se basant sur la vitesse de passage de l'eau, et en admettant des coefficients dérivés de la loi de STOKES pour l'entraînement ascensionnel de particules. En fait, l'écoulement vers un puits est surtout horizontal, avec parfois des composantes ascendantes ou même descendantes, et l'entraînement des particules peut se produire pour n'importe quelle vitesse de l'eau.

Il y a lieu de distinguer l'arrachage de particules plus ou moins collées ou cimentées entre elles, et leur entraînement. L'arrachage résulte surtout de mouvements alternés de l'eau, imposés lors du développement, et évités lors de l'exploitation.

Dans un milieu poreux, le passage de l'eau est d'autant plus rapide que les pores sont plus grands, mais la rétention de matières en suspension est d'autant plus complète que les pores sont plus petits. Nous essayerons de voir quel est le meilleur compromis qui fournit la meilleure perméabilité tout en retenant la plus grande gamme de dimensions de matériaux en suspension.

Généralement, compte-tenu des vitesses maximales que l'on peut imposer à l'eau pompée et du champ de vitesse qui en résulte dans le terrain autour du puits, on s'impose d'enlever du terrain toutes les matières de calibre inférieur à une dimension que l'on se donne, et d'y maintenir en place, au moyen d'un massif de gravier calibré tout ce qui est supérieur à cette dimension. C'est l'opération de développement.

Cette dimension de coupure est déterminée après analyse granulométrique, en considérant à la fois les impératifs techniques, tels que le calibre des ouvertures des crépines disponibles, et le calibre du gravier ne passant pas au travers de ces ouvertures. Le calibre des particules qui seront retenues sera de l'ordre du calibre des pores, c'est-à-dire de l'ordre du quart du calibre des grains. Ces particules seront retenues à coup sûr, mais selon les auteurs, des particules de calibre jusqu'à 10 fois inférieur à celui du gravier, sont aussi retenues grâce au phénomène de pontage par agglomérat de grains à l'amont de pores plus gros.

Si l'on n'a pas le choix du calibre des fentes des crépines, la durée des opérations de développement dépendra de la proportion de matériaux à enlever dans la zone où la vitesse est suffisante pour l'arrachage et l'entraînement des particules de la roche. La vitesse d'entraînement est inférieure à la vitesse d'arrachage, autrement dit en régime d'exploitation après développement à un débit supérieur, il ne doit plus y avoir arrachage de particules si la roche n'a pas tendance à se désagréger spontanément.

Si l'ouvrage doit fonctionner en pompage et en injection, il faudra éviter le phénomène de pontage qui n'est pas réversible. Le pompage intermittent sans clapet anti-retour donne à chaque arrêt un coup de bélier dans le terrain par réinjection de l'eau contenue dans la colonne

de pompage, et les pontages sont ainsi détruits. Dans ces puits, il est fréquent de voir des venues de sable pendant les premières minutes après les mises en route. C'est une reprise du développement, et les grains de sable peuvent être si nombreux à ce moment qu'il est parfois nécessaire d'écarter cette eau des réseaux de distribution.

4.2. LE COLMATAGE PHYSICO-CHIMIQUE

Certains auteurs (HERBIG et al., 1970) considèrent comme grosses particules celles dont le diamètre dépasse 30μ et pour lesquelles les effets de volume et de masse sont prépondérants par rapport aux effets de surface ou de charge électrique. Ce sont ces particules que nous avons implicitement considérées comme inertes dans ce qui précède sous le nom de sable. Pour des diamètres de l'ordre du micron, les effets physico-chimiques de surface prennent les autres et on parle de particules fines.

En dessous de $0,1 \mu$, il s'agit de colloïdes et ce sont les lois de la physico-chimie des colloïdes qui s'appliquent.

Enfin, entre 3 et 30μ , les deux effets sont d'importance équivalente.

En dehors de leurs effets purement mécaniques sur les particules plus grandes que leurs pores, les filtres ont aussi un effet sur les particules fines, qui subissent de nombreuses interactions avec les surfaces avec lesquelles elles sont en contact. C'est d'ailleurs là l'effet essentiel que l'on demande aux filtres industriels chargés de retenir des flocons de particules colloïdales lors de la purification de l'eau.

Une étude récente (AVOGADRO A., DE MARSILY G., 1983) rassemble les équations proposées par différents auteurs pour décrire le mécanisme de filtration et de rétention des colloïdes.

D'après la plupart des auteurs, la concentration de ces particules dans la solution décroît logarithmiquement avec la distance parcourue dans le filtre, pendant que l'efficacité du filtre se détériore selon une loi semblable en fonction du temps. Mais il n'y a pas accord sur les paramètres de ces modèles mathématiques.

Ces particules fines ou colloïdes peuvent généralement être enlevées mécaniquement par circulation inverse, ou chimiquement par action de produits tels qu'acides, tensio-actifs ou inhibiteurs divers des effets de surface.

4.3. LE COLMATAGE CHIMIQUE

Les deux phénomènes qui peuvent déclencher un colmatage chimique sont le dégagement de CO_2 et l'apport d' O_2 . Le premier entraîne la précipitation de carbonates à partir de bicarbonates, et le déplacement de l'équilibre entre fer bivalent et trivalent, qui conduit à la précipitation d'hydroxydes ferriques. Le second entraîne la formation d'oxydes ferriques insolubles à partir d'ions ferreux dissous dans l'eau ou à partir du fer métallique de l'ouvrage.

4.3.1. Les carbonates

L'incrustation ou entartrage des forages par des carbonates a été abondamment étudié, mais on a fini par s'apercevoir qu'il se produisait très rarement, sinon sous la forme d'un mélange de carbonates, de sulfates, d'hydrates et d'hydroxydes, essentiellement de fer ou de manganèse, et accessoirement de calcium.

Les études de l'équilibre carbonique des eaux se sont développées depuis fort longtemps surtout dans le but de prévenir l'entartrage de chaudières et conduites. On sait maintenant comment mesurer et calculer l'évolution de l'équilibre carbonique en cas de variations de température et de pression. Ces phénomènes sont souvent responsables de précipités de carbonates dans les eaux souterraines, non pas comme on l'a cru longtemps sous l'influence du rabattement de la nappe, mais plutôt sous l'influence de la mise en vitesse de l'eau à l'entrée dans le puits.

A cet endroit en effet, l'écoulement dans le massif filtrant et les crépines atteint une vitesse maximale avec un gradient de vitesse maximal le long des parois des pores ou des fentes des crépines. Le cisaillement de la veine liquide qui en résulte, entraîne le dégagement en bulles des gaz dissous dans l'eau, au premier rang desquels le gaz carbonique libre et le gaz carbonique équilibrant les bicarbonates. Ces

derniers ne sont alors plus stables, et l'eau devient sursaturée en carbonates qui vont précipiter peu à peu généralement non dans le massif filtrant ou les crépines, mais dans le système de pompage et le réseau de refoulement.

Cependant, le gaz carbonique en bulles, une fois l'obstacle des crépines franchi, va tendre à se redissoudre dans l'eau et à redissoudre les précipités de carbonates. Le plus souvent, il se redissout dans l'eau sans avoir le temps de reprendre les carbonates, et l'eau devient momentanément et localement très acide et corrosive vis-à-vis des parties métalliques du puits.

L'incrustation est ainsi indissociable de la corrosion, et peut se produire en même temps. Par exemple, un cas fréquent est la passivation par dépôt de carbonates d'une partie d'une surface métallique tandis que l'autre partie de la même surface est corrodée. Des courants galvaniques prenant alors naissance entre ces deux parties amplifient la corrosion.

Pour limiter l'entartrage autant que la corrosion, qui dépendent tous deux de la libération de CO_2 aux endroits où l'eau est mise en vitesse, on a pensé depuis longtemps à limiter cette vitesse, bien qu'elle n'agisse qu'indirectement sur le colmatage, et seulement sur certains types de colmatage, au point que beaucoup d'auteurs en nient l'influence.

Dans le cas du colmatage chimique, ce n'est pas la vitesse qui agit, ni, ce que certains prétendent à tort le régime d'écoulement turbulent ou laminaire, mais le gradient de vitesse entre filets d'eau voisins, ou gradients de cisaillement de la veine liquide.

Ce gradient est bien proportionnel à la vitesse, mais aussi à la surface spécifique du milieu, c'est-à-dire à l'inverse du carré du diamètre des grains, tandis que la vitesse limite d'écoulement laminaire est proportionnelle à l'inverse de ce diamètre.

En prenant comme vitesse limite celle qui correspond à un écoulement laminaire, avec le nombre de Reynolds inférieur à 1 ou 10 selon les auteurs, il a été remarqué depuis longtemps que l'entartrage et la corrosion qui lui est associée, étaient limités. Mais ces vitesses li-

mites sont très inférieures aux vitesses habituelles dans des forages exploités par pompe, et il n'est pas étonnant alors que le gradient de cisaillement, proportionnel aussi à la vitesse moyenne, soit petit.

Ce qui est vrai dans les massifs de graviers, l'est aussi dans les crépines. En outre, pour la même vitesse moyenne de l'eau dans les crépines de même pourcentage d'ouverture, mais de différentes dimensions de fentes, les gradients de vitesse et les surfaces le long desquelles le cisaillement et le dégazage peuvent se faire, seront beaucoup plus grands dans les fentes les plus fines.

Par exemple, pour un même pourcentage d'ouverture, c'est-à-dire de vitesse moyenne, en diminuant de moitié la largeur des fentes d'une crépine, donc en doublant leur nombre, on double la surface où l'eau est soumise à de forts gradients de vitesse au contact de sa couche limite immobile ; enfin, ces forts gradients sont encore accrus par l'augmentation des frottements, ce qui fait plus que doubler les causes de dégazage du CO_2 de l'eau.

Mais si l'on sait que les limites de vitesses admises sont sans fondement scientifique, qu'elles soient basées sur une valeur du nombre de Reynolds, ou qu'on les limite arbitrairement à 1 cm/seconde, on est encore sans idée sur l'ordre de grandeur à admettre pour ces gradients.

