Bordeaux
27, 28 et 29 octobre 2008

"Le forage d'eau au XXIe siècle"

Organisé par
l'Association des Hydrogéologues des services publics (AHSP)
&
l'Institut EGID Bordeaux 3

Actes du colloque

Les organisateurs du colloque "le forage d'eau au XXIe siècle" remercient pour leur soutien :

Partenaires institutionnels

- l'Agence de l'eau Adour Garonne
- la Communauté urbaine de Bordeaux
- le Conseil général de la Gironde
- le Syndicat mixte d'étude pour la gestion de la ressource en eau du département de la Gironde (SMEGREG)
- l'Université Michel de Montaigne Bordeaux 3

Entreprises

- HYDROFORAGE
- PRECIFORAGE
- RESOLUTIO
- SADE
- SAINT GOBAIN PAM
- SOGREAH Consultants
- SONDALP SRCE
- VAUTHRIN FORAGES
- VEOLIA Eau

Préface

Faire un forage… quoi de plus banal aujourd'hui. On croyait que depuis les Chinois (déjà) qui utilisaient la tige du bambou pour forer à plusieurs centaines de mètres de profondeur, Bernard Palissy inventeur de la sonde, et les pétroliers (in fine), tout avait été dit sur le sujet.

Reste que la réalisation d'un forage d'eau, qu'il soit destiné à l'industrie, l'agriculture, ou l'alimentation humaine, s'inscrit aujourd'hui dans un cadre de développement durable, de gestion et de protection de la ressource.

La durabilité de la ressource, tant qualité que quantité, implique la gestion, et il n'y a pas de gestion possible sans la mise en oeuvre d'outils et de techniques d'investigation de plus en plus performants, voire sophistiqués, empruntés parfois au meilleur de la recherche pétrolière.

Mais le forage n'est plus seulement de nos jours, un outil économique permettant de produire une eau de qualité, à l'endroit précis où le besoin s'en fait sentir, il ouvre aussi une véritable fenêtre sur le milieu souterrain et sur la nappe. Fenêtre unique dont chacun, du foreur au chercheur, exploitera le meilleur angle de vision selon ses objectifs et ses outils.

Ce fut un vrai colloque au sens profond du terme, qui a ouvert pour la première fois, un champ (j'allais dire un chantier), dans lequel, du maître de sonde à l'ingénieur ou au chercheur, chacun s'est reconnu comme appartenant à une même famille avec un même langage qui exclut souvent l'unité légale de mesure.

Depuis qu'il est devenu forage, le puits n'est plus trop profond, le tubage a remplacé la margelle, et la pompe immergée, la corde désormais trop courte…

Pierre Pouchan
Professeur émérite d'hydrogéologie
Université de Bordeaux 3

Université
Michel de Montaigne
Bordeaux 3

Peu visible, le forage d'eau est une infrastructure essentielle pour différentes activités ayant recours aux eaux souterraines : alimentation en eau potable, embouteillage, thermalisme, géothermie, industrie, agriculture, etc.

Un forage d'eau est une infrastructure complexe dont la qualité et la longévité dépendent des conditions de réalisation et des matériaux utilisés ainsi que des conditions d'exploitation et d'entretien. Cette longévité et la qualité du service rendu par l'ouvrage sont bien entendu conditionnées par l'investissement consenti au départ, souvent estimé sans prendre de marge pour faire face aux aléas.

Malgré une réglementation de plus en plus contraignante, en particulier pour la protection des ressources souterraines, le parc de forages vieillit. Ce vieillissement réserve parfois de mauvaises surprises liées au dépérissement des ouvrages, faute d'un suivi sérieux et d'auscultations préventives régulières.

Par ailleurs, que ce soit en matière de réalisation, de diagnostic ou de réhabilitation, la technique progresse, offrant des possibilités encore mal connues pour des coûts désormais accessibles.

Enfin, alors que la réflexion est engagé sur un agrément des entreprises de forage, ces dernières ne disposent pas toutes des moyens techniques ou des savoirs faire à la hauteur des enjeux.

Organisé à Bordeaux du 27 au 29 octobre 2008, le colloque "le forage d'eau au XXIe siècle" avait donc pour objectif de faciliter le partage de connaissance entre des techniciens de toutes origines.

Confirmant qu'il répondait à réelle attente, le succès de ce colloque peut se résumer en quelques chiffres :

- 279 inscrits ;
- plus de 220 personnes présentes chaque jour ;
- 14 exposants ;
- 36 communications ;
- 10 séances de questions-réponses ;
- etc.

Autre motif de satisfaction, les communications faites par les hommes de l'art que l'on côtoie souvent sur les chantiers, rarement dans les colloques. Ces témoignages précieux ne sont pas tous formalisés sous forme de communications écrites et les actes devaient en tenir compte. C'est pourquoi la partie imprimée des actes, où certains textes sont parfois peu développés, voire absents, est complétée par un DVD qui permet de visionner tous les diaporamas montés avec la bande son enregistrée en séance.

Ces actes édités, souhaitons que la qualité des forages existants ou à venir s'améliore pour la préservation et la valorisation de nos eaux souterraines.

Bruno JEUDI de GRISSAC

Président de l'AHSP

INSTITUT EGID BORDEAUX 3
UNIVERSITE MICHEL DE MONTAIGNE BORDEAUX 3

D'un point de vue académique, le puits ou le forage d'eau est pour les hydrogéologues le seul moyen d'accès direct aux aquifères et aux nappes d'eau souterraine, pouvant être implantés là où le besoin s'en fait sentir.

Cette interface artificielle est donc d'une importance capitale pour l'exploitation d'une ressource ou la production d'un bien. En outre, son coût d'investissement initial rend le forage précieux à tous ceux qui s'en servent ou qui l'utilisent indirectement, de l'exploitant à l'usager. Il est donc apparu nécessaire de consacrer trois jours en essayant de réunir un panel aussi large que possible de techniciens pour permettre en ce début de XXI° siècle de faire un point sur la "vie" des puits et forages d'eau.

Comme pour tout objet de valeur, l'entretien des puits et forages est devenu crucial. Or, la vie de ces ouvrages est très particulière car elle dépend de paramètres actuels comme la qualité de l'eau extraite ou encore du mode d'exploitation, mais également de paramètres initiaux comme la technique de réalisation et la qualité des matériaux utilisés pour la réalisation, et encore des paramètres intrinsèques de l'aquifère exploité. Comme toutes les interfaces artificielles entre l'aquifère et la surface, les puits et forages doivent ainsi satisfaire un double jeu de contraintes induites par la fonctionnalité de production en surface et le vieillissement naturel des matériaux confinés dans le domaine souterrain. Outre les contraintes purement techniques, le domaine réglementaire évolue et doit être pris en considération. Aussi, il nous est alors apparu nécessaire d'aborder tous ces aspects d'un point de vue prospectif en évoquant la création, la "vie", l'utilisation mais aussi l'abandon des puits et forages d'eau.

Au final, nous retiendrons que de très nombreux acteurs ont répondu à notre sollicitation et que, à l'évidence, de telles journées de rencontres et de débats sont nécessaires afin d'échanger entre les différents corps de métiers qui gravitent autour du forage d'eau : de l'hydrogéologue concepteur au décideur politique ou au donneur d'ordre, en passant par le foreur réalisateur et l'ingénieur d'étude et de diagnostic.

Les actes proposés ci-après synthétisent et reflètent l'ensemble des débats qui se sont tenus au cours des 3 jours de colloques. Ils témoignent de la richesse et de la diversité des thèmes évoqués. Ils sont à l'image des eaux souterraines, une richesse qu'il faut maintenant apprendre à gérer pour mieux l'exploiter.

Alain DUPUY
Maître de Conférences en Hydrogéologie
Institut EGID

Contenu du colloque et des actes

Les sujets suivants ont été abordés et figurent dans les actes :

- les contextes réglementaires et normatifs de réalisation des forages, les évolutions réglementaires en cours de préparation et notamment le projet d'agrément des entreprises de forage ;
- les conditions de réalisation des ouvrages et plus particulièrement les techniques disponibles, le choix des équipements et les conditions de cimentation ;
- les spécificités des forages réalisés dans des contexte de socle, de karsts superficiels ou profonds, de nappes fortement artésiennes, d'ouvrages destinés à l'embouteillage, des sondes géothermiques ;
- le choix des équipements hydrauliques et la fixation des conditions d'exploitation ;
- les origines du fer et du manganèse, les phénomènes de colmatage, le rôle du dénoyage dans le colmatage ;
- la gestion patrimoniale et durable des forages ;
- les méthodes d'investigation et diagnostic par diagraphies ou par exploitation des données de pompage, les nouvelles diagraphies ;
- les programmes opérationnels de diagnostic et de réhabilitation de forages ;
- les techniques de réhabilitation par surforage, ou par chemisage par sertissage interne ;
- la gestion des projets, le rôle du maître d'oeuvre ;
- des projets particuliers.

Forme des actes

L'un des objectifs de ce colloque était de permettre un partage de savoirs faire non formalisés dans la littérature et pour partie détenus presque exclusivement par les personnels des entreprises de forage.

La forme retenue pour la sélection des communications et leur restitution dans des actes devait tenir compte de cette spécificité.

C'est pourquoi ces actes privilégient une restitution sous forme audiovisuelle au travers des montages vidéo figurant sur le DVD joint à la fin de ce document. Toutes les conférences ont ainsi fait l'objet d'un enregistrement du son en séance qui a permis une synchronisation ultérieure avec les diaporamas.

Certaines communications font l'objet d'un texte développé dans la partie imprimée des actes. D'autres ne sont présentes que sous forme d'un résumé très succinct. Enfin, les exposés relatifs au contexte réglementaire ne sont pas repris sous forme de texte, du fait des évolutions rapides connues dans ce domaine.

Les montages vidéo constituent donc, selon le cas, un complément au texte ou la principale, voire l'unique, restitution des propos tenus.

SOMMAIRE

Remerciements

Introduction

Contenu des actes

Le contexte réglementaire 1

Conférence introductive
par Bruno JEUDI de GRISSAC (AHSP)

Les aspects réglementaires
par Alain PAILLOU (Ministère de l'Ecologie – MEEDDAT)

Les enjeux sanitaires par François MANSOTTE
(DDASS de la Gironde)

Les normes existantes et en préparation
par Jean-Michel REMY (AFNOR)

La profession et les règles de l'art
par Jean-François GOBICHON (Syndicat des foreurs d'eau)

La réalisation des ouvrages 3

Les principales techniques de forage
par Philippe LYONNET (FORADOUR) 5

Comment concevoir un forage d'eau
par Sébastien BART (JOHNSON SCREENS) 9

Cimentation des forages profonds
par Ludovic REYNAERT (FORAGES MASSE) 11

Le forage d'eau dans le socle armoricain : prospection, réalisation et suivi
par Gilles MARJOLET (Conseil général des Côtes d'Armor) 13

Forage profond en aquifère karstique dans le Jura suisse
par Christian RIEBEN (MFR Géologie-Géotechnique Suisse) 23

Réalisation des forages destinés à l'embouteillage d'eau minérale naturelle
par Ronan LE FANIC (NESTLE WATERS) 25

Le forage de la piscine de Millau
par Christophe SUBIAS (CALLIGEE) 29

La vie des ouvrages 37

Mise en exploitation des forages - Calcul des courbes de production pour des pompages intermittents
par Claude GRIOLET (DIREN Corse) 39

Choix des équipements hydrauliques
par Eric LARROQUE (FLOWSERVE) 47

Origine du fer et du manganèse dans les forages d'eau – préconisations
par Marie-Jacqueline MARSAC (HEH) 51

Rôle du dénoyage dans le colmatage d'un puits: apports et limites de la simulation numérique
par François LARROQUE (Institut EGID Bordeaux 3) 63

Exploitation durable des ouvrages de captage d'eau souterraine
par Marc ALARY (VEOLIA EAU) 69

Gestion des ouvrages de production d'eau potable
par Bernard DROZ (SADE) 75

La gestion patrimoniale des forages d'eau potable
par Renaud FRANCOMME (LYONNAISE des EAUX) 77

Les méthodes d'investigation 79

Investigations de diagnostic dans les forages trop ou pas assez (ou les meilleures) ?
par Claude ARMAND (ANTEA) 81

L'intérêt des diagraphies de mesures de vitesse du fluide en forage d'eau
par Guy FAURE (IDEES EAUX) 83

Identification des variations endogènes/exogènes de productivité d'un puits au sein d'un parc d'ouvrages d'exploitation
par Alain DUPUY (Institut EGID Bordeaux 3) 85

Programme de diagnostic des forages AEP du département de la Mayenne
par Alexis ROBERT (Conseil général de la Mayenne) 91

Sonde de mesure de corrosion par procédé électromagnétique
par Michel SEGUIN (HYDROINVEST) 103

Technologies d'investigation avancées pour une gestion active des aquifères
par Angeline KNEPPERS (SCHLUMBERGER WATER SERVICES) 107

Techniques de forages particulières et réhabilitation 115

Le diagnostic et la mise en conformité des forages privés en Charente Maritime
par Jacques LEPINE (Syndicat des eaux de la Charente-Maritime)
et Hélène NADAUD (GEOAQUITAINE) 117

L'extraction des crépines par surforage et fishing
par Bernard LAFARGUE (FORADOUR) 135

Chemisage de forage par sertissage interne
par Michel SEGUIN (HYDROINVEST) 139

Gestion d'un champ captant (ville de Tours)
par Philippe MEVELEC (Ville de Tours) 143

Réalisation des sondes géothermiques
par Bruno SEGUIN (VENTILONE) 153

Géothermie à Orly un forage de type pétrolier en centre ville
par Jean-Michel JOUBERT (ANTEA) 159

La gestion des projets 165

Gestion des projets, de la réflexion à la réalisation
par Olivier GRIERE (G2H Conseils) 167

Le rôle du maître d'œuvre privé dans la réalisation des forages d'eau
par Bruno MARSAUD (ANTEA) 177

Conversion d'un puits d'exploration de Gaz de France en piézomètre
par Jean-François VERNOUX (BRGM) 183

Laayoune - Champ captant d'eau de mer
par Bruno CANALETA (SOGREAH) 189

Annexe DVD comportant le texte des communications et la restitution des conférences de montages vidéo synchronisant les diaporamas et le son enregistré en séance

Pas de texte pour ces conférences.
Pour en savoir plus, visionner les vidéos des conférences sur le DVD joint ou sur www.ahsp.fr.
Le comité de rédaction des actes

Le contexte réglementaire

Conférence introductive
par Bruno JEUDI de GRISSAC (AHSP)

Les aspects réglementaires
par Alain PAILLOU (Ministère de l'Ecologie – MEEDDAT)

Les enjeux sanitaires
par François MANSOTTE (DDASS de la Gironde)

Les normes existantes et en préparation
par Jean-Michel REMY (AFNOR)

La profession et les règles de l'art
par Jean-Francois GOBICHON (Syndicat des foreurs d'eau)

Pour ce premier groupe de conférence, seule la restitution sous forme vidéo est disponible. Reportez vous au DVD joint ou au site de l'AHSP (www.ahsp.fr).