4.3.2. Les dépôts ferrugineux

Les deux principales causes de colmatage sont l'ensablement et le colmatage par les dépôts ferrugineux. Ce dernier est le plus souvent d'origine biologique, et sera alors étudié plus loin. Mais il peut aussi avoir d'autres origines.

En effet le dégagement de CO_2 au passage du massif de gravier ou des crépines, modifie non seulement l'équilibre carbonique de l'eau, mais aussi son équilibre d'oxydo-réduction, faisant notamment varier la solubilité de l'oxygène, du fer et du manganèse.

Des dépôts ferrugineux peuvent alors être intimement mélangés à ceux du calcaire.

Il peut en être de même s'il y a mélange d'eaux provenant de couches différentes avec différentes teneurs en fer et manganèse à l'état soluble, chacune en équilibre avec des teneurs plus faibles des mêmes éléments à l'état peu soluble. Le mélange modifie ces équilibres et il peut en résulter des précipités d'hydrates.

S'il y a apport d'oxygène à une eau contenant des ions Fe^{++} et Mn^{++} , à partir de la surface d'une nappe libre, ou par le trou de forage pour une nappe captive, la production de précipités insolubles oxygénés sera beaucoup plus forte, et le colmatage le plus important se situera aux endroits où l'oxygène est le plus abondant, généralement au sommet des crépines ou à la partie supérieure des forages ou drains horizontaux.

Le colmatage sera très diminué si la tête du puits est rendue étanche à l'air.

Pour des nappes peu épaisses dans lesquelles on risque de dénoyer les crépines par pompage et donc de les exposer à l'oxygène, la méthode "Zima" (1965) est à recommander. Elle consiste à rendre la tête du puits totalement étanche, et à y faire le vide pour faire remonter le niveau de l'eau d'autant.

Contrairement à ce que certains auteurs prétendent, la vitesse de l'eau et son régime, laminaire ou turbulent, n'ont pas d'influence sur le colmatage par apport d'oxygène. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut, la vitesse d'écoulement, par son gradient au voisinage des couches limites immobiles, a une grande influence lorsque le colmatage a pour origine le dégagement de CO_2 .

4.4. LE COLMATAGE BIOLOGIQUE

Il y a plus de 100 ans que des bactéries sidérophiles et mangano-philés, du type crenothrix polyspora, ont été mises en évidence et rendues responsables du colmatage de forages, notamment dans la région de Berlin.

Après une longue période d'oubli, on les retrouve citées au début du siècle, et dans les années 30-40. Ces bactéries (crenothrix associée à gallionella), avaient toujours été considérées comme aérobies,

jusqu'à ce qu'on les trouve dans des conditions où l'oxygène n'existe qu'à l'état de traces (moins de 5×10^{-6} g/l), et sans que de plus fortes teneurs en oxygène en favorisent le développement. Plus récemment encore, on a trouvé qu'au moins pour les genres *Gallionella*, *Leptothrix*, *Siderocapsa*, *Siderococcus*, il semble que les besoins en oxygène soient couverts par une association avec des bactéries sulfato-réductrices. On ne sait cependant pas si l'action de ces bactéries du fer et du manganèse, est directe ou simplement catalytique.

Les études faites à ce jour, et essentiellement celles de KREMS (1972), ont abouti aux conclusions suivantes :

- * Le colmatage biologique affecte tous les matériaux, métalliques ou organiques, mais dans le cas des matériaux métalliques l'action biologique s'accompagne généralement de corrosion.
- * Les produits de colmatage sont essentiellement des composés de fer et de manganèse, sous forme d'incrustations dures ou sous forme de gels.
- * Les bactéries du fer et du manganèse sont le plus souvent responsables du colmatage. Elles sont généralement présentes partout, mais leur développement ne se fait de façon gênante que lorsque le mouvement de l'eau leur apporte des éléments nutritifs, c'est-à-dire du fer, du manganèse, des matières organiques, même en très faibles concentrations.
- * Le pH doit être compris entre 5,4 et 7,2 avec présence de CO_2 , et le potentiel d'oxydo-réduction Eh doit être supérieur à $-10 \text{ mV} \pm 20 \text{ mV}$.
- * Le régime d'écoulement, laminaire ou turbulent, n'a aucun effet sur le développement de ces bactéries, ni la vitesse d'écoulement lorsque les matières nutritives sont en quantité suffisante. Si l'eau est immobile, les concentrations en Fe^{++} doivent être supérieures à 1,6 mg/l et inférieures à 10 mg/l.
- * Le colmatage biologique peut être facilement freiné par des traitements antiseptiques tuant les bactéries, et les puits peuvent être parfaitement régénérés si on les traite avant que les dépôts aient durci.

Les exceptions à ces règles ont été attribuées à l'influence de mélanges d'eaux de qualité différente provenant de couches différentes.

Le colmatage se fait où les conditions de développement des bactéries sont les meilleures, et non systématiquement d'abord à la partie supérieure des crépines, comme c'est le cas pour le colmatage par apport d'oxygène depuis la surface du sol.

Au contraire d'allégations de certains auteurs, le colmatage augmente d'intensité avec le temps, et la perte de rendement s'exprime le plus souvent par une exponentielle.

Le colmatage biologique affecte autant les forages horizontaux et les drains enterrés que les forages verticaux.

Le colmatage biologique ne se fait pas plus dans des puits inexploités que dans le terrain, dans les conditions naturelles lorsqu'il n'y a pas un apport suffisant de matières nutritives aux bactéries ; mais d'autres types de vieillissement peuvent alors se manifester.

4.5. LA CORROSION

La corrosion est un phénomène physico-chimique qui tend à détruire un matériau qui se trouve dans un milieu avec lequel il n'est pas en équilibre. Dans les puits, la corrosion peut affecter toutes les parties métalliques, mais aussi les parties non métalliques notamment à base de ciment. Seules des matières organiques, plastiques ou bitumineuses y sont insensibles.

La corrosion est un phénomène complexe attribuable généralement à plusieurs causes simultanées, par exemple la présence d'eau corrosive à l'intérieur ou à l'extérieur d'un forage, des effets galvaniques entre parties du même ensemble métallique au contact d'eaux de composition différente, ou entre métaux différents non isolés les uns des autres, mais au contact de la même eau, et surtout l'activité de bactéries sidérophiles ou sulfatoréductrices.

Les types de colmatage étudiés ci-dessus ne provenaient que de l'eau pompée et de sa mise en mouvement, sans que des interactions avec l'ouvrage de captage aient été mises en cause. Or des courants électriques prennent naissance dès que l'eau est mise en mouvement et dès que des inégalités apparaissent dans la répartition et dans la direction des pressions, et par conséquent des vitesses de l'eau, dans la composition chimique de l'eau, dans les matériaux de la colonne de captage, et dès que l'un des phénomènes de colmatage étudiés ci-dessus se manifeste de façon non homogène dans et autour des dispositifs de captage.

La somme algébrique de ces courants est couramment mesurée dans les forages avant cuvelage, c'est le potentiel spontané des diagraphies habituelles, ou somme algébrique de trois composantes : le potentiel d'électrofiltration engendré par un fluide qui se déplace dans un milieu poreux immobile, le potentiel osmotique au contact d'électrolytes de nature ou d'activité différente, et le potentiel d'électrode, nul en l'absence de matériau en cours d'attaque chimique.

Avant cuvelage, le second phénomène est généralement prédominant lorsque les résistivités du fluide de forage et de la nappe diffèrent, mais il disparaît lorsque le puits contient l'eau de la nappe, et si elle est de composition homogène.

Bien que non étudiée à ce jour à notre connaissance dans ses relations avec la corrosion des forages, le premier phénomène, l'électrofiltration, pourrait modifier considérablement le troisième, ou potentiel d'électrode, commandant ainsi l'ampleur de l'attaque du métal par l'eau.

4.5.1. Corrosion par attaque acide

Lorsque, quelles que soient les inégalités dans la répartition des courants électriques autour du puits, l'eau reste corrosive vis-à-vis du métal du cuvelage du puits, celui-ci fonctionnera entièrement comme une anode par rapport à une cathode lointaine, et les acides contenus dans l'eau auront tendance à le dissoudre sur toute la surface exposée.

Les acides responsables sont H_2S , H_2CO_3 , et parfois HCl quand celui-ci est le produit d'autres réactions.

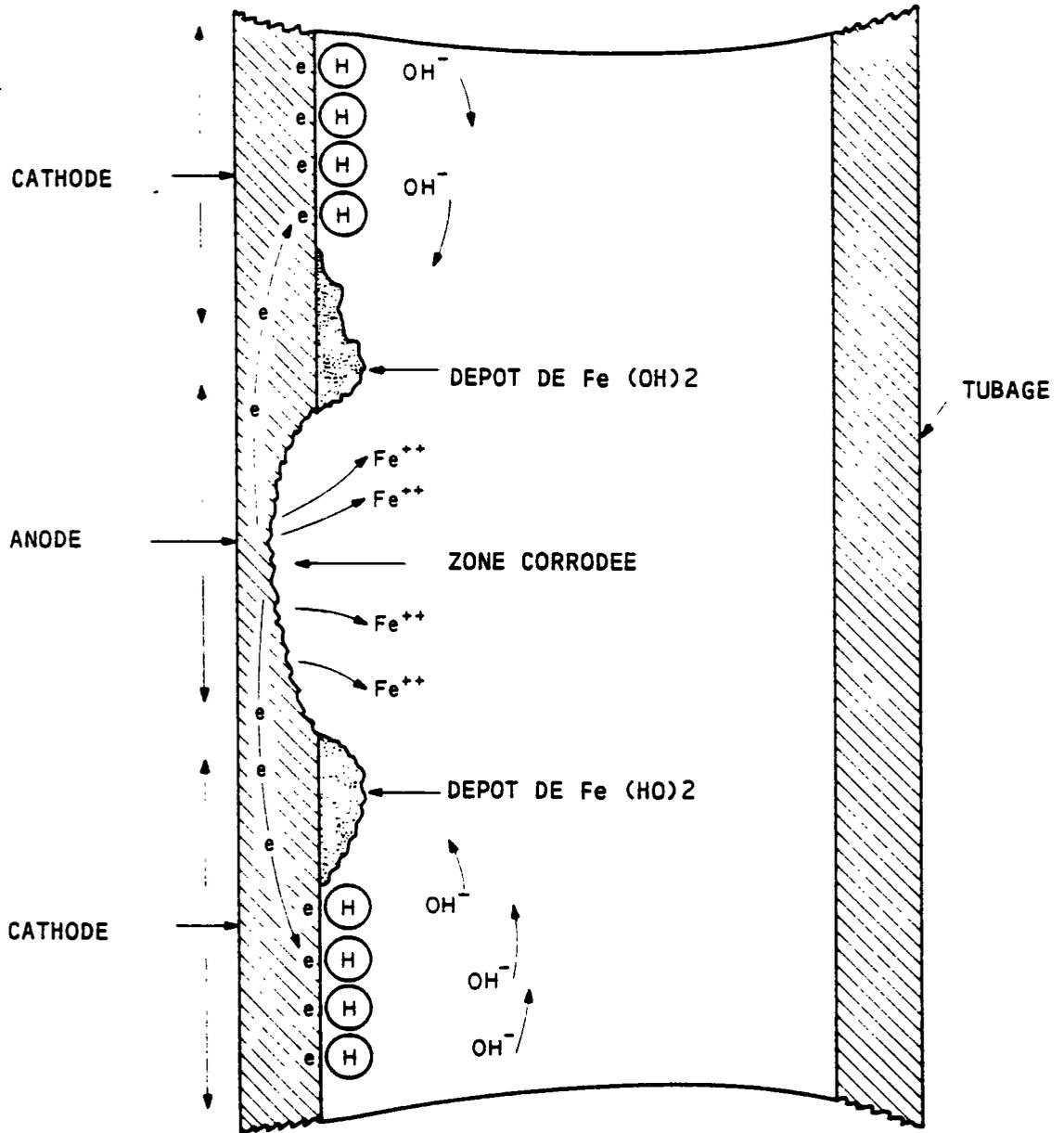


Fig.4 - Processus de la corrosion électrolytique
(d'après CLARKE, 1980)

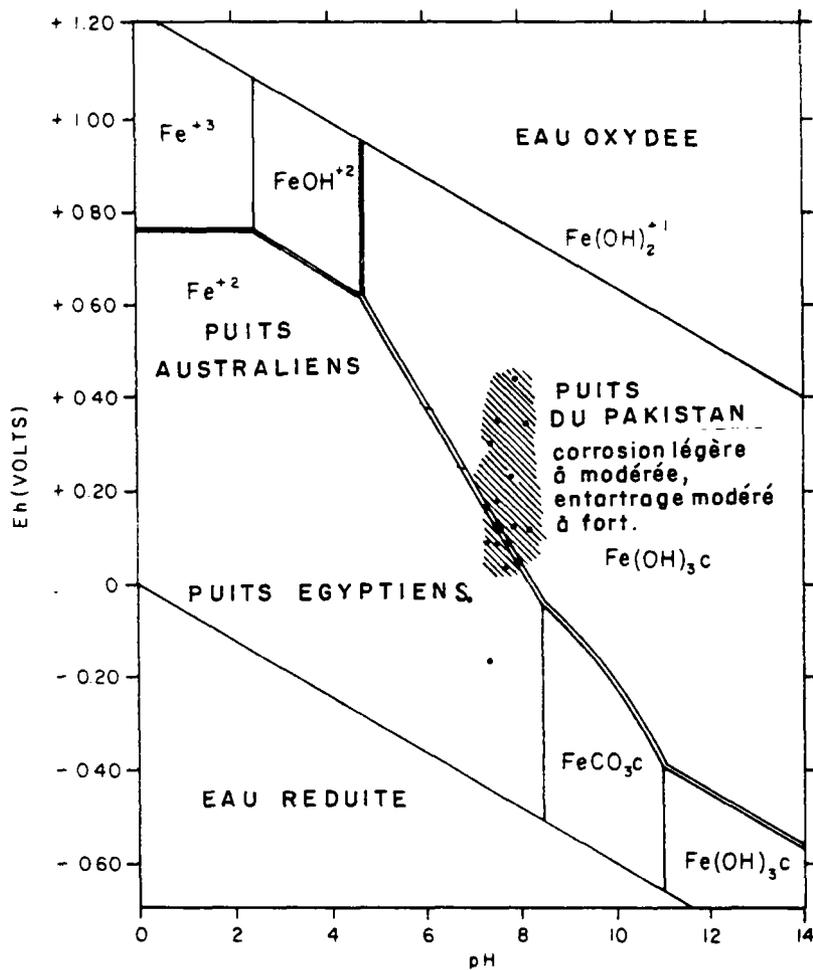


Fig. 5 - DIAGRAMME DE POURBAIX AVEC DONNEES TYPIQUES
(d'après CLARKE, 1980)

De gauche à droite, la corrosion évolue de sévère à légère.

L'attaque par H_2S est généralement limitée par ses teneurs faibles dans les eaux naturelles, mais l'activité des bactéries sulfato-réductrices peut en produire de plus grandes quantités qui sont d'ailleurs l'indice de la présence de ces bactéries, et qui alors peuvent aussi corroder par piqûre.

Les ions H^+ de ces acides sont attirés par les parties cathodiques des éléments métalliques, et y déposeraient un recouvrement gazeux protecteur, si la dépolarisation ne les enlevait au fur et à mesure de leur arrivée.

Si le pH est inférieur à 4, les atomes d'hydrogènes se combinent entre eux pour former de l'hydrogène moléculaire H_2 , s'échappant sous forme de bulles, et laissant la cathode non protégée. Si le pH est commandé par un acide organique tel que l'acide carbonique, le dégagement des bulles de gaz H_2 pourra avoir lieu jusqu'à un pH supérieur à 6.

L'oxygène est aussi un dépolarisant efficace, car il forme de l'eau avec les atomes d'hydrogène.

Le fer métal n'est pas en équilibre avec l'eau, quelle que soit sa qualité. Il aura donc tendance à s'y dissoudre, et l'attaque acide en est un exemple. Mais la dissolution ne se fera que si le produit de l'hydrolyse est soluble, ce qui peut être déterminé si outre le pH on connaît aussi le potentiel d'oxydo-réduction Eh. Ceci est visible sur le diagramme ci-joint (figure 4). On voit qu'il y aura mise en solution dans la plage Fe^{++} , car cet ion est soluble, tandis qu'il y aura plutôt incrustation dans la zone de stabilité de $Fe(OH)_3$, qui est insoluble.

4.5.2. Corrosion par attaque électrolytique

Lorsque l'eau, en raison des inégalités de sa composition ou du fait de sa circulation, n'est corrosive que par endroits vis-à-vis du métal équipant le puits, les courants électriques vont se dépenser dans le métal avec simultanément attaque de parties fonctionnant comme anode, dégagement d'hydrogène H^+ aux parties fonctionnant comme cathode, et dépôt

d'hydrates de fer entre les deux, selon la figure 4 ci-dessus empruntée à CLARKE (1980). Cet auteur a décrit en détail les réactions chimiques qui se produisent à l'anode et à la cathode en fonction des ions H^+ , Na^+ , Ca^{++} , HCO_3^- , Cl^- , OH^- , SO_4^{--} , NO_3^- , accélérant ou ralentissant les phénomènes de corrosion.

Cette corrosion électrolytique est très amplifiée si le métal plongé dans l'eau n'est pas absolument propre, s'il est inégalement recouvert d'incrustations, ou s'il est constitué de parties de métaux différents, non isolées les unes des autres, et ceci d'autant plus que l'eau est plus chargée en sels, c'est-à-dire plus conductrice.

Ces phénomènes sont connus par leurs résultats globaux, mais sans qu'on en ait jamais mesuré séparément les causes sur le terrain, car ils sont toujours plus ou moins associés et liés aux autres formes de colmatage étudiées plus haut, en particulier à celui des bactéries sidérophiles et sulfatoréductrices.

L'ampleur de cette corrosion électrolytique peut difficilement être prédite, car trop de paramètres entrent en jeu. Les mesures qui peuvent être envisagées seraient des diagraphies au moulinet si on pouvait les faire en cours de pompage au débit d'exploitation, ainsi que des diagraphies de polarisation spontanée sans et avec pompage. Le potentiel d'électrofiltration global peut être plus aisément mesuré entre la tête du puits et une électrode de référence placée à quelque distance du puits en faisant la différence entre les mesures avec et sans pompage. Pour que les mesures électriques ne soient pas perturbées, il faut que le puits soit jaillissant ou que le moteur de la pompe soit mécanique et non électrique.

La corrosion électrolytique agit par piqûre du métal et le stade final est la perforation totale de chaque piqûre. Ce type de corrosion est indépendant du pH, mais il peut être très amplifié par les autres processus de colmatage examinés dans les chapitres précédents, et qui peuvent eux dépendre du pH et du potentiel d'oxydo-réduction.

Par ailleurs, à l'effet des courants naturels considérés ci-dessus, s'ajoutent souvent des courants vagabonds, notamment à proximité de pipe-lines, de canalisations métalliques, de lignes de chemins de fer. La corrosion peut alors être très amplifiée.

5. LES TECHNIQUES DE REGENERATION

Ces techniques sont bien moins nombreuses que les combinaisons variées de types de colmatage que l'on rencontre en pratique. On a donc pu croire qu'un traitement passe-partout était efficace partout, et qu'il importait peu de connaître le type de colmatage à traiter.

La plupart de ces techniques ne sont pas nouvelles, mais elles sont périodiquement tombées dans un certain discrédit, faute d'avoir été utilisées à bon escient. Leur mise en oeuvre est un travail d'expert, et il est plus simple et surtout plus sûr de faire appel à un foreur pour construire de nouveaux puits en remplacement des anciens. Cependant, d'après KREMS (1972), le coût de la régénération est seulement de l'ordre du dixième du coût d'un nouvel ouvrage. D'après des recherches systématiques dans les ouvrages d'adduction d'eau de Berlin, cet auteur a montré que seule une combinaison de plusieurs traitements peut donner de bons résultats.

Les différentes techniques à appliquer pour chaque type de colmatage sont exposées en détail par R. BREMOND (1967). Nous ne ferons ici qu'un court résumé, en décrivant chacune de ces techniques indépendamment du type de colmatage auquel elles s'appliquent plus spécifiquement.