La réalisation des ouvrages

Les principales techniques de forage
par Philippe LYONNET (FORADOUR) 5

Comment concevoir un forage d'eau
par Sébastien BART (JOHNSON SCREENS)..... 9

Cimentation des forages profonds
par Ludovic REYNAERT (FORAGES MASSE) 11

Le forage d'eau dans le socle armoricain : prospection, réalisation et suivi
par Gilles MARJOLET (Conseil général des Côtes d'Armor) 13

Forage profond en aquifère karstique dans le Jura suisse
par Christian RIEBEN (MFR Géologie-Géotechnique Suisse) 23

Réalisation des forages destinés à l'embouteillage d'eau minérale naturelle
par Ronan LE FANIC (NESTLE WATERS) 25

Le forage de la piscine de Millau
par Christophe SUBIAS (CALLIGEE) 29

Les principales techniques de forage

Philippe LYONNET

FORADOUR, Zone artisanale de Laouranne, 40250 Mugron , p.lyonnet@foradour.com

En fonction de la Géologie (terrains sédimentaires plus ou moins cohérents, zones de socle dur plus ou moins fracturés), de la profondeur à atteindre et du débit escompté, plusieurs méthodes de forage peuvent êtres envisagées.

L'objet de cette intervention n'étant pas d'en dresser un inventaire exhaustif, seules les plus couramment employées seront abordées.

Notamment celles capables de s'adapter aux contraintes du sous-sol tout en respectant les critères de rentabilité exigés par les entreprises.

Ces techniques sont applicables pour la réalisation aussi bien de sondages de reconnaissance, que de forages d'exploitation ou de piézomètres.

Schématiquement réparties en 3 catégories, les principales méthodes de foration développées seront :

- le battage utilisant la percussion,
- le rotary basé sur la rotation,
- le marteau fond de trou utilisant à la fois la percussion et la rotation,

Seront également évoquées quelques variantes associées en circulation inverse.

1. Le forage au battage

Le forage au battage est la méthode la plus ancienne. Les chinois la pratiquaient déjà il y a plus de 4000 ans et atteignaient des profondeurs de l'ordre de 1000 m.

La technique consiste à soulever un trépan lourd et à le laisser retomber sur le terrain à traverser. La hauteur et la fréquence de chute varient avec la dureté des formations.

La plupart des forages par battage se font au câble en agissant soit sur le treuil en relâchant l'embrayage, soit sur le câble lui-même en le tendant et le relâchant alternativement.

Le nettoyage du trou se fait au fur et à mesure de l'avancement, par la descente d'une soupape permettant de remonter les cuttings.

Dans les formations non consolidées les parois sont maintenues par un tube de travail lisse, épais, assemblé par filetage à mi-épaisseur et mis en place par louvoiement à l'avancement.

Les profondeurs peuvent atteindre 1500 m en 500 mm de diamètre et 150 m en Ø 1200 mm de diamètre.

Simple et peu coûteux en matériel et en énergie, ce procédé ne nécessite pas l'emploi de fluide de forage (eau ou boue).

Il est particulièrement indiqué dans les formations karstiques, fissurées et très perméables en raison de l'absence de risque de pertes de circulation et de pollution de la nappe.

Toutefois sa faible vitesse d'avancement dans les terrains consolidés et ses difficultés pour contrôler les venues d'eau artésiennes jaillissantes, cantonne son usage aux forages de faible profondeur, moins de 100 m, dans les formations meubles, notamment alluvionnaires sans éléments grossiers de type galets, où ses avancements rapides et sa facilité de mise en œuvre le rendent très compétitif.

2. Le forage au rotary

2.1 Méthode

Systématiquement employée dans le domaine de la recherche pétrolière, cette méthode largement éprouvée est, avec celle du marteau fond de trou, la plus couramment utilisée en forage d'eau.

Elle consiste à animer d'un mouvement de rotation un outil monté au bout d'une ligne de sonde et à le faire pénétrer dans le terrain, sans chocs, par abrasion et broyage sous l'effet d'une partie du poids de la garniture ou d'une pression hydraulique.

Elle nécessite l'emploi d'un fluide de forage, qui peut être soit :

- de l'air,
- de l'eau,
- une boue à base de polymères,
- le plus souvent une boue benthonique.

En circulation directe, cette boue est injectée sous pression en continu dans les tiges creuses de la ligne de sonde, et sort au niveau d'évents sur l'outil pour remonter à la surface dans l'espace annulaire, entre la garniture et la paroi du trou.

Ses principales fonctions sont :

- de refroidir l'outil,
- d'éroder le terrain par la vitesse des jets au droit des évents,
- de remonter les déblais (cuttings) à la surface grâce à sa viscosité,
- de maintenir les parois dans les terrains non consolidés par la formation d'un dépôt (cake),
- de s'opposer par sa densité à l'artésianisme des aquifères traversés.

Dans certains cas particuliers, notamment les forages de gros diamètres, pour conserver une vitesse de remontée suffisante, environ 30m/min la circulation peut être inversée.

L'alimentation de la boue s'effectue alors par l'annulaire et la remontée par l'intérieur de la garniture. C'est la circulation inverse.

2.2 Matériels

La ligne de sonde, l'appareil de forage et la pompe à boue sont les principaux matériels mis en œuvre sur un atelier rotary :

La ligne de sonde est chargée de transmettre le mouvement de rotation, de véhiculer la boue de forage et mettre du poids sur l'outil. Elle est constituée de bas en haut :

- d'un outil,
- de masses tiges,
- de tiges courantes,
- d'une tête de rotation ou d'une tige carrée (kelly),
- d'une tête d'injection.

Les outils diffèrent en fonction de la dureté des terrains à traverser.

- outils à lames et tricônes à grandes dents pour les terrains tendres,
- tricônes à petites dents pour les terrains consolidés,
- outils et tricônes à carbures métalliques ou diamantés pour les terrains durs.

Les masses tiges, très lourdes, placées juste au dessus, accentuent le poids sur l'outil et favorisent la rectitude et la verticalité du trou.

Les tiges courantes, vissées les unes aux autres, participent à la charge sur l'outil et transmettent la rotation tout en amenant la boue sous pression depuis la tête d'injection.

Suivant l'appareil de forage, une tête de rotation hydraulique mobile ou une tige carrée entraînée par une table de rotation, imprime au train de tiges un mouvement de rotation tout en laissant sa translation verticale libre.

L'appareil de forage, dimensionné pour reprendre tout ou partie de la charge de la ligne de sonde qui lui est suspendue, est soit traditionnel (table de rotation, derrick et treuil), soit hydraulique.

Traditionnel : le train de sonde fore avec une poussée correspondant au maximum à son propre poids.

Hydraulique : la tête mobile peut appliquer une force de poussée complémentaire au poids propre.

Adapté aux forages profonds (ouvrages pétroliers), l'appareil de forage traditionnel est de plus en plus remplacé en forage d'eau par des foreuses hydrauliques.

La pompe à boue est l'un des éléments les plus importants de l'atelier rotary. Par son débit et sa pression elle doit en permanence assurer une re-circulation suffisante du fluide de forage et générer une vitesse de remontée rapide dans l'espace annulaire pour bien dégager le trou.

Un dispositif d'épuration de boue constitué d'un tamis vibrant, d'un dessableur et d'un bac de stockage la complète.

2.3 Capacités

Le forage rotary permet de forer dans tout type de terrain des puits à très grande profondeur, plusieurs milliers de mètres en recherche pétrolière et en gros diamètre (jusqu'à 24″ = 610 mm).

Toutefois en raison de son coût, son usage en forage d'eau sera réservé aux formations sédimentaires consolidées ou non et métamorphiques (schistes, gneiss).

2.4 Avantages et inconvénients

Avantages :

- possibilité d'atteindre de grandes profondeurs y compris en gros diamètre,
- vitesse d'avancement importante (jusqu'à 100m/jour en 8 ½ = 216 mm en terrain tendre),
- maintient des parois par la boue de forage,
- bon contrôle des venues d'eaux artésiennes jaillissantes,
- contrôle des paramètres de forage.

Inconvénients :

- nécessité d'un fluide de forage,
- possible envahissement des aquifères par la boue, nécessitant des temps de développement importants,
- mélange des cuttings à la remontée,
- pertes de circulation (boue) dans les formations karstiques avec risque d'éboulement du trou.

3. Le forage au marteau fond de trou (MFT)

3.1 Méthode

Particulièrement développée en recherche d'eau dans les terrains durs et fracturés, cette méthode de forage utilise le principe de la roto percussion.

Comme précédemment un outil, ici un marteau perforateur, monté au bout d'une ligne de sonde, est mis en rotation depuis la surface et pénètre dans le terrain par percussion sous l'effet du poids de la garniture ou d'une poussée hydraulique.

L'énergie nécessaire pour actionner cet outillage est procurée par de l'air comprimé à haute pression (15-27 bars) circulant dans la ligne de sonde creuse.

Les déblais de forage sont évacués par l'air d'échappement du marteau qui remonte en circulation directe par l'espace annulaire.

Pour éviter tout risque de coincement, la vitesse de remontée des cuttings (poussières et éclats) doit être élevée, comprise entre 500 et 1000 m/min.

Dès que le diamètre du forage ne le permet plus (Ø > 12 ¼ = 311 mm) l'emploi de la mousse comme fluide de forage est recommandé.

Le débit d'air est alors réduit par un facteur de 10 sa consistance, genre « mousse à raser », permettant de remonter des déblais à faible vitesse.

L'autre solution en présence de karst, pour conserver une circulation et une vitesse de remontée suffisante est la circulation inverse. L'injection de l'air comprimé s'effectue alors dans l'espace annulaire d'un train de tiges à double paroi, entre le tube extérieur et le tube intérieur associé à un cross over tool.

3.2 Matériels

La ligne de sonde, l'appareil de forage et le compresseur d'air sont les principaux matériels mis en œuvre sur un atelier de marteau fond de trou.

La ligne de sonde est chargée de transmettre le mouvement de rotation, de véhiculer l'air comprimé et mettre du poids sur l'outil. Elle est constituée de bas en haut :

- d'un taillant monté sur un marteau perforateur
- de masses tiges
- de tiges courantes
- d'une tête de rotation et d'injection

Le taillant monté sur le marteau perforateur pneumatique, juste devant le mécanisme de frappe, est choisi suivant les caractéristiques mécaniques et abrasives du terrain. Il est soit à plaquettes soit le plus souvent à boutons sphériques ou coniques en carbone de tungstène.

Les masses tiges et les tiges courantes ont les mêmes fonctionnalités au fluide près, que celles décrites précédemment pour le rotary.

La tête mobile de rotation et d'injection d'air, est hydraulique et entraîne le train de tige tout en contrôlant la poussée sur l'outil.

Sa vitesse de rotation, fonction des caractéristiques de la roche et du diamètre de l'outil, est un compromis entre la vitesse de pénétration et l'usure du taillant et varie de 30 à 80 T/min.

L'appareil de forage capable d'appliquer une poussée complémentaire et de reprendre l'excédent de charge sur l'outil est hydraulique.

La tendance actuelle est de le doter d'un équipement mixte permettant de forer aussi bien au rotary à la boue ou à l'air, qu'au marteau fond de trou, en circulation directe ou inverse.

Le compresseur d'air tout en compensant les pertes d'énergies dues au poids de l'eau remontée lors du passage de terrains aquifères, doit fournir l'énergie nécessaire pour la foration et le débit requis pour l'évacuation des déblais. Son choix devra donc tenir compte non seulement du diamètre mais aussi de la profondeur à atteindre avec une pression de service capable de compenser la charge d'eau tout en assurant le bon fonctionnement du marteau.

Des compresseurs de 25 m^3/min avec une pression de service de 25 bars sont courants mais avec des surpresseurs (boosters) on peut obtenir des pressions de l'ordre de 70 à 100 bars dans le cas de forages de 700 à 800 m.

3.3 Capacités

En forage d'eau le marteau fond de trou est habituellement utilisé pour forer des trous d'un diamètre de 4 à 15" (102 à 381 mm).

Leur profondeur peut atteindre en terrain dur et fracturé 400 à 500 mètres en en terrain sédimentaire consolidé, 700 à 800 mètres.

3.4 Avantages et inconvénients

Avantages :

- avancement rapide,
- bonne observation des cuttings et des zones productrices d'eau à l'avancement,
- pas besoin d'eau ni de matériels lourds de traitement de boues,
- pas d'envahissement des formations traversées.

Inconvénients :

- peu adapté aux terrains non consolidés ou plastiques,
- limités en profondeur sous nappe du fait de la pression hydrostatique,
- risque de coincements en zone fracturée,
- circulation directe peu adaptée dans les formations karstiques.

Comment concevoir un forage d'eau

Ce texte est un résumé.
Pour en savoir plus, visionner la vidéo de la conférence sur le DVD joint ou sur www.ahsp.fr.
Le comité de rédaction des actes

Sébastien BART

JOHNSON FILTRATION SYSTEMS, Z.I., 86530 Availles en Châtellerault, sebastien.bart@johnsonscreens.com

La conception d'un forage est une étape essentielle si l'on recherche à optimiser son outil de production d'eau souterraine. Ainsi, il est possible de faire varier de nombreux paramètres pour ajuster au mieux le forage à son environnement hydrogéologique. De cette étape, dépendront les performances du captage à moyen et à long terme.