5.1. POMPAGE A L'EMULSEUR

Le pompage à l'émulseur est une technique classique, pour créer un appel d'eau très localisé à n'importe quelle profondeur dans le puits. On peut ainsi désensabler le fond d'un forage où le débit est par définition nul lors d'un pompage avec une pompe placée dans le tubage au dessus des crépines, ou solliciter la nappe fortement par passes localisées, à travers les crépines, pour en extraire les particules les plus fines. C'est la technique de base utilisée lors du développement des puits.

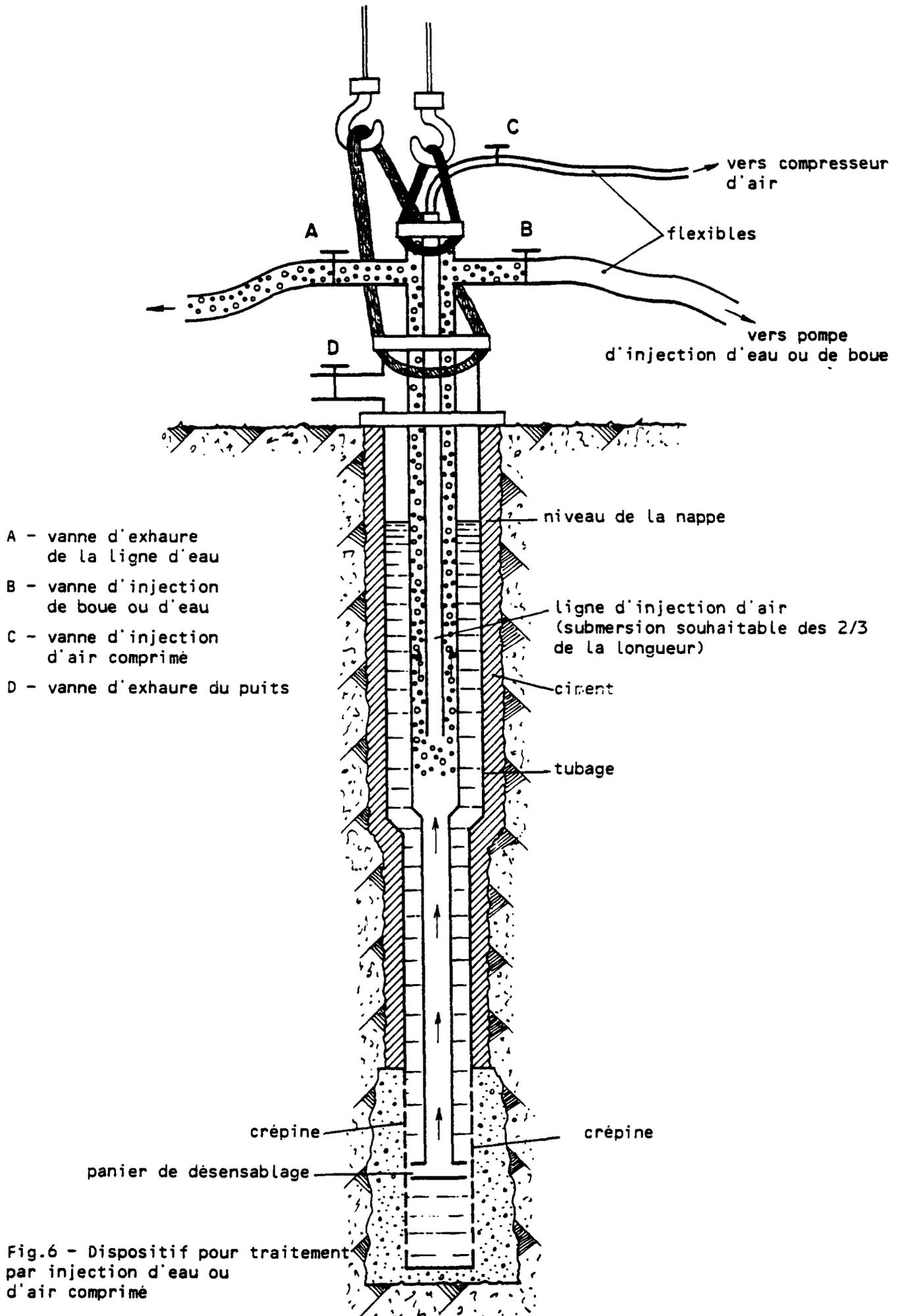


Fig.6 - Dispositif pour traitement par injection d'eau ou d'air comprimé

Le dispositif de la figure 6 est à buts multiples. En ouvrant la vanne d'exhaure A, et en fermant la vanne B (pompe d'injection), on a le dispositif classique avec injection d'air comprimé par la ligne d'air (vanne C), allègement de la colonne d'eau jusqu'à ce qu'elle s'écoule au dehors avec appel des eaux profondes. La position de la vanne D est indifférente dans ce cas.

En fermant les vannes A et C, en ouvrant B et D, on peut injecter boues, eau claire ou produits de traitement à la profondeur choisie. On peut par exemple faire alterner pompage à l'émulseur et lavage à l'eau claire par une simple manoeuvre de vannes. On peut aussi ajouter ou enlever des éléments de la ligne d'eau et de la ligne d'air sans avoir à retirer cette dernière.

Avec un "panier de désensablage", à la base de la ligne d'eau (figure 6), on focalise l'appel ou l'injection d'eau dans une hauteur de crépines aussi étroite que l'on veut.

Si le puits n'est pas trop profond pour la puissance des compresseurs, on peut aussi injecter de l'air comprimé par le panier de désensablage, après avoir fermé les vannes A et B. Mais ces injections devront être de très courte durée, de l'ordre de la minute, et alterner avec le repompage de l'émulsion et des éventuels produits de colmatage arrachés aux crépines ou massif de gravier.

Il ne faut pas oublier que la présence d'air dans un milieu poreux en diminue considérablement la perméabilité. Par ailleurs, de véritables explosions avec destruction du puits peuvent se produire lorsque de grandes quantités d'air se dégagent brusquement au fond d'un puits. De tels accidents étaient fréquents dans des puits d'injection où l'eau était déversée en tête de puits et tombait au fond en y emmagasinant de l'air.

Cette technique est évidemment à proscrire lorsque l'oxygène est responsable du colmatage que l'on veut éliminer.

5.2. PISTONNAGE

Le même dispositif peut encore être utilisé pour effectuer du pistonage à l'air comprimé, à condition que la tête du puits ait été rendue étanche en fermant les vannes A, B et D, et en faisant reposer les tuyaux plus petit sur les plus gros au moyen de collerettes caoutchoutée (figure 5). Il faut s'assurer que la pression de l'air appliquée à la surface des disques d'appui des différentes colonnes d'injection ou de pompage reste inférieure au poids de ces colonnes. Par exemple, une pression de 10 kg/cm^2 appliquée à une surface circulaire de 20" de diamètre peut soulever une masse de 20 tonnes.

On peut alors comprimer l'air au dessus de l'eau refoulant celle-ci dans le terrain, puis en décomprimant l'air lentement ou brusquement si les crépines et les tubages le supportent, on peut provoquer une très grosse venue d'eau capable de remanier le massif de graviers et d'en enlever les particules fines.

Dans les puits peu profonds, il faut éviter que l'oxygène de l'air ne pénètre dans le terrain, car le colmatage en serait augmenté. Si la hauteur d'eau est faible au dessus des crépines, le pistonage ne devra pas être fait à l'air comprimé.

Le pistonage peut être fait mécaniquement, au moyen d'un piston de même diamètre que le tubage ou que les crépines, fixé sur les tiges de forage et manoeuvré au treuil de haut en bas et de bas en haut. Si le pistonage est fait dans le tubage, l'effet dans les crépines se fera comme avec le pistonage à l'air comprimé aux endroits les plus perméables ou les moins colmatés, laissant les autres non développés ou non régénérés. Avec le pistonage mécanique et lorsque les crépines sont jugées capables de résister mécaniquement au passage du piston et hydrauliquement à de fortes vitesses de l'eau autour du piston, on peut pistonner dans les crépines et obtenir un développement du massif de graviers bien plus localisé.

5.3. POMPAGE A LA POMPE

Le développement ou la régénération d'un puits sont souvent fait uniquement par pompage. Ce seront les zones les plus productives qui seront réhabilitées, et non pas les zones colmatées par les éléments fins,

à moins de focaliser l'effet de la pompe dans des zones limitées des crépines, soit en y disposant une prolongation du système d'aspiration de la pompe, soit en limitant entre packers la zone pompée.

On procède en pompant par une série de paliers à débit constant jusqu'à l'obtention d'une eau claire. Il est prudent d'aller jusqu'à un débit de 30 à 50 % supérieur au débit nominal d'exploitation.

Si le sable est abondant lors du pompage, il pourra y avoir usure rapide de la pompe et la méthode à l'air comprimé est alors à recommander.

5.4. DOUBLAGE DES CREPINES

En cas d'usure ou de rupture des crépines, les techniques ci-dessus ne suppriment pas la cause des difficultés, et doivent généralement être complétées par un doublage des crépines, tenant compte de la granulométrie des particules à retenir, avec un second massif de graviers entre les deux crépines.

5.5. PHOSPHATAGE

Le traitement par les phosphates de sodium est peut-être le plus important de tous les traitements, car il s'applique avec succès à des colmatages d'origine variée, mais à la condition que le type de phosphate soit adapté au cas à traiter. En effet, des propriétés différentes de complexation, de séquestration, de solubilisation, de dispersion, caractérisent certains types de phosphates, dont la variété est grande puisqu'on utilise des ortho-phosphates mono-, di- ou tri-sodique, des pyro-phosphates di- ou tétra-sodiques, des tripolyphosphates dont le plus connu est penta-sodique, des polyphosphates à chaînes courtes tels que le tétrapolyphosphate et le pentapolyphosphate, et ceux à chaînes longues tels que l'héxamétaphosphate. Chacun de ces produits n'est stable qu'entre certaines limites de pH, et tend à s'hydrolyser au delà.

Lorsque le colmatage est dû à des particules fines argileuses, les phosphates qui ont un fort pouvoir dispersant peuvent être efficaces, mais encore faut-il que les argiles soient calciques pour que la

dispersion par un produit sodique soit efficace. On associe souvent un phosphate dispersant à un phosphate complexant, et différents produits sont ainsi commercialisés sous le nom de Calgon (USA) ou de Giltex (France). Il faut connaître la nature de l'argile, pour connaître le pH auquel elle disperse ou floccule, mais c'est surtout l'ion adsorbé, Na ou Ca, qu'il importe de connaître. Comme on ne dispose généralement pas de telles analyses d'argile, il a été expérimenté que lorsque Ca est prédominant dans l'eau supposée en équilibre chimique avec le milieu, la défloculation réussit tandis qu'on n'obtient pas d'amélioration lorsque Na prédomine. Lorsqu'on ne dispose pas d'analyses d'eau, une détermination sur place des pH, Eh, TH, TA, TAC (1) et des teneurs en Cl^- , CO_2^{--} (1), peut se faire, et on a ainsi pratiquement tous les éléments principaux de l'analyse.

Si $r\text{CO}_3\text{H} < r\text{Cl}$ et $r(\text{Ca}+\text{Mg}) > r\text{Na}$ (2), le traitement par les polyphosphates de sodium pourra donner des résultats.

Dans le cas contraire, le traitement sera plutôt à faire par acide chlorhydrique.

Les polyphosphates peuvent aussi être utilisés pour ramollir et même dissoudre des incrustations carbonatées. Une dose de 2 mg/l de métaphosphate est suffisante pour maintenir en solution des quantités de carbonates et bicarbonates de Ca très au-dessus des teneurs usuelles des eaux naturelles. Cette dose est suffisante pour inhiber tout dépôt, et conforme aux normes de l'O.M.S. pour l'eau de boisson.

(1) pH = acidité ; Eh = potentiel d'oxydo-réduction ; TH = titre hydrotimétrique ; TA = titre alcalimétrique temporaire ; TAC = titre alcalimétrique complet ; Cl^- = teneur en chlorures ; CO_2^{--} = teneur en anhydride carbonique.

(2) Le préfixe r indique que les symboles qui suivent sont exprimés en milliéquivalents.

5.6. BROSSAGE ET GRATAGE

Le brossage et le grattage mécanique avec un "hérisson" ressemblant aux outils utilisés par les ramoneurs, n'est efficace qu'à l'intérieur des tubages et crépines, et si les incrustations ne sont pas dures ou ont été ramollies par d'autres traitements. Les déblais sont ensuite évacués par pompage, notamment à l'émulseur.

5.7. TIR A L'EXPLOSIF

Le tir à l'explosif est parfois efficace pour décoller des incrustations. On fait exploser de petites charges placées à intervalles réguliers le long de l'objet à traiter, de façon qu'elles engendrent une onde de choc continue, d'énergie suffisante pour désagréger les dépôts, mais suffisamment faible pour ne pas endommager les tubes et crépines.

5.8. ACIDIFICATION

Le traitement à l'acide chlorhydrique est le traitement le plus connu et le mieux adapté à la dissolution d'incrustations calcaires ou ferrugineuses, ou à la mise en suspension d'argiles sodiques, mais les déboires sont nombreux si des précautions ne sont pas prises pour maintenir en solution les oxydes de fer et d'alumine (pH à maintenir inférieur à 3), pour solubiliser les sulfates (pH supérieur à 5), et pour inhiber l'attaque des métaux.

Les inhibiteurs de corrosion des métaux du circuit d'injection de l'acide sont des polyamines et thiophénols arsénicaux dont l'effet dure quelques heures, mais qui sont à proscrire dans des puits d'adduction d'eau potable.

Le fer et l'alumine peuvent être maintenus en solution à des pH supérieurs à 5, à condition de mélanger à l'acide des agents "séparateurs", tels que le tartrate double de potassium et de sodium, l'acide lactique, ou l'acide citrique.

Pour dissoudre les sulfates de Ca, on ajoute du bifluorure d'ammonium.

La dissolution des carbonates est très rapide et l'acide est neutralisé à 95 % en 50 minutes, à 25°C en présence de dolomie. Une température plus élevée de 10°C diminue de moitié le temps de réaction. Il est donc inutile et nocif de laisser agir l'acide plus d'une heure, ce qui est à tort souvent recommandé en pratique. De plus, les effets secondaires gênants cités ci-dessus qui imposent l'adjonction d'adjuvants, ne se manifestent généralement pas dans cet intervalle de temps.

Plus l'acide sera dilué, plus les produits de dissolution seront fluides, et plus leur enlèvement sera facile.

L'anhydride carbonique, sous forme de neige carbonique, est utilisé au même titre que l'acide chlorhydrique, souvent en mélange, surtout pour solubiliser les carbonates. Ajouté à l'acide chlorhydrique, il en retarde l'effet.

5.9. STERILISATION

On s'est aperçu que l'adjonction de stérilisants aux produits cités plus haut en augmentait le rendement, ce qui indiquait que les bactéries jouent un rôle non négligeable dans beaucoup de types de colmatage.

La stérilisation périodique des ouvrages doit être faite pour empêcher la formation de produits colmatants indurés. Si les bactéries peuvent s'immuniser contre des produits qui perturbent leur métabolisme, elles ne le peuvent pas contre le chlore qui les brûle, et ne résistent pas à une température supérieure à 50°C pendant quelques minutes.

Les produits les plus utilisés sont le chlore à la dose moyenne de 1 g/l, ou sous forme d'hypochlorite de calcium ($\text{Ca}(\text{ClO})_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) et des ammoniums quaternaires variés plus faciles à manier. L'hypochlorite de sodium, le permanganate de potasse, etc... sont aussi utilisés, mais sans avantage sur les produits ci-dessus.

5.10 PROTECTION CATHODIQUE

La protection cathodique consiste à injecter en permanence dans les parties métalliques corrodables du puits un courant électrique égal et de sens contraire à celui qui accompagne la corrosion.

Lorsque la corrosion est localisée par exemple aux brides de tuyaux de refoulement, ou aux filetages de tubes et crépines, on peut associer aux pièces en danger un métal situé plus haut dans la série électrolytique, sur lequel la corrosion se déplace.

Lorsque toute la colonne de captage subit une corrosion anodique, on peut la passiver en la doublant d'une colonne qui, elle, sera corrodée.

On peut aussi injecter un courant électrique, mais les puissances à mettre en jeu sont importantes, plusieurs kilowatts, puisqu'elles correspondent à l'électrolyse du fer dont des quantités de l'ordre de 1 kg par jour peuvent être mises en solution dans un forage de 500 m moyennement corrosif.

5.11 MISE EN OEUVRE

L'ordre dans lequel certaines de ces opérations sont faites dépend du type de colmatage à combattre.

En cas d'ensablement, ce seront les techniques habituelles utilisées lors du développement des puits qui seront appliquées, comprenant alternances de lavage à l'eau claire et de pompage à l'émulseur à l'intérieur des crépines, pistonnage mécanique ou à l'air comprimé, pompage par paliers, et enfin doublage des crépines s'il y a eu rupture.

En cas de colmatage par des particules fines, après lavage à l'eau claire, on alternera les traitements au polyphosphates avec les opérations ci-dessus, avec l'injection d'eau sous forte pression dans les crépines, et avec l'acidification.

Les entartrages et incrustations seront traités par tir à l'explosif, polyphosphatages, brossage et grattage, acidification,

avant de nettoyer le trou et ses environ par pompage à l'émulseur, injection d'eau sous pression et pompage.

En cas de colmatage biologique, l'évacuation des produits de colmatage par brossage, puis traitement à l'acide, doit être fait avant la stérilisation, car les bactéries ne sont plus alors protégées par leur gangue ferrugineuse. L'injection d'eau sous pression contribuera à laver le massif de graviers des cadavres des bactéries, et les pompes à l'émulseur ou à la pompe feront le nettoyage du trou.

La corrosion est justiciable de traitements semblables, pour enlever les produits de corrosion qui peuvent boucher les crépines, tuer les bactéries qui peuvent être présentes. Si on ne peut régénérer le métal enlevé par la corrosion, on peut diminuer l'intensité de la corrosion par protection cathodique.

6. PREVENTION DU COLMATAGE

La prévention du colmatage ou de la corrosion dépend de la connaissance préalable des conditions hydrogéologiques locales et de la façon dont on peut ensuite adapter à ces conditions matériaux et techniques de construction d'ouvrages.

L'acquisition de cette connaissance préalable se fait généralement de façon progressive par l'application de plusieurs méthodes successives, parmi lesquelles on peut citer :

- reconnaissance hydrogéologique,
- forages de reconnaissances pour caractériser la couche aquifère et forages d'exploitation pour caractériser la réponse de la nappe,
- élaboration de l'avant-projet : évaluation des risques de colmatage, de corrosion, d'épuisement de la nappe, définition des matériaux.

6.1. RECONNAISSANCE HYDROGEOLOGIQUE

La reconnaissance hydrogéologique dans une région encore inexploitée consiste à établir la coupe géologique, à y détecter les couches aquifères, leur profondeur, et les caractéristiques probables de leurs nappes d'après les caractéristiques régionales : qualité, pression, température d'après le degré géothermique, et la recharge d'après le climat.

L'inventaire est le stade suivant quand des puits existent déjà dans des nappes voisines ou dans la nappe qu'on se propose de capter. Des données plus précises seront obtenues sur les débits, rabattements, niveaux de la nappe, transmissivités, profondeurs, diamètres, types et qualité de tubages, crépines, pompes et surtout sur la qualité de l'eau, par analyses de laboratoire et sur place. On observera aussi dans l'eau les teneurs en matières en suspension telles que sable, argile, ou produits de colmatage ou de corrosion.

On pourra à ce moment dresser l'avant-projet d'une coupe technique répondant aux objectifs de production que l'on se donne, et aux impératifs de diamètre et de profondeur de pompe, de tubage et d'avant-puits ou de chambre de pompage.

6.2. FORAGE DE RECONNAISSANCE ET D'EXPLOITATION

Si les caractéristiques envisagées sont nouvelles dans la région, un forage de reconnaissance, éventuellement transformable en forage d'exploitation, devra être fait.