1. Les enjeux

Le forage doit être considéré comme la source essentielle des outils de production de l'eau potable ou industrielle. En cas de défaillance, les conséquences sont souvent importantes et coûteuses. En effet, un forage mal conçu peut entraîner notamment :

- une productivité trop faible ;
- une durée de vie limitée ;
- une eau de mauvaise qualité, ensablement, turbidité… ;
- un colmatage accéléré ;
- des coûts de maintenance élevés.

En optimisant la conception d'un ouvrage de captage, au regard du contexte géologique et hydrogéologique, et des besoins d'exploitation, il est possible de réduire fortement ces effets négatifs.

2. Comment définir les tubes pleins

Les tubes pleins doivent être conçus pour résister mécaniquement aux pressions qui lui seront appliquées une fois mis en place dans le forage. Son diamètre est plutôt fonction du débit d'exploitation (diamètre de la pompe), et son épaisseur de la profondeur d'installation et de la méthode de cimentation le cas échéant.

La nature des tubes est principalement fonction de la qualité des eaux captées. A partir d'une analyse chimique représentative, il est possible d'optimiser la qualité des matériaux utilisés. D'autres paramètres peuvent intervenir dans le choix des équipements, comme le délai d'approvisionnement ou le coût.

La qualité de l'étanchéité de ces colonnes de tube cimentées est souvent recherchée pour la protection des nappes captées. Il est important dans ce cas de prévoir des matériaux adaptés. Si des tubes en inox sont utilisés, la qualité de ces derniers devra donc être optimisée. Dans ce cas, deux points importants devront être abordés :

- les zones thermiquement affectées par les soudures ont une résistance face à la corrosion détériorée. Il est possible de recréer la couche de protection par un traitement de décapage passivation ;
- pour limiter les effets négatifs des soudures réalisées sur chantier (pour les opérations d'assemblage) la mise en œuvre de soudures avec inertage gaz est indispensable.

3. Comment définir les crépines

Les crépines sont définies pour laisser passer l'eau, tout en retenant les particules constituant l'aquifère. Pour obtenir cette combinaison, parfois complexe, l'ensemble des paramètres physiques de l'aquifère doivent être pris en compte. C'est pourquoi, la connaissance de l'aquifère au préalable est nécessaire.

Pour être efficace, la zone de captage est définie selon les indicateurs présentés dans le tableau ci-après :

Caractéristiques	Impacts	Objectifs
Ouverture	Développement Vitesse d'entrée Colmatage	Meilleur productivité Réduire le coût du pompage
Géométrie du slot	Développement	Evacuer les particules Réduire le coût
Matière	Résistance à la corrosion	Durée de vie
Construction	Satisfaire les contraintes mécaniques	Eviter les déformations, collapse

Tableau 1 : *Facteurs clés pour dimensionner les crépines*

Pour rester optimale, la productivité d'un forage doit être suivie tout au long de son exploitation afin de diagnostiquer et contrôler les effets du vieillissement. De ce fait, au cours de sa vie, un forage fera l'objet d'une ou plusieurs opérations de nettoyage / réhabilitation. Notons donc que, plus l'accès aux crépines, massif filtrant et formation captée est important (par un pourcentage d'ouverture élevé) et plus le forage sera conservé avec une productivité élevée.

4. MUNIPAK

Capter un aquifère sableux, fin et moyennement profond à profond s'avère souvent complexe. C'est pourquoi, JOHNSON FILTRATION SYSTEMS a mis au point un kit complet d'équipement de captage, nommé ''MUNIPAK''. Il s'agit de doubles crépines à fil enroulé, emboîtées l'une dans l'autre, et comprenant un massif filtrant intégré entre les deux crépines. Le filtre est composé de billes libres de céramiques, sphériques et lisses.

Figure 1 : *MUNIPAK*

Les avantages sont multiples :

- rapidité et facilité d'installation ;
- 100% de filtration sur toute la hauteur captée ;
- épaisseur du filtre optimisée de 1", diamètre de forage réduit ;
- possibilité de développement, nettoyage, réhabilitation plus important ;
- peu de pertes de charge additionnelles ;
- développement bactérien réduit ;
- mise œuvre dans les forages déviés ou drains horizontaux, ou rechemisage.

Références bibliographiques

JOHNSON SCREENS (2007), Groundwater and Wells, Third Edition.

Cimentation de forages profonds

Ce texte est un résumé.
Pour en savoir plus, visionner la vidéo de la conférence sur le DVD joint ou sur www.ahsp.fr.
Le comité de rédaction des actes

Ludovic REYNAERT

Forages MASSÉ, Hérisson, 17380 Chantemerle-sur-la-soie, forages.masse@wanadoo.fr

Une des phases primordiales dans la réalisation de forages profonds est la cimentation. Elle permet en effet d'isoler l'aquifère cible des aquifères supérieurs non désirés et qu'il faut isoler de façon pérenne.

En s'appuyant sur des expériences mais aussi sur des critères techniques chiffrés et argumentés, nous vous proposons de mettre en valeur les techniques pour optimiser cette phase de travaux.

Dans un premier temps il faut pouvoir descendre le tube à la profondeur souhaitée sans encombre et librement, faire son programme de cimentation en fonction des contraintes de terrains rencontrés (revue de contrat), exécuter l'opération proprement dite et enfin les contrôles et compléments éventuels.

Les points abordés lors de la communication seront les suivants :

- forer droit et rectiligne : utilisation de stabilisateur et roller, poids sur l'outil, outil aléseur ;
- choix du tube calcul de résistance : optimisation du tube pour l'inox, centrage, vissage et soudage ;
- choix du coulis : nature de ciment selon l'eau et la profondeur, adjuvant, coulis allégé faible densité, coulis de benthonite, ciment flash etc. ;
- calcul des critères d'injection : densité, pression, vitesse, volume, chasse etc. ;
- technique d'injection : sous pression avec plug; utilisation inner string ; société de service ;
- cas particulier : cimentation de tube de faible résistance à l'écrasement (inox notamment) ;
- la chasse d'eau et l'attente de prise ;
- les compléments de cimentation ;
- les contrôles : mises en pression CBL- cas particuliers ;
- cimentation de zones de perte ;
- cimentation partielle et dévissage de casing ;
- bouchon de ciment (sur gravier ; suspendu ; autre) ;
- cimentation avec artésianisme.

Le forage d'eau dans le socle armoricain : prospection, réalisation et suivi

Gilles MARJOLET [1], François HERBRETEAU [2], Jean-François MOREAU [3], Gilles LUCAS [4], Arnaud LE GAL [5]

1 Conseil général des Côtes d'Armor, 2 rue Jean kuster, 22 023 Saint Brieuc Cedex 1, MARJOLETGilles@cg22.fr
2 Conseil général des Côtes d'Armor, HERBRETEAUFrancois@cg22.fr
3 Bonnier Forages, Gare de la Forêt, 35 130 Rannée, forages.bonnier@wanadoo.fr
4 Géoarmor, 16, rue de Cézembre, 35 135 Chantepie, gilles.lucas@geoarmor.com
5 Syndicat Départemental de l'Eau du Morbihan, rue du Commandant-Charcot, 56001 Vannes, sde56.alg@orange.fr

Résumé

Le recours aux forages pour l'exploitation des eaux souterraines du socle armoricain ne date que d'une trentaine d'années. Plutôt empiriques au début, les méthodes de prospection, de réalisation des forages et d'exploitation des ressources, dans un contexte hydrogéologique alors mal connu, se sont précisées au fur et à mesure des recherches en eau entreprises.

Les techniques de prospection préalables à l'implantation des forages s'appuient sur la photo-interprétation du contexte géologique local qui permet d'identifier des secteurs potentiellement favorables où des investigations géophysiques peuvent être entreprises pour la localisation précise des sondages d'exploration. Il convient cependant de souligner que dès le départ, l'environnement est pris en compte dans les critères de sélection des sites à explorer.

L'exploration est ensuite menée en deux temps, avec tout d'abord la réalisation de sondages de reconnaissance de 100 à 200 m de profondeur, au marteau fond de trou, en petit diamètre (165 mm), ce qui permet au moindre coût, de préciser le potentiel hydrogéologique local.

En cas de résultat favorable (débit instantané "au soufflage" important), des pompages d'essai sont entrepris sur un sondage ou sur un forage en plus gros diamètre, nécessitant souvent une foration mixte : rotary ou odex – marteau fond de trou. Dans la mesure du possible, ce forage d'essai est réalisé pour être utilisé ultérieurement en exploitation. La cimentation de la partie supérieure du forage, parfois sur plusieurs dizaines de mètres, doit être réalisée, en tenant compte des débits et de la qualité des arrivées d'eau successives. Cette cimentation est déterminante pour limiter le colmatage après la mise en exploitation.

Les pompages d'essai sont réalisés sur des longues durées (minimum un mois) de façon à identifier les limites étanches des aquifères qui sont la plupart du temps compartimentés et qui, au-delà des débits d'exhaure possibles, restreignent les possibilités d'exploitation.

L'exploitation nécessite ensuite un suivi régulier, en particulier de l'évolution des pertes de charges.

1. Introduction

Le socle armoricain couvre, à l'ouest de la France, une superficie d'environ 65000 km^2, et concerne une population d'environ six millions d'habitants. Il est constitué de roches anciennes : granite, schistes, grès, qui pendant longtemps ont été considérées comme non aquifères, à l'exception de quelques sources, alimentées par les altérations, au débit faible, utilisées pour des besoins individuels (puits fermiers) et de petites collectivités rurales.

Au milieu des années soixante-dix, l'arrivée dans la région de la technique du forage au « marteau fond de trou », a permis de mettre en évidence des ressources en eau plus profondes, qui sont à présent captées par des forages profonds (100 m et au delà).

D'une manière générale, les forages sont réalisés très majoritairement par des agriculteurs, sans étude préalable d'implantation et selon des techniques simplifiées. Ils ont une profondeur variable, correspondant aux besoins souvent faibles recherchés (quelques dizaines de m^3/jour, pour les élevages). Pour des besoins plus importants tels ceux de l'industrie agroalimentaire ou de l'alimentation en eau potable, il est nécessaire de recourir à des méthodes de prospection plus élaborées.

2. Caractéristiques principales des aquifères du socle armoricain

2.1 Principaux types d'aquifères

Si l'on excepte quelques formations particulières (bassins tertiaires, plaines alluviales), d'extension limitée, les aquifères du socle armoricain sont principalement développés dans deux types de contextes : les formations altérées superficielles (altérites) et le substrat fissuré sous-jacent.

Les altérites résultent de l'histoire continentale du massif armoricain, marquée par l'importance des phénomènes d'altération conduisant à des formations, plus ou moins meubles, de nature différente, selon la roche mère : arènes, pour les granites, argiles, pour les schistes. Les altérites sont caractérisées par une porosité d'interstices permettant un stockage de l'eau parfois important. Les perméabilités sont souvent faibles, sauf dans certains contextes (arènes sableuses, par exemple).

Le substrat fissuré est situé sous les altérites, mais peut également affleurer. La présence d'eau est liée aux discontinuités qui affectent les différentes formations géologiques : contacts et alternances de formations de nature différente (exemple : schistes et grès), joints de stratification, plans de schistosité, diaclases, fractures, filons (pegmatites, dolérites, par exemple). On constate, à la faveur de forages d'eau réalisés, à présent, de plus en plus profondément (jusque vers – 300 m) que les circulations d'eau peuvent être très profondes. Les roches du substrat sont caractérisées par une porosité de fissures, dont les capacités de stockage sont généralement faibles. Les perméabilités sont très variables et peuvent être parfois importantes, déterminant alors des débits ponctuels élevés (parfois au delà de 100 m^3/h).

La combinaison des deux contextes précédents : altérites surmontant un substrat fissuré, constitue la caractéristique principale des systèmes aquifères du socle armoricain, avec une fonction capacitive remplie par les altérites, et une fonction conductrice remplie par le substrat fissuré.

2.2. Compartimentation des aquifères

Une autre caractéristique, fréquemment rencontrée, dans le socle armoricain, est la compartimentation des aquifères. Celle ci peut correspondre à une extension limitée du secteur fissuré aquifère ou à de vraies limites imperméables, liées à des changements de faciès ou à des fractures argilisées. Il en résulte une restriction des possibilités d'exploitation, du fait de l'exiguïté induite des aires d'alimentation des captages, quelque soient les débits instantanés obtenus.

2.3. Qualité des eaux

La qualité « naturelle » des eaux souterraines du socle armoricain résulte des caractéristiques des roches les plus fréquemment rencontrées : granites, schistes, grès. Les eaux sont ainsi généralement peu minéralisées et agressives.

Dans la majorité des cas, on constate une zonation verticale des eaux : niveau superficiel, souvent riche en nitrates (dans les secteurs d'agriculture intensive), niveau inférieur, sans nitrates (du fait d'un phénomène de dénitrification très fréquemment rencontré) mais riche en fer et en manganèse. Par ailleurs, l'arsenic n'est pas rare, mais à des concentrations le plus souvent faibles.

3. Les différentes phases des recherches en eau souterraine

3.1. Objectifs recherchés

Au préalable, il est nécessaire de connaître les objectifs des recherches en eau entreprises : débits (ponctuels ou permanents), qualité des eaux. Il peut s'agir d'un complément ou d'une substitution de ressources en eau superficielle, notamment lorsque les cours d'eau sont sensibles à l'étiage. Il peut aussi s'agir de trouver une eau de meilleure qualité, grâce au phénomène de dénitrification naturelle, afin de l'utiliser en dilution avec de l'eau provenant d'un captage ou d'une prise d'eau superficielle affectée par les nitrates.

3.2. Prospections préalables à l'implantation des sondages de reconnaissance

Les prospections préalables ont pour objet de sélectionner des sites qui seront explorés par des sondages de reconnaissances. Elles se déroulent en plusieurs étapes. On distingue ainsi successivement :

- **Le choix de la zone de prospection**. Il est du ressort du maître d'ouvrage, selon ses besoins et ses contraintes (budget, territoire de la collectivité, proximité des réseaux,). Elle peut être étendue ou réduite.