La coupe géologique sera vérifiée, mesurée par diagraphies. Les types d'argiles au voisinage ou dans la nappe seront déterminés. Les prélèvements de sable pour analyse granulométrique devront être fait avec un soin tout particulier, soit par carottage mécanique si la formation n'est pas meuble, soit selon la technique suivante :

- circulation de boue jusqu'à ce qu'aucun cutting n'apparaisse plus,
- reprise du forage en échantillonnant tout le fluide de circulation, par exemple 1 litre toutes les 5 minutes, pendant toute la durée de la passe de forage, et ensuite jusqu'à ce que la boue ne contienne à nouveau plus aucun cutting. Le mélange de boue et de cuttings de dimensions variées est ensuite dilué à l'eau, lavé, et l'eau claire en surface écrémée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de boue, mais en conservant toute la gamme granulométrique, sauf peut-être les parties aussi fines que l'argile de la boue. L'analyse granulométrique sera ensuite faite sur cet échantillon éventuellement après quartage.

Toute la traversée de la couche aquifère devra être échantillonnée de la sorte, par passes d'1, 3 ou 6 mètres selon l'homogénéité de la formation. Les courbes granulométriques seront alors dessinées et leurs paramètres déterminés.

Granulométrie

Le calibre des grains à enlever, en principe d10 ou d15 (1), déterminera le calibre du gravier, 4 à 5 fois plus grossier, et la dimension des fentes des crépines, plus étroites que le plus petit diamètre du gravier.

(1) d10 (ou d15) signifie que 10 % (ou 15 %) de l'échantillon est constitué de grains de diamètre inférieur à d.

Si l'on aboutit ainsi à des crépines à fentes trop petites, impliquant des gradients de vitesse incompatibles avec le maintien en solution du CO_2 , ou à des dimensions de crépines non disponibles sur le marché, on acceptera d'enlever un pourcentage de terrain plus grand que celui de 10 à 15 %, jusqu'à ce que le diamètre limite corresponde aux crépines disponibles. La durée et le coût du développement en seront augmentés, mais la réduction du colmatage et de la corrosion ensuite pourra cependant rendre l'opération bénéficiaire.

Dans une formation multi-granulométrique, on peut aussi envisager un auto-développement, ce qui consiste à obtenir un massif de gravier à partir de la formation captée elle-même, en enlevant par pompage ses éléments les plus fins. D'après ALLEN HAZEN, la granulométrie du terrain doit être telle que :

- le diamètre effectif d_{10} soit plus grand ou égal à 0,25 mm,
- le coefficient d'uniformité d_{60}/d_{10} doit être plus grand ou égal à 2.

Il faut aussi que le terrain contienne des couches non meubles, qui sont nécessaires pour empêcher les effondrements de terrain par suite de l'enlèvement de grandes quantités de particules fines.

La première condition interdit l'auto-développement dans des sables fins ou silts, et la seconde exige une formation multi-granulométrique. Selon les auteurs, les dimensions à donner aux crépines vont de d_{80} à d_{50} . Lorsque du sable supérieur à ces calibres sera bloqué contre les crépines, les particules supérieures à 0,25 mm seront efficacement retenues.

Lorsque l'une de ces conditions n'est pas satisfaite, un massif de graviers doit être mis en place, avec deux fonctions :

- augmenter la perméabilité autour des crépines, si le volume des vides du gravier est au moins égal à celui du terrain,
- maintenir le terrain en place, après qu'on en ait enlevé les particules les plus fines passant dans les pores du gravier.

Le gravier doit toujours être mono-granulométrique, pour avoir la perméabilité maximale. Les pores ont en principe une dimension de l'ordre du quart du diamètre des grains, qui doivent donc avoir un diamètre de l'ordre de 4 fois celui des grains de la formation à maintenir.

Si la formation est mono-granulométrique, avec un coefficient d'uniformité d_{60}/d_{10} compris entre 1 et 2, il n'y aura pas de particules fines à enlever, et le gravier servira à augmenter la perméabilité dans la zone de mise en vitesse de l'eau autour des crépines, et à maintenir le terrain.

Si la formation est multi-granulométrique, le coefficient d'uniformité sera supérieur à 2, et un développement sera nécessaire pour enlever les matériaux fins de la formation jusqu'à un diamètre de l'ordre du quart de celui des grains du massif de gravier.

Les crépines devront avoir des ouvertures inférieures au calibre du gravier.

Même quand le système filtrant est bien dimensionné, on ne peut empêcher des particules fines d'être mises en mouvement et d'être piégées dans le massif filtrant, dans les pores en cul de sac et dans les étranglements.

Différents traitements régénérateurs peuvent alors être proposés (voir plus haut).

6.3. POMPAGES D'ESSAI

Dans un forage de reconnaissance, les pompages d'essai sont destinés essentiellement à fournir la possibilité d'analyser de l'eau sur place, le prélèvement d'un échantillon d'eau pour analyse en laboratoire et une mesure de la pression de la nappe au repos.

Si l'ouvrage de reconnaissance est transformé en un puits d'exploitation après tubage, crépinage, gravillonnage, développement, on se trouve reporté au cas suivant.

Dans un forage d'exploitation, les pompages sont généralement faits lors de la réception de l'ouvrage dans le but d'obtenir en quelque sorte la carte d'identité de l'ouvrage, à laquelle on comparera les performances ultérieures.

L'opération consiste généralement à pomper par paliers de 1 à 4 heures, si possible séparés par des arrêts de durée analogue, à des débits croissants par tiers jusqu'à $\frac{4}{3}$ du débit nominal garanti par le constructeur.

Des mesures systématiques de débit, de niveau, de température, et de teneur en sable doivent être faites. Si la température initiale au début d'un palier de débit diffère de plus de 2°C de celle mesurée à la fin du même palier, il y aura à craindre des variations gênantes de la densité de la colonne d'eau, et par suite des erreurs systématiques dans les mesures de pression, et il y aura lieu de reprendre le palier au même débit après un arrêt d'une heure. Un tel pompage intermittent est généralement efficace pour rendre négligeables les perturbations thermiques du niveau de la nappe, car l'évolution thermique d'un puits est beaucoup plus lente que son évolution hydrodynamique.

L'eau devra être exempte de sable même au démarrage de chaque palier de débit, sauf du dernier, où le débit est supérieur au débit garanti, et où l'on peut en tolérer quelques grains.

Si l'eau contient du sable, sa densité peut être très différente de celle de l'eau claire. Par exemple, une hauteur de 1 m de sable qui se sédimenterait au fond du puits, après l'arrêt de pompage, avec une densité de 2, correspondrait à une variation de niveau de l'ordre du mètre, qui se superposerait à la remontée de pression de la nappe, dont l'interprétation serait totalement perturbée.

Une fois que des mesures de débit et de niveau fiables sont obtenues, leur interprétation les transformera en des paramètres indépendants des conditions de l'essai, à condition de tenir compte en même temps de tous les paliers de pompage, et d'une fonction mathématique qui conviennent au type de nappe captée, libre, semi-captive ou captive, pénétrée partiellement ou non.

S'il y a risque de colmatage, il est impératif de disposer de dispositifs d'accès au fond du trou en présence de la pompe, d'accès au massif de graviers et d'accès à la nappe à quelque distance du puits, au moyen de tubes dans lesquels on puisse faire non seulement des mesures de niveaux, mais aussi des injections de produits inhibiteurs de colmatage ou de corrosion (figure 1).

L'évolution des pertes de charges entre ces points de mesure sera dûe à l'évolution du colmatage, qui peut ainsi être localisée.

6.4. LES ANALYSES D'EAU

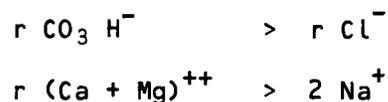
Les analyses d'eau, faites sur place ou en laboratoire, peuvent révéler quelles seront l'agressivité de l'eau vis-à-vis du calcaire ou sa tendance à colmater par entartrage, et sa corrosivité vis-à-vis des métaux ou du ciment.

Nous ne traiterons ici, brièvement d'ailleurs, que ce qui, dans une analyse d'eau, peut être en relation avec un vieillissement d'ouvrages de captage.

L'équilibre carbonique des eaux, ou plutôt le déséquilibre carbonique, commande à la fois l'agressivité de l'eau vis-à-vis du calcaire ou au contraire la tendance à entartrer et la corrosion des métaux. Cette dernière dépend aussi de nombreux autres facteurs. L'équilibre carbonique des eaux a été abondamment étudié, essentiellement pour lutter contre l'entartrage des chaudières. Les principaux résultats expliquent les rares cas d'incrustations de forages rencontrés par R. BREMOND (1965) en Afrique Occidentale.

En quelques mots, le pH mesuré est comparé à un pH dit d'équilibre, calculé en fonction des teneurs en anions et cations. L'eau sera incrustante si le pH d'équilibre est inférieur au pH, et agressive au calcaire dans le cas contraire.

En cas de présence d'argiles dans la couche aquifère, le traitement par les polyphosphates de sodium sera efficace si :



Si la seconde condition n'est pas réalisée, les résultats seront aussi positifs, mais moins spectaculaires.

La présence de Fe^{++} et d'oxygène dissous O_2 indique une prédisposition au colmatage par les oxydes de fer.

Le développement de bactéries est favorable dans les conditions de pH et de Eh précisées plus haut (page 27). Il n'est pas nécessaire que les aliments des bactéries, c'est-à-dire l'oxygène, le fer, des matières organiques, soient décelables pour que les bactéries se développent dès que le mouvement de l'eau leur en apporte des quantités suffisantes.

En cas de traitement par acidification, les teneurs en fer, alumine, et sulfates doivent être connues dans l'eau et dans la roche, afin que des produits inhibiteurs de colmatage puissent être dosés.

Lors de stérilisation à l'eau de Javel, il ne faut pas oublier que le pH doit être élevé, supérieur à 7, sinon il vaut mieux prendre de l'hypochlorite de calcium $Ca(ClO)_2 \cdot 2 H_2O$.

Pour l'évaluation de la corrosivité de l'eau, les choses sont beaucoup plus complexes. Un exemple concret est présenté pour montrer comment diverses conclusions peuvent être obtenues.

Le tableau 2 présente des mesures obtenues sur place et en laboratoire.

La présence d'oxygène dissous est peu compatible avec celle d' H_2S , et peut provenir d'une contamination de l'échantillon lors de l'analyse, même si des précautions nombreuses ont été prises à cet égard.

Si l'on admet la présence d' O_2 dissous, l'eau est alors un mélange d'une eau réductrice capable de dissoudre du fer à l'état ferreux et d'une eau capable d'oxyder le fer à l'état ferrique. La teneur mesurée de 3,4 mg/l n'est pas éloignée ici de la teneur à saturation de 7 mg/l à 37°, s'il y a mélange à parts égales d'eau oxydante et réductrice sans que ces deux parts aient eu le temps de réagir mutuellement.

Géologiquement, un tel mélange est fort possible avec des eaux ayant été au contact avec des faciès rouges.

Exemples d'analyses d'eau

	sur place	en laboratoire
Température (°C)	37 °C	
Conductivité électrique (mS/cm)	0,78 mS/cm	0,752 mS/cm
pH	6,65	
E	-80 mV	
d'où Eh	+143 mV	
Ca + Mg (en CaCO ₃)	253 mg/l	233 mg/l
Ca		65 mg/l
Mg		17,1 mg/l
Na		80,5
K		13,8
Fe	2 mg/l	0,87 mg/l
O ₂	3,4 mg/l	
CO ₃	0	0
HCO ₃ ⁻	158,6 mg/l	153 mg/l
(ou en CaCO ₃)	130 mg/l	
Cl		110 mg/l
SO ₄		140 mg/l
NO ₃		4,6 mg/l
CO ₂ libre	19 mg/l	
H ₂ S (teneur inférieure à la limite de la méthode)	odeur	
Résidu sec		458 mg/l

On note un dépôt d'oxydes de fer dans le canal d'irrigation. Quelques flocons de Fe₂ O₃ sont transportés par l'eau avec quelques rares grains de sable fin.

Le pH a été mesuré dans la veine liquide au débouché du tuyau d'exhaure. La position de l'électrode dans la veine peut avoir de l'influence, mais on s'est assuré qu'elle était négligeable en l'inclinant en tous sens dans le courant et à contre-courant. La stabilisation de la réponse du voltmètre s'est faite très lentement en une vingtaine de minutes.

Il en a été de même de la mesure du potentiel de l'électrode Ag/AgCl /Pt utilisée pour l'étude de l'oxydo-réduction. La valeur lue (-80 mV) a été ensuite rapportée à ce qu'elle aurait été par rapport à une électrode d'hydrogène à la température de l'eau (37°C), soit +143 mV.

Le dosage du CO₂ libre a été fait à plusieurs reprises, et la valeur finalement retenue est encore certainement très sous-estimée, car une forte baisse de teneur apparente se manifestait en quelques secondes lorsque le dégagement gazeux n'était pas bloqué assez vite par l'introduction des réactifs. Par le calcul basé sur la mesure du pH et de HCO₂⁻, on arrive à une teneur de 57,1 mg/l, certainement plus proche de la vérité.

6.5. LES RESULTATS

Les teneurs de certains constituants mesurés par l'analyse d'eau peuvent être directement révélatrices de conditions corrosives.

6.5.1. H₂S

L'odeur d'H₂S, même quand la teneur est inférieure au seuil de détectabilité par analyse, ce qui fut le cas avec la méthode de terrain appliquée, est révélatrice d'une eau réductrice capable de dissoudre le fer. De plus, H₂S est un agent de corrosion direct du fer, et de certains alliages au cuivre, tel que le "red brass".

H₂S est aussi souvent l'indice de la présence de bactéries sulfato-réductrices qui peuvent être responsables de corrosion perforante en plus de l'attaque générale par le sulfure.

6.5.2. O₂

S'il se confirme que l'oxygène mesuré vient bien de la nappe et non d'une contamination lors de l'analyse, il y a lieu de craindre une forte corrosion par oxydation, mais qui peut par endroits inhiber l'attaque par H₂S.

6.5.3. CO₂ libre

La teneur mesurée (19 mg/l), et a fortiori la teneur calculée (57 mg/l), est très corrosive pour le fer et l'acier, et tout spécialement aux endroits où le dégagement de bulles est maximal à cause d'une mise en vitesse de l'eau, c'est-à-dire dans les crépines, dans le corps de pompe et à la base de la colonne de refoulement. Les alliages au cuivre sont aussi particulièrement menacés.

6.5.4. Fe

La teneur mesurée (2 mg/l), supérieure à ce qui pourrait déjà provenir de la corrosion du tubage (au maximum 0,5 mg/l), indique des conditions profondes réductrices et dissolvantes pour le fer. Ceci est confirmé par la coloration rouge que l'eau donne au canal d'irrigation dès qu'elle est au contact de l'air.

6.5.5. Diagramme pH-Eh

Les diagrammes de Pourbaix indiquent les champs de stabilité d'éléments variés et de leurs composés usuels. Pour le fer, le point représentatif de notre eau se trouve dans le champ de stabilité du fer dissous à l'état ferreux, mais non loin du champ où la corrosion pourra être inhibée par des produits d'oxydation incrustants. Une corrosion rapide de la fonte de fer, du fer et de l'acier doux est à craindre.

6.5.6. Indice de Langelier (I_L)

Cet indice caractérise la tendance d'une eau carbonatée calcique à être corrosive pour le métal, agressive pour le calcaire, ou incrustante. Il était égal à l'origine à la différence entre le pH mesuré et le pH obtenu après saturation par de la calcite. Il a été amélioré ensuite pour tenir compte des autres sels en solution, et peut être ob-

tenu à partir de graphiques dans lesquels on introduit les teneurs en Ca, en HCO_3 , en résidu sec, et la température. La valeur obtenue est ici : $I_L = 1,5$, et indique que la corrosion, bien que modérée, ne sera pas inhibée par une incrustation protectrice.

6.5.7. Indice de Ryznar (I_R)

Cet indice a été défini dans le but d'évaluer quantitativement les entartrages à partir d'analyses standard, mais est réputé pouvoir être aussi utilisé pour évaluer la corrosivité. Il ne met théoriquement pas en jeu des grandeurs différentes de l'indice de Langelier, mais donne plus de poids au pH de saturation. Le calcul se fait aussi au moyen d'abaques, et on a obtenu ici : $I_R = 8,1$ qui indique qu'il n'y aurait à craindre ni forte corrosion, ni forte incrustation.

Dans les études de corrosion, c'est toujours l'argument du plus grand danger qu'il faut retenir et non pas l'indication de grandeurs plus ou moins moyennées.

Ici les résultats du diagramme pH-Eh seront fortement aggravés par les effets directs du CO_2 libre, du H_2S , et de O_2 .

La fonte de fer, le fer doux (Armco) ainsi que tous les alliages au cuivre, sont à exclure partout. L'acier doux (mild steel) peut être accepté pour le tubage de la chambre de pompage et à la rigueur pour celui de la colonne de captage, mais seul l'acier inoxydable conviendra pour les crépines. Des raccords isolants devront être prévus pour éviter tout couple galvanique entre variétés différentes de métal.

La corrosion extérieure des tubages peut être limitée par cimentation sous pression après un bon centrage dans un espace annulaire d'au moins 7,5 cm (diamètre du trou supérieur de 15 cm au diamètre du tube).

En raison de la teneur en CO_2 libre, les bols, turbines, paliers et axes de pompe devront être en alliages exempts de zinc et de cuivre.

L'enveloppe de la pompe et les premiers mètres au moins de la colonne de refoulement peuvent être attaqués et piqués très rapidement, notamment près des filetages et des brides. Cependant, on se contente souvent d'acier doux pour ces parties dont le remplacement est possible sans frais excessifs.

Un revêtement intérieur de peinture, bitume, résine epoxy, etc..., peut prolonger la vie de l'objet, mais un revêtement incomplet ou endommagé lors de la mise en place concentre la corrosion et hâte l'accident.

La galvanisation, même si elle n'est pas endommagée aux filetages et raccords, résiste très peu longtemps à la corrosion. Des quantités de zinc bien plus considérables sont en jeu pour la protection cathodique par anodes perdues.

6.6. AVANT-PROJET

Un avant-projet de construction de puits peut être dressé lorsqu'on connaît les paramètres ci-dessus.

Les objectifs de débit et de rabattement commandent les diamètres et profondeurs des tubes, crépines, pompes, c'est-à-dire la coupe technique de l'ouvrage projeté.

Selon les risques de colmatage, ou de corrosion, un équipement de mesure ou d'accès pour injection de produits de traitement devra être prévu, par exemple une ligne d'air dans la nappe à l'intérieur des crépines, près de leur sommet et près de leur base si l'on craint des écoulements turbulents, un piézomètre à l'extérieur des crépines, un autre à l'extérieur du massif de gravier, et un dernier à 1 ou 2 m de distance dans le terrain aquifère (figure 1).

Un protocole de contrôles de rabattements, de profondeur totale, d'observations par télévision, de stérilisation, d'acidification, devra aussi être envisagé selon les risques prévisibles.

Les crépines. La définition des crépines est l'un des points les plus délicats dans la chaîne des décisions à prendre. Les crépines sont en effet l'élément le plus exposé au colmatage et à la corrosion, et le choix devra être fait avec soin de la nature du matériau, du pourcentage d'ouverture, du calibre des ouvertures, et de la résistance mécanique au flambage, à l'écrasement et à la casse pendant le transport.

Le risque de colmatage par des sables et des particules fines, par entartrage ou par bactéries n'est pas déterminant dans le choix du matériau, à condition qu'on envisage d'entretenir le puits par des traitements périodiques tels qu'acidification ou stérilisation. Sinon, les

différences dans le champ des vitesses ou dans les colmatages entre différentes parties des crépines, engendreront des courants électriques, et la corrosion pourra commencer son oeuvre de perforation. Si l'eau est corrosive vis-à-vis du fer, il faudra soit des crépines inoxydables ou en matière plastique, soit accepter la sujétion d'une protection cathodique continue.