- **La présélection des sites.** Elle est basée sur le rassemblement des informations géologiques et hydrogéologiques disponibles sur la zone d'étude (cartes géologiques, banque des données du sous-sol, recherches antérieures, captages privés ou publics existants). Ce premier travail peut parfois conduire à redéfinir la zone de prospection. Parallèlement, une photo interprétation est entreprise pour repérer des linéaments (contacts entre formations, fractures) pouvant être favorables à l'implantation des sondages d'exploration. Sont particulièrement recherchés les croisements de linéaments, certaines directions de linéaments (par exemple NO-SE, direction de compression générale actuelle dans le socle armoricain). A l'issue de ce travail, une première sélection de sites est fournie au maître d'ouvrage.

- **L'étude détaillée des sites sélectionnés.** Elle consiste en une visite sur le terrain pour acquérir des informations complémentaires sur la géologie et l'hydrogéologie : affleurements (souvent rares), sources, zones humides, mais aussi pour recenser les contraintes environnementales (habitat, activités artisanales, agriculture) qui pourraient, dans le cas des captages pour l'alimentation en eau potable, rendre difficile la mise en place de mesures de protection. La prise en compte de l'environnement est ainsi souvent déterminante dans le choix final ou l'élimination d'un site. En outre, est aussi examinée l'accessibilité aux matériels de forage. Cette phase conduit à un classement des sites, proposé au maître d'ouvrage, pour la réalisation des études géophysiques.

- **Les études géophysiques** *(figure 1)***.** Elles peuvent se dérouler en deux étapes : - établissement de cartes des résistivités apparentes par méthode électromagnétique (VLF résistivité, EM 34) ou, plus rarement, par traînés électriques (plus lourd à mettre en œuvre) ; - réalisation de panneaux de résistivité (tomographie électrique) pour obtenir des coupes, selon des directions déterminées par l'étape précédente.

- **La sélection définitive.** Elle est basée sur une analyse multicritères : contexte géologique et hydrogéologique, environnement. Pour chacun des sites, des propositions d'implantation des sondages de reconnaissance sont faites sur la base des résultats de la photo interprétation et de la géophysique.

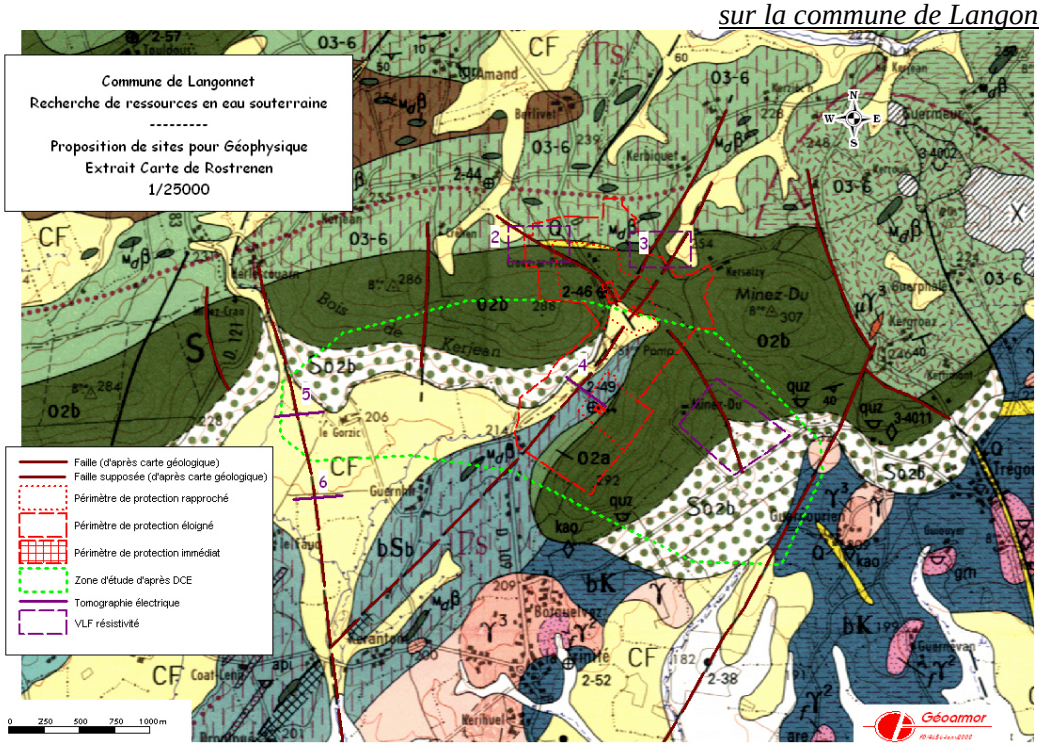
3.3. La réalisation des sondages de reconnaissance

La technique de foration la plus courante est le Marteau Fond de Trou et le Trilame *(figure 2)*. Le fluide utilisé est l'air. Cette technique est la plus appropriée pour les terrains rencontrés dans le massif armoricain pour sa rapidité d'exécution (jusqu'à 200 ml par jour). Les profondeurs d'investigations oscillent le plus souvent entre 100 et 200 m de profondeur. Les diamètres de foration utilisés sont 165 mm ou 156 mm.

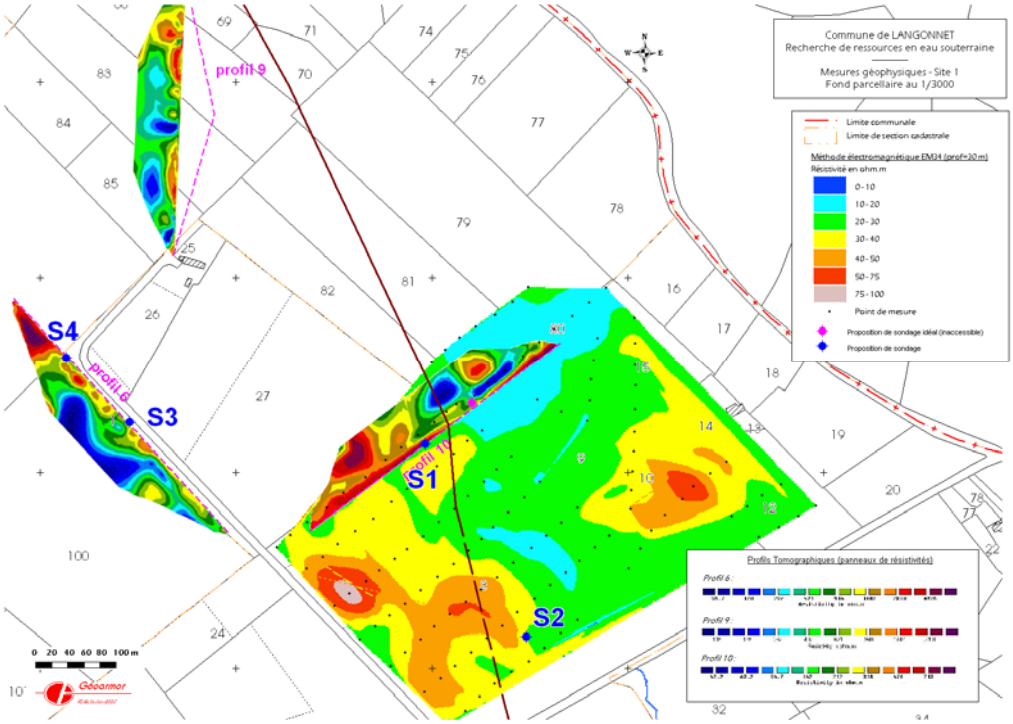
Dans la majorité des cas, la tête de l'ouvrage est réalisée en diamètre 254 mm (MFT/Trilame) sur une quinzaine de mètres de profondeur. Elle a essentiellement pour but de soutenir les formations altérées du substratum en place (argiles sableuses à blocs, arènes granitiques, etc…) et d'isoler les arrivées d'eau superficielles plus sensibles aux pollutions provenant de la surface. Le tube de soutènement classiquement utilisé est en acier AISI 304L en diamètre 193 mm sur 15 à 20 mètres, avec parfois une pose préalable de tubage en diamètre 244 mm ou 273 mm sur les 5 premiers mètres. Le choix du diamètre 193 mm est préféré car il permet la pose éventuelle d'un diamètre intermédiaire (168 mm et 139 mm) pour soutenir les terrains boulant en profondeur.

Pour l'équipement du sondage, il est utilisé, dans la majorité des cas, du PVC de diamètre 115/125 mm avec manchons à coller ou en diamètre 113/125 mm avec manchons à visser. Le tubage plein est disposé jusqu'à la première arrivée d'eau intéressante à capter (qui n'est pas forcement la première rencontrée lors de la foration). Le tubage crépiné (slot 1 mm) est disposé sur toute la longueur avec un tube plein et un bouchon de fond, en pied de forage. Un packer est disposé sur la colonne de captage avec quelques mètres de sobranite.

Figure 1 : *Exemple d'investigations préalables à l'implantation de sondages de reconnaissances sur la commune de Langonnet (56)*



Report des photo- linéaments sur fond de carte géologique



Résultats des campagnes de mesures géophysiques

Les deux figures jointes présentent une recherche d'eau récente faite à la limite des départements du Morbihan et des Côtes d'Armor. Dans une première analyse à partir des photographies aériennes et d'un diagnostic terrain, ont été reportés sur le fond géologique : les accidents repérés (contrôlés par photo-interprétation), les périmètres de protection autour des captages existants, la zone de recherche initialement prévue, les secteurs à étudier par géophysique dont la sélection a pris en compte les possibilités d'accès (accord des propriétaires).

Sur la carte représentant les résultats de la géophysique, ont été placées les propositions de sondages de reconnaissance après examen des contrastes de résistivité mis en évidence et des possibilités physiques d'accès pour une foreuse.

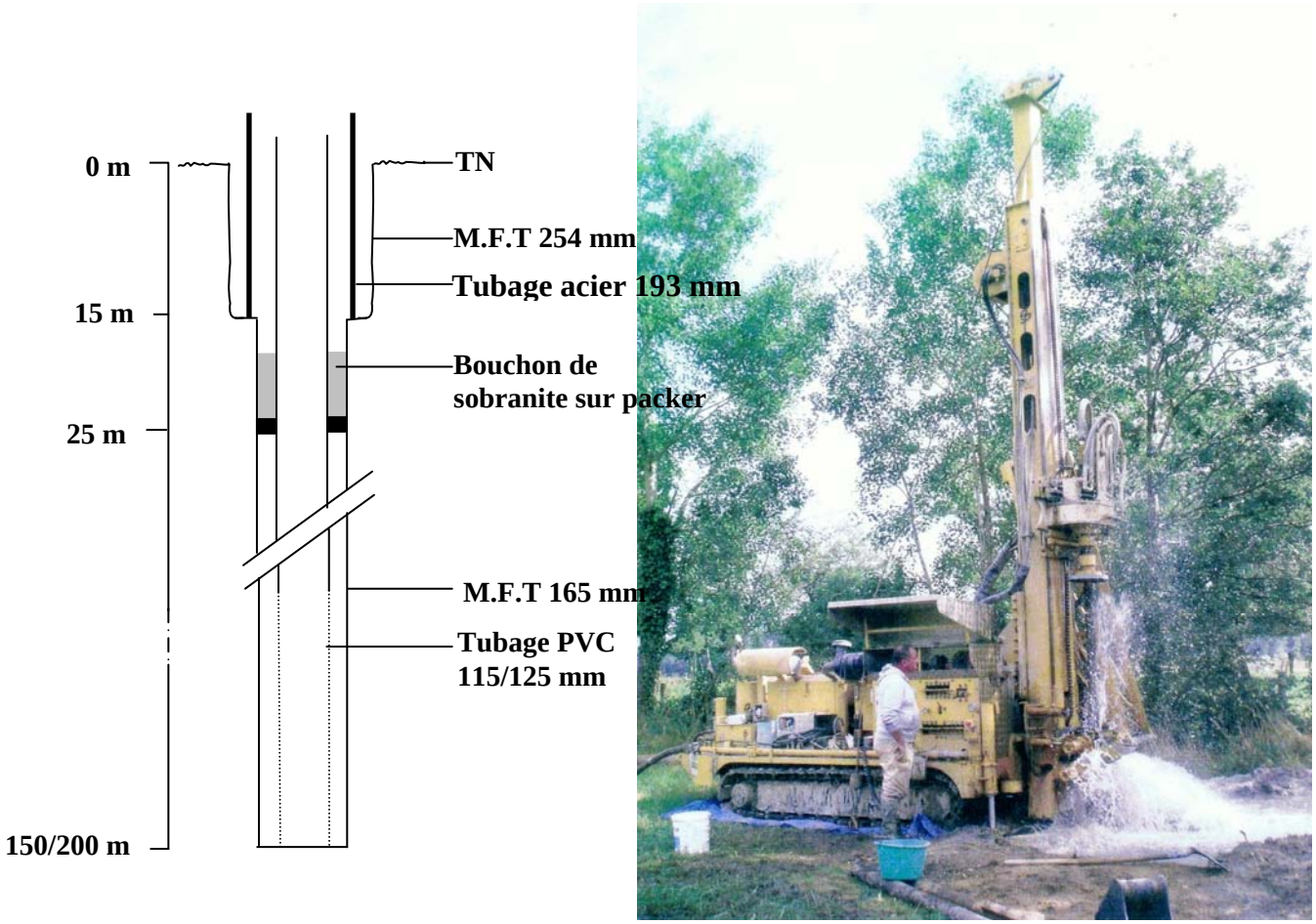


Figure 2 : *Coupe technique type d'un sondage de reconnaissance*

3.4. Les suivis effectués lors des sondages de reconnaissance

Le suivi, « à l'avancement » de la foration comprend : la mesure des vitesses d'avancement, l'analyse in-situ des cuttings, la mesure des débits instantanés « au soufflage » et la mesure in situ de paramètres de la qualité des eaux (nitrates, conductivité à proximité du littoral). En fin de foration, il est procédé à la prise d'échantillons pour des analyses plus complètes. Ces données servent à guider la réalisation de l'ouvrage : profondeur, cimentation, équipement. La cimentation n'est pas définitive de façon à pouvoir procéder à un réalésage ultérieur.