Ces dernières années, BIKIS (1978), CLARK et TURNER (1983), JACKSON (1983) ont étudié l'influence du pourcentage d'ouverture des crépines sur les pertes de charges non linéaires à travers différents types de crépines en laboratoire, sans et avec massif de gravier, et sur le terrain avec massif de gravier.

Ces pertes de charges sont restées insignifiantes dans tous les cas, que le pourcentage de couverture passe de 10 à 40 % même pour des débits très supérieurs aux ordres de grandeur habituels dans les forages, et correspondant à des vitesses allant jusqu'à 1 m/s. Ces pertes varient linéairement en fonction du carré de la vitesse de l'eau, et paradoxalement ce sont les plus gros pourcentages d'ouverture qui sont les plus pénalisées, parce qu'on oublie qu'alors les débits sont aussi beaucoup plus forts. A débit égal, en utilisant les données de laboratoire de CLARK et TURNER (1983), le logarithme de ces pertes de charge quadratiques diminue linéairement lorsque le pourcentage d'ouverture des crépines augmente.

Dans le terrain et avec massif de graviers, les choses ne diffèrent pas sensiblement entre 10 et 40 % d'ouverture, probablement parce qu'alors ce pourcentage a été réduit de moitié par les grains plaqués contre les fentes des crépines, et que c'est le pourcentage d'ouverture du terrain, autour de 5 %, qui est devenu le phénomène limitant.

Cette double évolution des pertes, en fonction de la vitesse au carré et en fonction du pourcentage d'ouverture, indique qu'aux très forts débits, les pertes de charges non linéaires se produisent non pas au passage des fentes des crépines, mais surtout à l'intérieur des crépines, et seraient causées par les turbulences engendrées par la déviation brutale vers le haut des écoulements horizontaux radiaux à travers les fentes des crépines.

Ces turbulences seraient les plus fortes avec une forme de fente allant en s'évasant vers l'intérieur des crépines, et les moins fortes avec les crépines à persiennes, dans lesquelles l'eau prend une direction ascendante déjà lors de la traversée de la crépine. Des crépines à fentes longitudinales pourraient être meilleures encore.

Le fait que les pertes de charge non linéaires se produisent peu lors de la traversée des crépines, mais surtout à l'intérieur de celles-ci, est confirmé par des mesures de KREMS (1972) qui a noté une perte de charge de 20 % du total entre le haut et le bas d'une crépine de 35 m débitant 150 m³/h. Ceci confirmerait les observations selon lesquelles la turbulence d'un écoulement n'aurait pas d'influence sur le colmatage des crépines, puisque celles-ci sont situées en amont de l'endroit où la turbulence se produit.

L'hypothèse d'un potentiel hydraulique constant tout le long des crépines reste valable, mais elle n'implique pas des débits constants, sauf dans le cas d'une pénétration complète des puits dans une nappe homogène. En cas de pénétration partielle, le débit peut être très amplifié près des extrémités des tronçons de crépines, et alors les gradients de vitesse de l'eau dans les fentes des crépines sont le phénomène limitant à considérer pour le choix de la dimension et du pourcentage d'ouverture des crépines.

L'ordre de grandeur du rapport des débits maximaux et minimaux peut maintenant être calculé grâce à un modèle maillé radial circulaire, mais les résultats disponibles à ce jour ne concernent qu'un faible nombre de dispositifs de captage.

Les crépines en fer et en acier à persiennes ou à nervures pontées, ont une résistance suffisante au transport, à l'écrasement et au flambage. Les crépines en acier à fil enroulé ne peuvent souvent pas supporter le poids d'une longue colonne de tubages au dessus, ni même se supporter elles-mêmes dès que leur longueur dépasse 200 m. Il faut généralement les suspendre à la base de la colonne de tubage au moyen d'un raccord spécial appelé "hanger".

Les crépines et tubages en résine ou matière plastique armés à la fibre de verre résistent bien au flambage et à l'écrasement, mais un fort pourcentage de casse a lieu pendant le transport. Leur résistance à la corrosion par contre est totale.

7. CONCLUSION

Les réflexions ci-dessus ne constituent pas à proprement parler un guide pratique pour l'hydrogéologue auquel un problème de colmatage est posé, mais ont pour objet de sensibiliser l'hydrogéologue aux phénomènes physico-chimiques en jeu dans les processus de colmatage, et de l'orienter vers des ouvrages plus spécialisés qui eux peuvent être considérés comme des guides pratiques. Quatre de ces ouvrages méritent d'être reproduits en annexe, car à eux seuls ils couvrent la gamme presque complète des types de colmatage les plus fréquents. Ce sont :

- BREMOND R. (1964) . - Etude de l'influence des caractéristiques technologiques des puits et forages sur leur rendement et leur longévité
1. L'ensablement .- C.I.E.H (B.P. 366, OUAGADOUGOU), 64 p.
- BREMOND R. (1965) .- Etude de l'influence des caractéristiques technologiques des puits et forages sur leur rendement et leur longévité -
2. Le colmatage par les éléments sablo-argileux et les carbonates .- C.I.E.H. (B.P. 366, OUAGADOUGOU), 107 p.
- KREMS G. (1972) .- Studie über die Brunnenalterung. Bundesministerium des Inneren, Unterabteilung Wasserwirtschaft.
- CLARKE F.E. (1980) .- Corrosion and incrustation in water wells .- F.A.O. Irrigation and drainage, paper 34.

Le premier est partiellement reproduit en annexes 1 et 2. Le second le mériterait autant s'il était traduit de l'allemand en français. Le troisième a été largement publié par la F.A.O.

Si ces ouvrages établissent l'état des connaissances actuelles, beaucoup de points restent encore obscurs, et mériteraient d'être élucidés, ce qui pourrait être fait par les techniques suivantes, par exemple :

- Etude de la répartition des vitesses et des turbulences dans un forage en cours de colmatage. Des diagraphies périodiques au micro-moulinet, des diagraphies de pression et de polarisation spontanée dans les crépines d'un forage en cours de pompage.
- Calcul d'abaques de la distribution des rabattements dans une nappe anisotrope pénétrée partiellement, avec une condition de potentiel constant appliquée dans la partie crépinée.

- Mesures des courants d'électro-filtration causés par l'ensemble d'un puits en exploitation. Recherche de la relation avec la corrosion.
- En dehors des points de détail ci-dessus, la recherche la plus productive reste l'observation d'un grand nombre de cas de colmatage et la recherche des causes du phénomène. L'outil de base est ici l'analyse chimique sur place d'éléments fugaces.

B I B L I O G R A P H I E

- AVOGADRO A., DE MARSILY G. (1983) .- The role of colloids in nuclear waste disposal .- Boston, Scientific basis for nuclear waste management.
- BESBES M. (1971) .- Etude des pertes de charge dans les forages. Application à la détermination des transmissivités par essai de pompage de courte durée .- Publication de la Division des Ressources en Eau de Tunisie, n° 1, p. 15-100
- BIKIS E.A. (1978) .- A laboratory and field study of fiberglass and continuous-slot screens .- Thesis, Ohio University, Athens.
- BREMOND R. (1962) .- Amélioration par acidification d'un captage d'eau dans une formation calcaire .- Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H.), B.P. 366, OUAGADOUGOU
- BREMOND R. (1964).- Techniques de développement des puits .- Comité Inter-Africain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H.), B.P. 366, OUAGADOUGOU
- BREMOND R. (1964) .- Etude de l'influence des caractéristiques technologiques des puits et forages sur leur rendement et leur longévité - 1re partie : L'ensablement .- Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H.), B.P. 366, OUAGADOUGOU
- BREMOND R. (1965) .- Etude de l'influence des caractéristiques technologiques des puits et forages sur leur rendement et leur longévité - 2me partie : Le colmatage par les éléments sablo-argileux et les carbonates .- Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H.), B.P. 366, OUAGADOUGOU
- BOURGEOIS M. (1976) .- La corrosion et l'incrustation dans les forages d'eau (choix de l'équipement adapté) .- B.R.G.M. rapport n° 76 SGN 379 AME
- CLARK L., TURNER P.A. (1983) .- Experiments to assess the hydraulic efficiency of well screens .- Groundwater, Vol.21, n° 3, p. 270-286

- CLARKE F.E. (1980) .- Corrosion and incrustation in water wells .- F.A.O. Irrigation and drainage, paper 34
- DEGALLIER R. (1978) .- Interprétation des effets de pompages à débit non constant dans des nappes libres, semi-captives ou captives, non illimitées et pénétrées partiellement par les puits de pompage et les piézomètres de mesure .- B.R.G.M. rapport n° 78 SGN 316 HYD
- DEGALLIER R., DE MARSILY G. (1978) .- Détermination des paramètres hydrodynamiques par interprétation de variations brusques de niveau dans des puits .- B.R.G.M., rapport 78 SGN 028 HYD
- GONSONSKI P. (1983) .- Selbstdichtung von Gewässern .- Wasser und Boden, 9, p. 404-409
- HANSEL N. (1967) .- Über natürliche Selbstdichtung von Gewässern und porösen Untergrund und ihre hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Auswirkungen .- Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen, Leipzig, Heft 4, 1967, p.29-41
- HASSELBARTH U., LÜDEMANN D. (1967) .- Die biologische Verockerung von Brunnen durch massenentwicklung von Eisen-und Mangan-Bakterien Bohrtechnik Brunnenbau, Rohrleitungsbau, p. 363-406
- HERZIG J.P., LECLERC D.M., LE GOFF P. (1970) .- Flow of suspensions through porous media .- Industrial and Engineering Chemistry vol.62, n°5
- JACKSON P.A. (1983) .- A laboratory and field study of well screen performance and design .- Thesis, Ohio University, Athens, 127 p.
- KREMS G. (1972) .- Studie über die Brunnenalterung .- Bundesministerium des Innere, Unterabteilung Wasserwirtschaft
- MABILLOT (1980) .- Le forage d'eau .- Johnson France

O'MELIA C.R., STANUN W. (1967) .- Study of water filtration .- Journal of AWWA, Vol.9, n° 11, p.1393-1412

ZIMA K. (1965) .- Die Unterdruckschöpfung aus Rohrbrunnen .- A.I.H., réunion de Hanovre, p. 336-338