Il est parfois procédé à des investigations complémentaires *(figure 3)*. A ce sujet, une étude financée par le Conseil général du Morbihan est en cours pour réaliser des logs chimiques à la sonde portative sur une trentaine de sondages réalisés lors de campagnes de recherches d'eau. Le but de cette étude est de corréler les informations de ces logs aux coupes de terrains et à la chimie des eaux. Ces mesures pourront par la suite être rendues systématique lors des futures campagnes de recherches d'eau.

3.5. Les essais de pompage

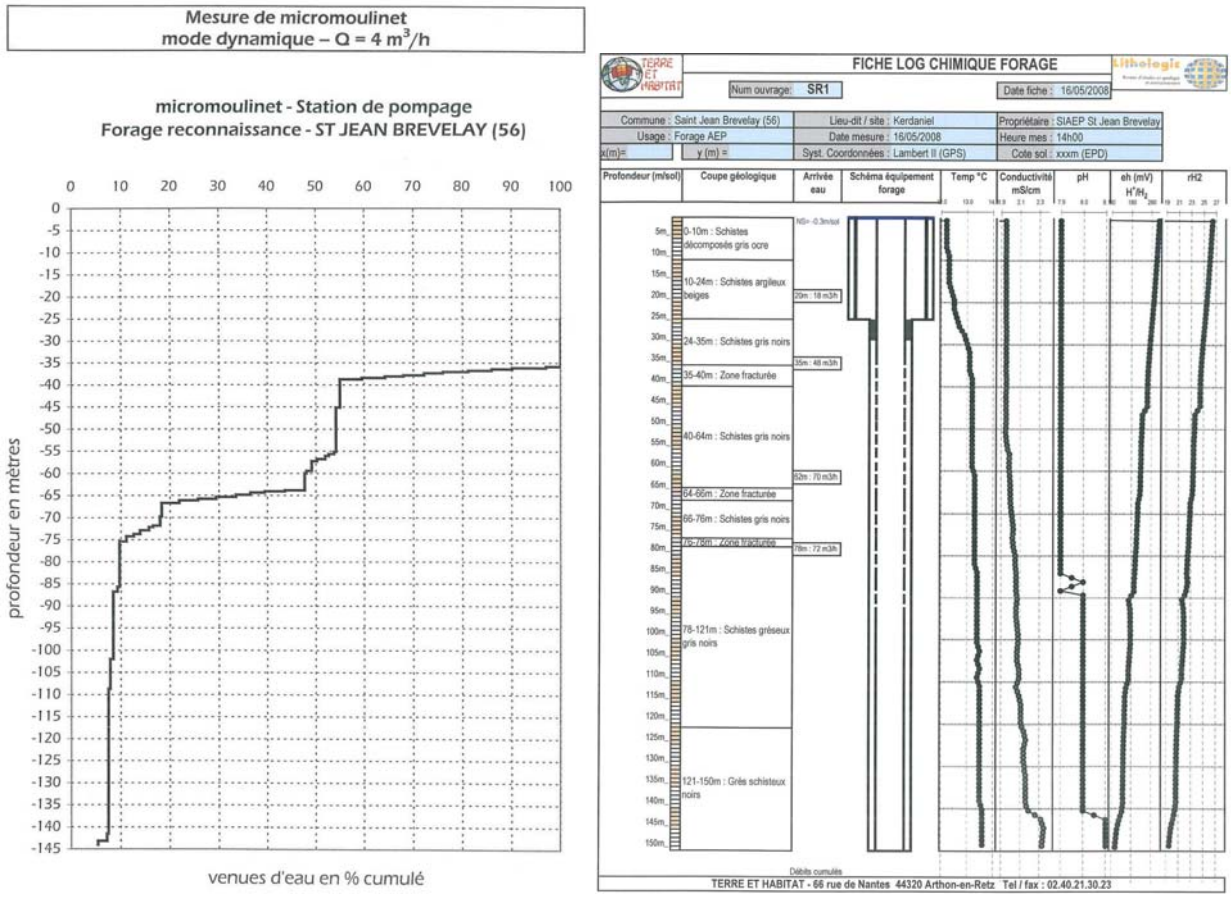
Les essais de pompages sont réalisés sur les sondages de reconnaissance préalablement à la réalisation des forages d'exploitation. Il peut arriver que des sondages ayant fourni d'importants débits au soufflage ait des possibilités d'exploitation bien plus réduites, compromettant parfois leur intérêt.

Les essais de pompages sont classiquement d'abord des **essais par paliers de débits,** pour déterminer les possibilités de production de l'ouvrage, puis des **essais de longue durée,** pour déterminer les possibilités d'exploitation de l'aquifère**,** de plus d'un mois (parfois plusieurs mois**)** pour mettre en évidence des limites étanches éventuelles (en fait très fréquentes dans le socle) qui conditionnent les possibilités d'exploitation.

Figure 3 : *Exemple d'investigations complémentaires sur un sondage de reconnaissance, site de prélèvement de Kerdaniel – SIAEP de St-Jean-Brévelay (56)*

A proximité d'un captage d'eau souterraine peu profond affecté par les nitrates, il a été réalisé un sondage de reconnaissance de 150 m de profondeur. Plusieurs arrivées d'eau ont été observées à la foration, à 18, 35 et 64 m, pour un débit cumulé en fin de foration de 72 m^3/h. Outre le tubage d'avant trou masquant la première arrivée d'eau, un packer provisoire a été placé à l'extrados du tubage entre 24 et 33 m. Un essai de pompage de plus d'un mois a été réalisé, et des analyses de nitrates effectuées. Celles-ci ont fortement varié, de 25 à 44 mg/l en cours de pompage, puis à 5 mg/l après les essais, lorsque le forage était devenu artésien. Ces différences de qualité sont probablement influencées par les variations de charges hydrauliques des différentes arrivées d'eau.

Dans cet exemple, il a été nécessaire de mieux cerner ces arrivées d'eau afin de définir l'équipement du forage d'exploitation et notamment la hauteur de cimentation pour ne conserver que les arrivées d'eau profondes et de bonne qualité. Un micro-moulinet a donc été réalisé sur le sondage, montrant les arrivées d'eau observées lors de la foration, plus une en profondeur non observée. Une sonde multi-paramètres a permis de réaliser des logs de température, conductivité, pH et potentiel rédox, montrant certaines des arrivées d'eau. Des analyses géochimiques ont été réalisées pour la datation des eaux, montrant un mélange d'eaux d'âges différents. Enfin, des prélèvements à différentes profondeurs par la mise en place de coussins gonflables vont être réalisés.



Micromoulinet, coupe technique et logs chimiques d'un sondage de reconnaissance à Saint-Jean-Brévelay (56) (sources GHI et Lithologic, graphiques GHI et Terre et Habitat)

4. Le forage d'exploitation

4.1. Techniques de réalisation

Dans la plupart des cas, le forage d'exploitation est effectué par réalésage d'un sondage de reconnaissance. Si les terrains se tiennent suffisamment en profondeur, le forage comprendra uniquement une chambre de pompage avec au-delà un trou nu. A défaut, un tubage avec des crépines sera mis en en place sur toute la hauteur.

Les techniques de foration utilisées pour réaliser un forage d'exploitation sont le Marteau Fond de Trou (MFT, en diamètres dégressifs) ou la foration mixte Rotary (air ou boue) pour la tête et le MFT pour le corps du forage. La foration en Rotary boue sur toute la longueur est très rare *(figure 4)*.

La tête de l'ouvrage est le plus souvent réalisée, soit en diamètre 444 mm pour la pose d'un tubage acier en 323 mm, soit en diamètre 381 mm pour la pose d'un tubage en diamètre 273 mm.

Le corps du forage est réalisé en diamètre 254 mm avec un stabilo et deux masses tiges en diamètre 165 mm, d'une masse tige de 140 mm et une masse tige de 127 mm. Le marteau réaléseur est équipé d'un pilote pour suivre le trou principal de foration.

L'équipement de l'ouvrage est le plus souvent en PVC avec manchons à visser en diamètre 168/180 mm et en diamètre 178/195 mm avec un slot 1 à 3 mm selon la nature des terrains. La mise en place d'un massif filtrant (type gravier calibré) est rare pour éviter les problèmes de colmatage par les oxydations métalliques (fer, manganèse). .La tête de puits est le plus souvent équipée : d'un capot acier cadenassée avec une dalle béton de 1m² en attente d'un futur aménagement pour l'exploitation.

La cimentation est une phase très importante. Elle conditionne souvent la pérennité du forage. Elle doit être réalisée avec un laitier de densité 1,4 à 1,9 sur une épaisseur d'au moins 5 cm. Il existe deux protocoles distincts en fonction de la profondeur :

- de 0 à 30 m : la cimentation s'effectue, à partir de la surface, par remplissage par injection par cannes dans l'extrados jusqu'au débordement ;

- au delà de 30 m : la cimentation s'effectue par injection d'un volume de laitier (théorique) correspondant aux volumes inter-annulaires, par le pied du tubage acier (relevé au préalable de 0,2 m) et d'un volume d'eau, correspondant au volume intérieur du tubage acier et réancrage du tubage acier. Après 12 à 24 h de séchage, un complément de cimentation depuis la surface peut être réalisé par injection. Ceci présente l'avantage d'assurer une bonne cimentation en pied de tubage.

4.2. Réception du forage

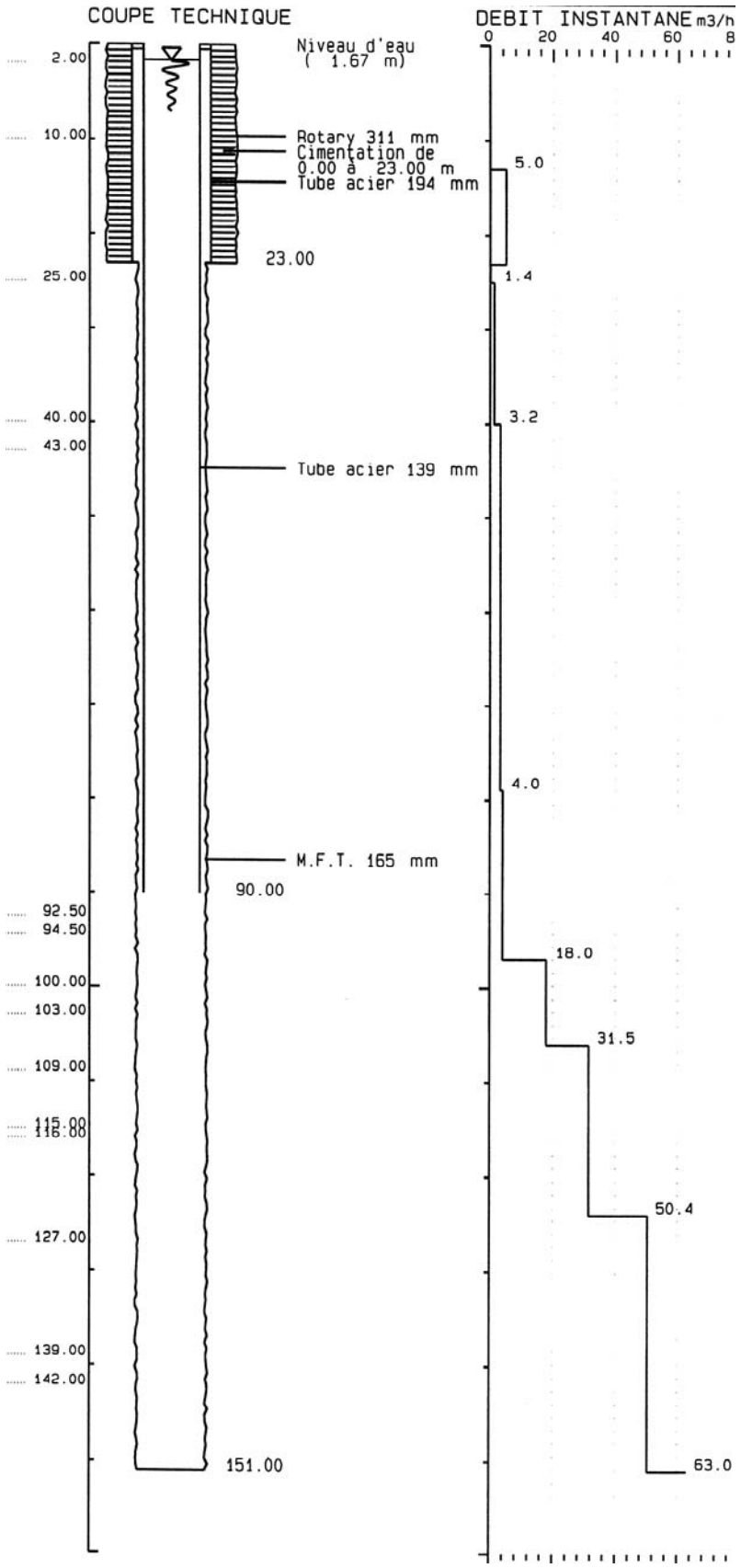
En fin de réalisation, il est procédé à des essais de pompages par paliers de débits pour établir la courbe de production débits-rabattements de l'ouvrage. Un passage caméra est aussi nécessaire pour établir la coupe technique définitive de l'ouvrage et vérifier l'efficacité des raccords par soudures ou autres.

4.3.Protection de l'environnement

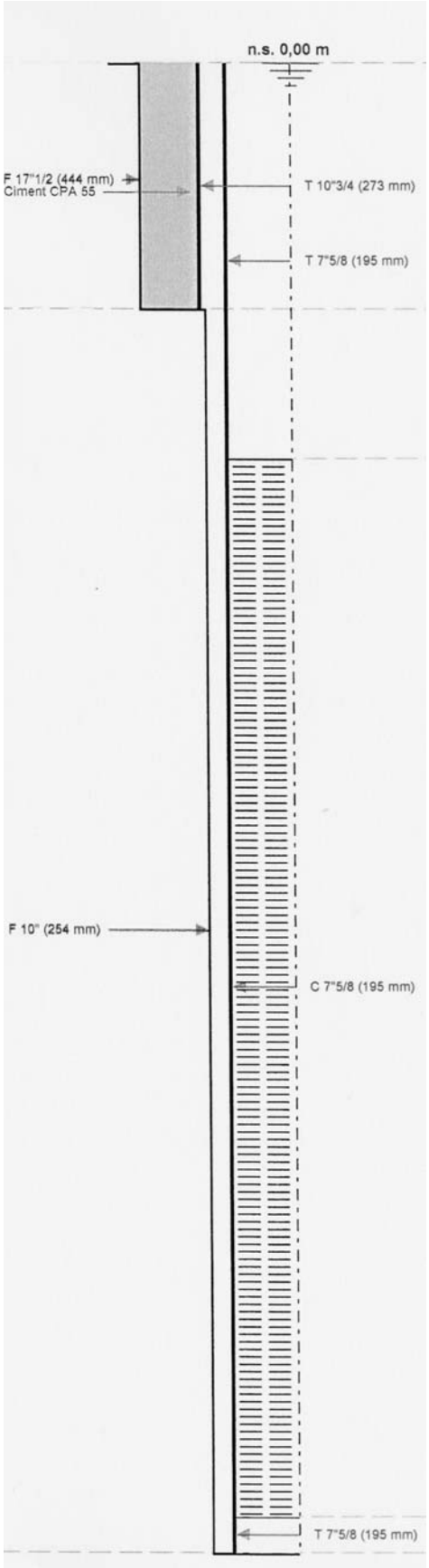
La protection de l'environnement lors des travaux de forage est à prendre en compte. Pour éviter la pollution des eaux en cas de fuites hydrauliques des engins, ou lors du ravitaillement en fuel, les matériels, ainsi que le stockage des hydrocarbures, sont placés sur bâche plastique ancrée sur un merlon périphérique. Le chantier est doit également être approvisionné en matériaux (sciures, sables, conteneurs …).

Si les débits d'exhaure sont importants un bassin de rétention et un filtre à paille sont mis en place pour récupérer et décanter les eaux de forage (riches en matières en suspension).

Figure 4 : *Exemple de coupes techniques de forages d'exploitation – (Côtes d'Armor)*



Chambre de pompage avec un trou nu
Forage F2, Site de Berlouze (Saint Hervé -22)



Equipement sut toute la hauteur
Forage F2, Site de Pont Romain
(Pledran, 22)

5. Suivis après la mise en exploitation

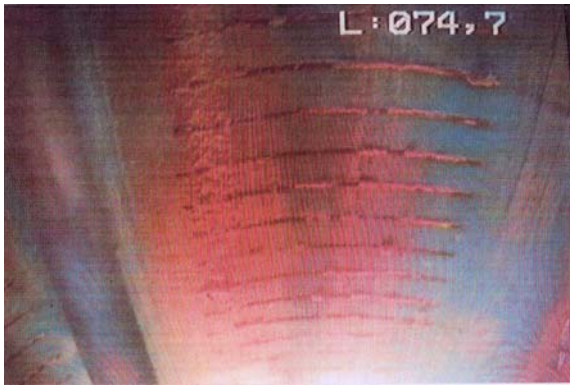
Dans le socle, deux données essentielles caractérisent le couple ouvrage/aquifère : le débit maximum exploitable et le rabattement maximum admissible. Avec des caractéristiques chimiques de l'eau captée en profondeur particulières (pH faible, teneurs en fer et manganèse élevées), une mauvaise gestion de l'exploitation peut être très dommageable pour l'ouvrage. De nombreux ouvrages utilisés notamment pour l'alimentation en eau potable ont vu leur débit chuter du fait du colmatage *(figure 5)*. Ces dégradations sont souvent liées à une mauvaise connaissance des caractéristiques de l'ouvrage avant sa mise en service.

Pour s'assurer qu'un forage est exploité correctement, un suivi piézomètrique en continu dans l'ouvrage est préconisé. Ce suivi nécessite la mise en place d'un équipement d'acquisition automatique du niveau d'eau (sonde de pression couplée à une centrale d'acquisition). Ce suivi piézomètrique doit impérativement s'accompagner d'un enregistrement des volumes d'exhaure (débit et volume). Si quelques sites de prélèvement disposent déjà d'un suivi de cette nature, l'exploitation des données est bien souvent malheureusement encore incomplète.

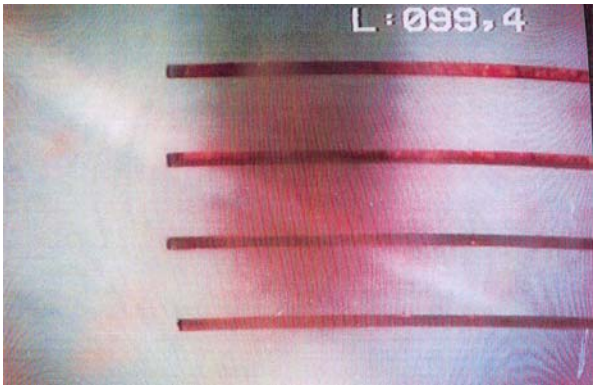
Face à ce constat, le Conseil général des Côtes d'Armor propose depuis 2006 aux collectivités qui le souhaite, d'assurer ce suivi des ouvrages avec la mise en place des équipements de mesures (pour les sites non équipés), la collecte des données et leur interprétation *(figure 6)*.

Figure 5 : *Exemple de colmatage sur le site des Prés Hauts sur la commune de Plouvara (22)*

La dégradation de deux forages récents sur le site des Prés Hauts (commune de PLOUVARA – 22) illustre ce phénomène. Ce site de prélèvement d'eau souterraine, exploité par le Syndicat des Eaux de Boëgan, comprenait lors de sa mise en service en 1986, 3 forages d'une profondeur comprise entre 70 et 90 m. Le volume autorisé pour l'ensemble du site est de 150 000 m^3/an, soit environ 400 m^3/j. En 2003 puis en 2005, les forages F1 et F2 ont été remplacés par de nouveaux forages situés à quelques mètres seulement des précédents pour maintenir la production du site. Ceux-ci ne pouvaient en effet plus assurer une production satisfaisante en raison très probablement de leur colmatage. Ces nouveaux forages (FE2bis et FE1bis) ont été réalisés sans suivi hydrogéologique et sans déterminer les courbes caractéristiques. Si le forage F1 bis est toujours exploité et semble en état suite à un diagnostic récent, le forage F2 bis a lui été abandonné en 2007. L'essai de puits mené dans cet ouvrage avant son abandon indiquait un débit critique voisin de 12 m^3/h, alors qu'il état exploité à 18 m^3/h. L'inspection caméra a rencontré un équipement particulièrement sale avec des dépôts importants d'hydroxydes de fer et de bactéries. Les crépines étaient colmatées entre 80 et 100 %.



Crépines colmatées



Crépines ouvertes

Inspection télévisée du forage F2bis du site des Prés Hauts (Plouvara – 22)

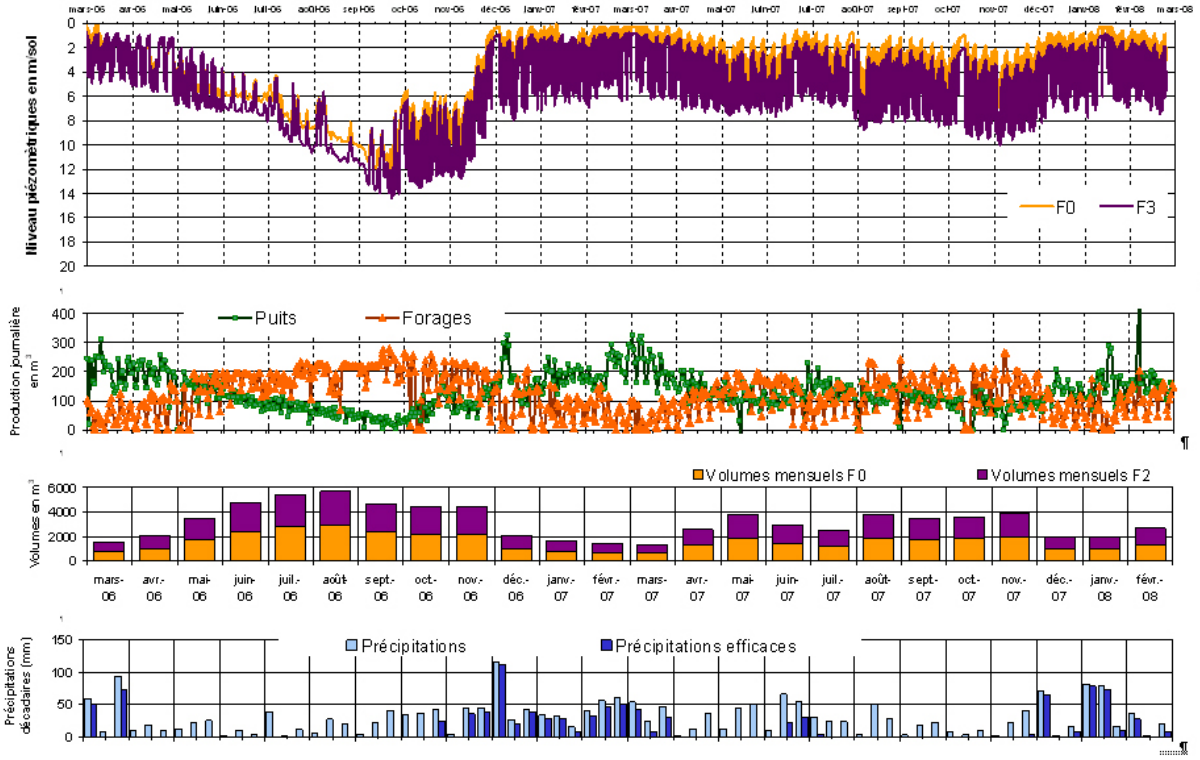
Figure 6 : *Exemple de suivi mis en place sur un site de prélèvement composé de forages profonds*

site de Berlouze – Commune de Saint Hervé (22)

Ce type de suivi est en place sur le site de Berlouze pour le compte de la commune de SAINT-HERVE. Suite à des problèmes d'exploitation en 2003 des deux forages F0 et F2 réalisés en 1976 et 1990, qui se traduisaient par une baisse de la production générale du site, la commune a décidé en 2004, avec l'appui du Conseil général, de réaliser deux nouveaux forages d'exploitation. En effet, les anciens ouvrages étaient peu profonds (55 et 91 m), sans cimentation en tête, et présentaient des signes de colmatage. Les deux nouveaux forages ont été réalisés entre novembre et décembre 2004, au droit des anciens ouvrages. L'approfondissement des trous (150 m) a permis de capter sur chacun des deux forages, des arrivées d'eau plus profondes et en plus grande quantité (50 et 63 m^3/h au soufflage). La cimentation en tête sur 23 m a occulté les arrivées superficielles riches en nitrates. L'eau brute est d'excellente qualité mais présente des teneurs en fer et en manganèse très importantes (8000 à 12000 µg/l pour le fer et 300 µg/l pour le manganèse), ce qui nécessite une attention particulière pour leur abattement. Ces forages ont été mis en service à la mi-février 2006 avec la réfection globale des équipements d'exhaure, des capots de protection et la pose de sondes piézométriques et de débitmètres. La commune de SAINT-HERVE a confié au Conseil général en 2006 une mission pour assurer le suivi de ces deux forages en adéquation avec la filière de traitement. Les principales caractéristiques des deux forages réalisés en 2004 sont les suivantes :

Ouvrage	*Profondeur atteinte*	*Cimentation*	*Diamètre interne*	*Débit au soufflage*	*Débit critique*	*Rabattement maximum admissible*
F0	*151 m*	*0-23 m*	*Tube acier 139 mm*	*50 m^3/h (contre 27 initialement)*	*9-10 m^3/h*	*25 m/sol*
F2	*151 m*	*0-23 m*	*Tube acier 139 mm*	*63 m^3/h (contre 16 initialement)*	*9-11 m^3/h*	*34 m/sol*

Le suivi de la ressource en eau consiste en une visite régulière des installations (fréquence mensuelle) pour contrôler les appareils d'acquisition automatiques (sondes piézomètriques) et relever les index des différents compteurs volumétriques, et en l'analyse de l'ensemble de ces mesures. Les appareils de mesures sont gérés par l'exploitant (SAUR France). L'ensemble des données est enregistré au pas de temps horaire :



Suivi des ouvrages F0 et F2 du site de Berlouze

Le suivi de ces deux ouvrages depuis 2006 confirme qu'une exploitation raisonnée avec une production moyenne de 250 m^3/j entraîne une baisse limitée des niveaux piézomètriques au regard des niveaux maximums admissibles qui sont bien en deçà. Dans ce cas précis, une production complémentaire pourrait donc être envisagée pour répondre ultérieurement à des besoins nouveaux. Ce suivi permet de prévenir les risques de colmatage des ouvrages et de prévoir en temps voulu, des évolutions sur le régime d'exploitation.

Forage profond en aquifère karstique dans le Jura suisse

Ce texte est un résumé.
Pour en savoir plus, visionner la vidéo de la conférence sur le DVD joint ou sur www.ahsp.fr.
Le comité de rédaction des actes

Christian RIEBEN

MFR Géologie-Géotechnique, rue de Chaux 9, 2800 Delémont, Suisse, christian.rieben@mfr.ch

Dans le Jura, l'alimentation en eau des communes est souvent assurée par des sources karstiques. Celles-ci présentent d'une part une grande vulnérabilité et d'autre part des déficiences qualitatives récurrentes (turbidité, bactériologie). Pour ces raisons, une diversification et une sécurisation des approvisionnements sont parfois nécessaires. Dans le Jura suisse, une alternative intéressante existe dans les aquifères karstiques profonds sous couverture tertiaire peu perméable. Un tel projet a été réalisé cette année à St-Imier, petite ville située dans le Jura plissé suisse. Ce projet s'est déroulé en 2 phases :

- 1996-1998 : exécution de 2 forages de reconnaissance suite à une prospection géologique, hydrogéologique et géophysique de surface. Cette phase a été initiée et financée par l'Office de l'Economie Hydraulique et Energétique du canton de Berne (canton = équivalant d'un département français). Son coût était d'environ 850 000 €.
- 2007-2008 : réalisation d'un puits d'exploitation de 650 m de profondeur. Cette phase a été financée par l'association paritaire formée par la ville de St-Imier (5'000 hab.) et par le Syndicat des eaux des Franches-Montagnes (regroupement de 27 communes des cantons de Berne et du Jura). Le coût de cette opération est d'environ 1 000 000 €.

Lors de la 1ère phase, deux sites de reconnaissance par forage ont été définis sur la base d'une prospection du sous-sol par sismique réflexion haute résolution. Deux forages de petits diamètres ont été réalisés jusqu'à des profondeurs respectives de 660 m et 580 m. Les essais de pompage ont démontré l'existence d'une importante ressource aquifère.

A partir de ces résultats encourageants, un projet de puits d'exploitation a été élaboré au droit du site présentant les meilleures caractéristiques. Le diamètre de cet ouvrage devait être suffisant pour installer une pompe immergée capable de refouler un débit de l'ordre de 300 m³/h sur une hauteur de 250 m. Un appel d'offre public a été lancé pour la réalisation des travaux et c'est l'entreprise suisse Foralith SA qui a été chargée de les exécuter.

Les travaux ont commencé au début de l'automne 2007 et les opérations de forage proprement dites se sont terminées à la fin de l'année. Au printemps 2008 ont débuté les phases de nettoyage, pompage, développement et équipement final de l'ouvrage. Un essai de pompage à débit constant d'une durée de 48 jours a permis d'extraire un débit de 4 800 l/min avec un niveau stabilisé à 200 m de profondeur (rabattement de 130 m). La qualité bactériologique et physico-chimique des eaux est irréprochable. Aucune trace de substances d'origine anthropique n'a été décelée.

Ces résultats correspondent pleinement aux objectifs définis préalablement. Actuellement, le projet de raccordement de ce nouvel ouvrage au réseau d'adduction de la ville de St-Imier et du SEF est en cours de démarrage (coût estimé : env. 10 millions d'euros).

Dans la communication, l'accent sera porté sur la géologie locale, la méthode de forage, les diagraphies et les techniques de développement de l'ouvrage ainsi que les résultats des pompages.

Réalisation d'un forage destiné à l'embouteillage d'eau minérale naturelle

Ronan LE FANIC

Nestlé Waters M.T., BP 101, 88804 Vittel, France, ronan.lefanic@waters.nestle.com

Résumé :

Nestlé Waters est le leader mondial de l'eau embouteillée. Implanté dans 40 pays, nous produisons différentes catégories d'eau embouteillée : eau minérale naturelle, eau de source, eau de table...

Avec un parc de plus de 500 forages, la réalisation et le management de nos ouvrages sont considérés comme une activité stratégique. Les méthodes et les équipements utilisés ont pour but d'assurer la pérennité des ouvrages ainsi qu'une protection de la ressource sur le long terme.

En Europe, ces spécificités sont d'autant plus importantes dans le cadre de la production d'eau minérale naturelle.

Différents points techniques ont spécialement dû être adaptés afin de protéger nos forages de tout type de pollution et de préserver la pureté originelle de la ressource.

Une étude menée par l'AFNOR a permis l'élaboration de standards pour les forages destinés à la production d'eau minérale ou d'eau de source.

1. Introduction

Nestlé Waters est le leader mondial de l'eau embouteillée. Implanté dans 40 pays, nous produisons différentes catégories d'eau embouteillée : eau minérale naturelle, eau de source, eau de table...

Avec un parc de plus de 500 forages, la réalisation et le management de nos ouvrages sont considérés comme une activité stratégique. De ce fait, les méthodes appliquées et les équipements utilisés ont pour but d'assurer la pérennité des ouvrages ainsi qu'une protection de la ressource sur le long terme.

En Europe, ces spécificités sont d'autant plus importantes dans le cadre de la production d'eau minérale naturelle. Par définition, ces eaux ne peuvent subir d'autres traitements que ceux autorisés par la législation Française et Européenne. Cela entraîne des investissements importants principalement liés à la conservation de la pureté originelle de la ressource.

2. Législation sur l'eau minérale naturelle

L'eau minérale naturelle est définie par la Directive Européenne 80/777 du 15 juillet 1980. Elle mentionne principalement les trois points suivants :

- Tout traitement de désinfection, l'adjonction d'éléments bactériostatiques ou tout autre traitement de nature à modifier le microbisme de l'eau minérale naturelle sont interdits (article 4.2),
- A l'émergence, la teneur totale en micro-organismes revivifiables doit être conforme à son microbisme normal et témoigner d'une protection efficace de la source de toute contamination (article 5.1),
- A l'émergence et au cours de sa commercialisation, une eau minérale naturelle doit être exempte de toutes contaminations microbiologiques : parasites, pathogènes, pseudomonas, coliformes, streptocoques (article 5.1).

Cette Directive est reprise au niveau national par le Décret n°89-369 du 6 juin 1989. Il précise dans l'article n°2 que : L'eau minérale naturelle témoigne, dans le cadre des fluctuations naturelles connues, d'une stabilité de ses caractéristiques essentielles, notamment de composition et de température à l'émergence, qui n'est pas affectée par le débit de l'eau prélevée. Elle se distingue nettement des autres eaux destinées à la consommation humaine:

- Par sa nature, caractérisée par sa teneur en minéraux, oligo-éléments ou autres constituants et par certains effets;
- Par sa pureté originelle, l'une et l'autre caractéristiques ayant été conservées intactes en raison de l'origine souterraine de cette eau qui été tenue à l'abri de tous risques de pollution.

3. Installation du chantier

Des règles générales sont appliquées afin de respecter de bonnes conditions d'hygiène et de minimiser les risques de pollution accidentelle de l'ouvrage :

- Le chantier est clôturé et balisé pour interdire l'accès aux personnes extérieures.
- La cabane de chantier doit être située à plus de 25 m du forage.
- Les sanitaires sont installés à plus de 50 m du forage.
- La plate-forme de chantier est installée sur un géotextile avec une pente permettant l'évacuation des fluides.
- Un fossé drainant étanche permet la récupération des fluides avec raccord sur un bac dégraisseur.
- Les graisses, lubrifiants et produits chimiques sont stockés sur des bacs de rétention.
- Aucun hydrocarbure n'est stocké sur le site. L'approvisionnement des engins est fait par des camions qui quittent le site une fois l'opération terminée.

4. Réalisation du forage

La méthode de forage utilisée est adaptée en fonction du contexte géologique. Elle doit également minimiser l'impact (qualité, quantité) sur les ouvrages existants :

- Le forage à l'air est recommandé. Il a l'avantage de remonter des cuttings propres et de permettre une analyse qualité des venues d'eau. Le compresseur d'air est obligatoirement sans huile.
- Le forage à l'eau est une solution envisageable avec de l'eau sans contamination chimique ou microbiologique. L'eau minérale d'autres forages est utilisée si possible.
- Le forage à la boue n'est pas recommandé. On n'utilise pas de boues avec polymères car il y a un risque possible de contamination bactériologique.
- Le forage à la mousse n'est pas recommandé car il y a un risque possible de contamination bactériologique. Les mousses biodégradables sont par définition un bon substrat pour le développement des bactéries.

Selon les sites et le contexte géologique, le forage en percutions avec tubage à l'avancement pourra être envisagé même si la vitesse d'avancement est très lente.

Tous les outils sont désinfectés avant utilisation par une solution désinfectante (ex: acide péracétique + peroxyde d'hydrogène). Le chlore n'est pas utilisé à cause des risques de formation de sous-produits.

Figure 1 : Désinfection d'une pompe avant installation

5. Equipement du forage

Concernant l'équipement des forages destinés à l'embouteillage d'eau minérale, les tubes pleins et les crépines sont connectés soit par soudure TIG (Tungsten Inert Gas) soit vissés (ex : Tubexor) et soudés soit en utilisant des connections « ZSM ». Tous ces tubes sont en acier inoxydable 316L.

La pompe et la colonne d'exhaure sont également en acier inoxydable 316L. La connexion « ZSM » est préférable pour sa facilité d'installation. Il est très important de minimiser le temps d'intervention sur les ouvrages afin de ne pas pénaliser la production et minimiser les risques de contamination accidentelle pendant l'opération.

Tous les ouvrages sont équipés d'un monitoring (débit, niveau d'eau, pression en tête) en continu.

6. Equipement de surface

L'équipement de surface est une partie stratégique de l'ouvrage.

Une bride étanche avec mise à l'air est soudée sur le casing de production. Un filtre microbiologique est installé sur l'évent pour éviter une contamination par l'air (spores, bactéries…).

Le design général de la tête de forage permet d'éviter toutes les « zones mortes ». Cela minimise le risque de développement bactérien dans les zones sans circulations d'eau.

Toutes les connections utilisées sont pratiques et sanitaires. Les objectifs sont de :

- faciliter la maintenance en minimisant le temps d'opération
- minimiser les zones de rétention pour éviter le développement de biofilm, notamment dans les robinets de prélèvement.

7. Système de désinfection des ouvrages

Dans le cadre des forages « eau minérale », il est important de garder la possibilité de désinfecter un forage en cas de contamination microbiologique accidentelle via une boucle en circulation fermée. La procédure de désinfection est adaptée à chaque forage afin d'éviter la perte de solution désinfectante dans l'aquifère et d'assurer le rinçage parfait de l'ouvrage avant le redémarrage en production. Le suivi qualité continu au cours de l'opération est réalisé au robinet de prélèvement.

La connexion « forage-usine » doit également être nettoyable et désinfectable. Une boucle de désinfection peut être effectuée via un double tuyau reliant le forage à l'usine. Si ce n'est pas le cas, la désinfection de la conduite s'effectuera soit depuis l'usine avec une mise au drain et une récupération de la solution désinfectante au forage soit depuis le forage jusqu'à l'usine.

8. Sécurité des ouvrages

Afin d'assurer la protection des ouvrages des règles générales sont appliquées:

- zone clôturée autour du forage,
- abri de forage avec murs carrelés,
- abri de forage avec sol carrelé ou revêtu avec inclinaison de 1%,
- drain équipé d'une grille anti-rongeurs,
- ventilation équipée d'une grille anti-insectes,
- lampe UV anti-insectes.

De plus, une « sécurité passive » est installée:

- trappe sécurisée dans le toit pour manœuvrer la pompe et les tubes,
- pas de fenêtre (ou fenêtre sécurisée),
- porte sécurisée (blindage, clés).

Et enfin une « sécurité active » est en place sur tous les ouvrages de production ou de surveillance:

- capteur de mouvement installé dans l'abri connecté à un système d'intervention 24h/7j,
- détecteur de contact sur la porte avec digicode,
- système vidéo 24h/7j,
- mise au drain automatique du forage en cas d'intrusion.

9. Conclusions

Dans le cadre des ouvrages destinées à l'embouteillage d'eau minérale naturelle, Nestlé Waters a adapté différents points techniques comme la désinfection des équipements avant installation (pompe, tubes, câbles, capteur, etc.), la possibilité de désinfecter un ouvrage en cas de contamination microbiologique, le choix des matériaux utilisés, le choix des équipements qui seront installés en surface afin de minimiser les temps d'intervention en cas de maintenance, le design de la tête de forage afin de minimiser les développement éventuel de biofilm, etc.

Ces points ont en partie fait l'objet en 2007 d'un groupe de travail organisé par l'AFNOR auquel Nestlé Waters a participé. Il a permis l'élaboration de standards pour la réalisation d'un forage d'eau (norme NF X 10-999) ainsi que de recommandations spécifiques pour les forages destinés à la production d'eau minérale ou d'eau de source (norme NF X 10-990).

Le forage de la piscine de Millau : problématique des forages jaillissants à plus de 400 m^3/h

Christophe SUBIAS [1], Laure PINCHON [1]

[1] CALLIGEE, rue Innopole, Le Prologue 2, BP 2714, 31312 LABEGE Cedex, c.subias@calligee.fr

Résumé

La Mairie de Millau a décidé en 2007 de reconnaître l'assise carbonatée constituant le sous-sol de l'agglomération millavoise, près du centre nautique actuel. L'artésianisme de la nappe du Lias (calcaires du Carixien-Sinémurien) était fortement pressenti. Un « tableau de bord » de la foration a été minutieusement préparé afin d'établir un prévisionnel au plus juste et prenant en compte les contraintes associées à la tenue des roches, à leur dureté ainsi qu'à la présence d'eau (débit et pression). La foration de cet ouvrage dont le débit d'artésianisme a atteint 465 m^3/h à 70 m a du faire face à des contraintes techniques importantes et notamment la réalisation des cimentations qui garantissent la pérennité de l'ouvrage en terme quantitatif (pertes d'eau), mais aussi qualitatif (isolement des venues d'eau superficielle). Les essais débit-pression ont permis d'établir des scénarios d'exploitation de la nappe à des fins géothermiques et ont montré que l'utilisation de ce forage était envisageable pour des pompages de 50 m^3/h en continu.

Avant-propos

La plupart des guides destinés à réglementer les forages d'eau occultent le plus souvent les ouvrages possédant un artésianisme jaillissant qui représentent pourtant des cas particuliers qu'il est primordial de traiter avec précaution et sérieux.

Cette communication vise à présenter les difficultés liées à la conception et la mise en œuvre de ce type d'ouvrage en prenant l'exemple du forage de la piscine de Millau (Aveyron) possédant un débit artésien jaillissant évalué à plus de 400 m^3/h.

Contexte géologique et coupe prévisionnelle

La Mairie de Millau a décidé d'entreprendre en 2007 des travaux de reconnaissance géologique de l'assise carbonatée du Lias inférieur constituant le sous-sol de l'agglomération millavoise (voir figure 1). L'objectif principal était de rechercher de l'eau pour une utilisation géothermique afin d'alimenter le centre nautique de la commune.

D'après la carte géologique de Millau (voir figure 2), le forage initialement prévu à 100 m de profondeur devait recouper les calcaires dolomitiques karstifiés du Carixien - Sinumérien. L'artésianisme de la nappe du Lias était fortement pressentie avec une pression de quelques centaines de grammes.

Les 1ères questions qui se sont posées lors de la conception du cahier des charges relatif aux travaux de foration sont les suivantes :

1. comment prévoit-on la réalisation technique d'un tel forage ?
2. comment prévoit-on la coupe technique finale d'un tel forage ?

1 - comment prévoit-on la réalisation technique d'un tel forage ?

Dans un 1er temps, il est obligatoire de réaliser la <u>coupe lithologique prévisionnelle</u> au droit du site du futur forage (voir figure 3). Dans notre cas, la succession lithologique des couches se composait de la manière suivante :

- 1 à 2 m de remblais,
- 4 à 5 m d'alluvions sablo-graveleuses du Tarn
- 50 m de calcaires argileux à interlits marneux du Carixien,
- 44 m de calcaires compacts et dolomies du Sinémurien.

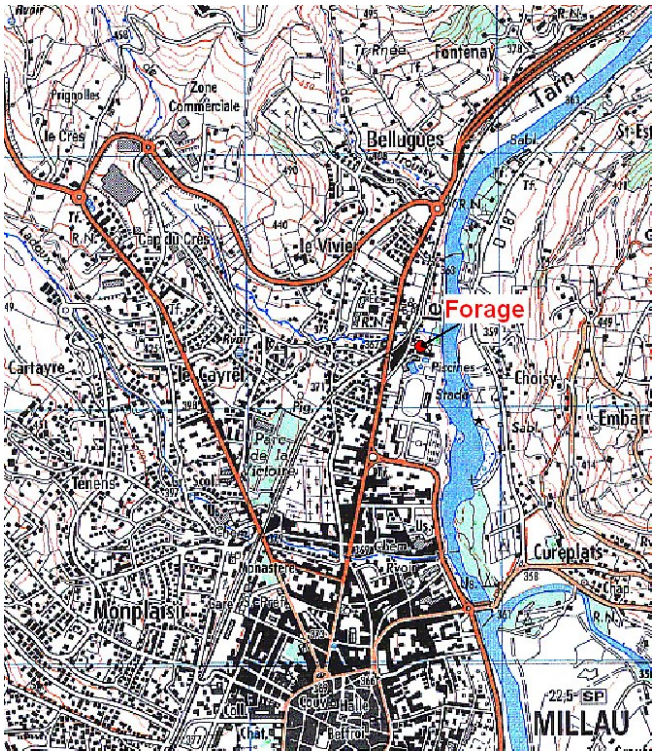


Figure 1 : *Situation géographique du forage de la piscine*

Dans un deuxième temps, il était important de qualifier les caractéristiques de foration de chaque couche en fonction de :

- la dureté à la foration,
- la tenue de chaque couche (capacité au non éboulement, sans, ou avec adjuvants),
- la présence d'eau (capacité à poursuivre la foration sous un niveau piézométrique),
- la profondeur (chaque technique a sa profondeur maximum d'investigation).

Les valeurs de chaque caractéristique permettent ainsi de choisir la ou les techniques de foration : Rotary, Battage, Marteau fond de trou (MFT), Vrille… comme indiqué dans le tableau suivant :

Lithologie	Dureté	Tenue des terrains	Présence d'eau (débit et pression)	Technique de foration envisageable
Remblai	0	0	15% de porosité Nappe superficielle à faible débit et P°	Tarière ou vrille Pré-tubage
Alluvions	0	1	10% de porosité Nappe à faible débit et P°	Tarière Pré-tubage
Calcaires du Carixien	4	5	Artésianisme pressenti	Marteau fond de trou
Calcaires du Sinémurien	5	5	Artésianisme pressenti °	Marteau fond de trou

Tableau 1 : *Classe de dureté et de tenue de 0 à 5*
avec 0 : sol non consolidé à faible tenue 5 : roche très indurée à très forte tenue

Deux méthodes de foration sont donc envisagées pour le projet :

- foration à l'air de type « Marteau fond de Trou » dans les calcaires liasiques. Cette méthode a un double avantage : elle permet la foration de formations cohérentes à partir d'une vitesse de perforation élevée et d'un circuit d'air à haute pression (10-25 bars). Ce système permet de remonter les cuttings et de mettre en place facilement la colonne filtrante,
- foration à la vrille ou à la tarière dans les matériaux instables de surface avec positionnement d'un pré-tubage.

L'**artésianisme** de la nappe captive du Lias était pressentie avec une pression autour de 1 à quelques centaines de grammes. Le débit d'alimentation était totalement inconnu et dépendait de l'état de karstification des calcaires liasiques jusqu'alors inconnu. Il y avait donc des risques importants de recoupement de fractures qui pouvaient engendrer des augmentations importantes de débits

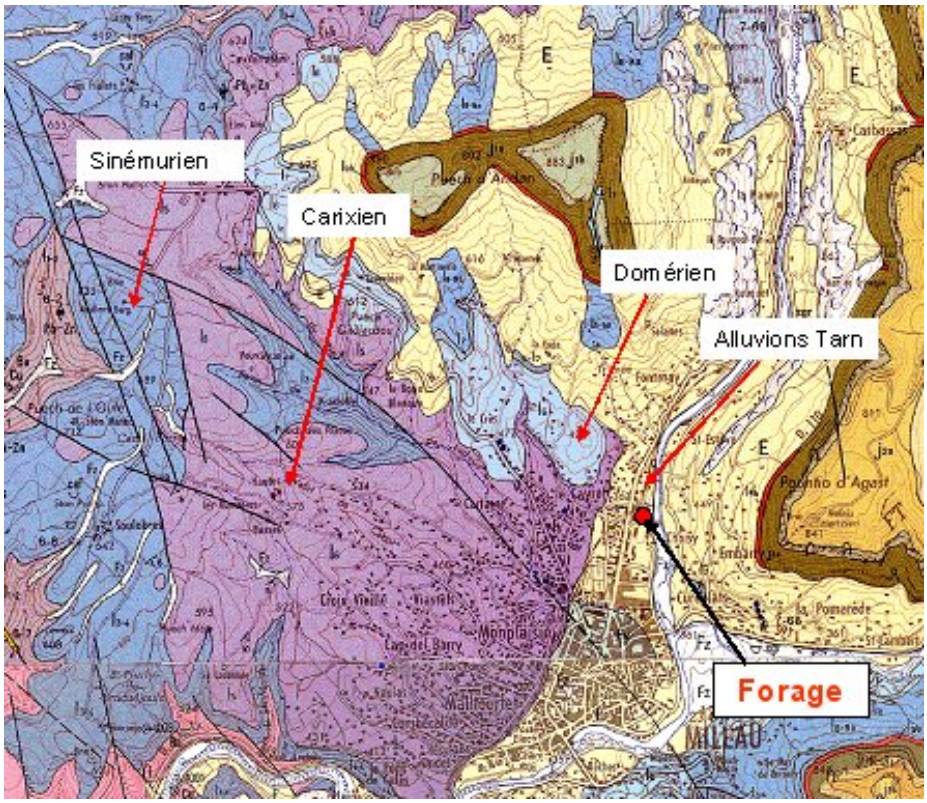


Figure 2 : *Contexte géologique du forage de la piscine*

L'artésianisme de la nappe était également supposée par la connaissance de la source de la Mère de Dieu à la position altimétrique (385 m NGF) et dont le débit est soutenu.

2 - comment prévoit-on la coupe technique finale d'un tel forage ?

On prévoit la coupe technique finale en fonction de la pompe à placer à une certaine profondeur prévisible et en fonction des caractéristiques de la nappe (transmissivité et rabattement à définir ou à calculer). On **définit ensuite les diamètres de foration en remontant** et notamment les parties à tuber, en fonction :

- de la tenue des couches,
- de la présence d'eau et notamment de la pression d'eau en surface et du débit prévisible.

Il est important de toujours prévoir un ou deux diamètres de secours puisque les paramètres prévus sont définis d'après les dires d'un expert hydrogéologue. Le tableau suivant résume les 4 étapes de foration prévues.

Lithologie	Tenue des terrains	Présence d'eau (débit et pression)	Diamètre de foration	Nature et diamètre de tubage
Remblai	0	Nappe superficielle à faible débit et P°	520 mm	Acier 457 mm
Alluvions	1	Nappe à faible débit et P°	445 mm	Acier 323 mm
Calcaires du Carixien	5	Artésianisme pressenti	311 mm	Acier 244 mm
Calcaires du Sinémurien	5	Artésianisme pressenti	222 mm	PVC 140 mm Pompe de 4 pouces

Il était prévu de cimenter l'espace annulaire des 60 premiers mètres afin d'isoler quantitativement et qualitativement les venues d'eau superficielles contenues principalement dans les alluvions du Tarn.

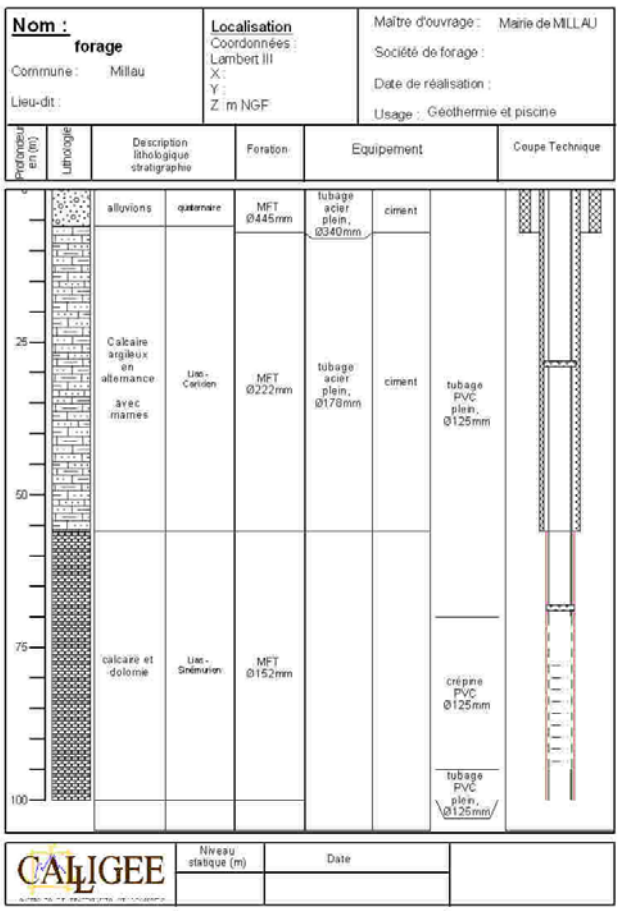


Figure 3 : *Coupe prévisionnelle*

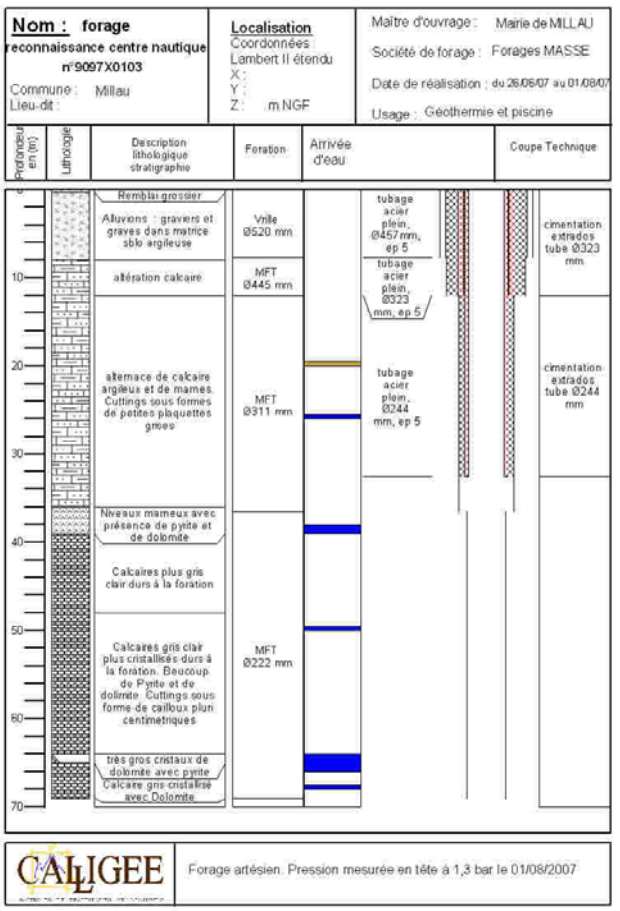


Figure 4 : *Coupe définitive*

Problématique de chantier et contraintes de cimentation

L'entreprise MASSÉ a été retenue en juillet 2007 pour réaliser le forage au « Marteau Fond de Trou » en quatre étapes de foration (520, 445, 311 et 222 mm).

Au cours des travaux, le suivi régulier par un ingénieur hydrogéologue expérimenté a été primordial et a permis d'adapter les techniques de foration aux problématiques de chantier qu'elles soient techniques, hydrauliques ou réglementaires. De plus cette surveillance en continu est primordiale afin de **définir au plus juste** la profondeur du pied de tubage à cimenter : ne pas masquer des arrivées d'eau mais cependant s'arrêter juste avant pour offrir de bonnes conditions de cimentation (débit et pression maîtrisés).

Comme tout chantier en milieu urbain, les mesures de sécurité suivantes ont été appliquées :

- mise en œuvre d'un périmètre de sécurité autour du chantier,
- attention particulière aux nuisances occasionnées par la foreuse (bruit, pollution).

La **1ère étape** de foration a rencontré quelques difficultés liées à la faible tenue des remblais de surface. Elle a été maîtrisée par la descente d'un tubage de soutènement posé sur les calcaires du Carixien atteints à 8 m/TN. Ensuite, la foration au MFT Ø445 mm jusqu'à 12,00 m a permis la descente d'un tube acier en Ø323 mm avec cimentation de l'espace interannulaire permettant de garantir un isolement parfait des eaux de ruissellement et des eaux de la nappe du Tarn.

La **2ème étape** de foration a consisté à forer en Ø222 mm jusqu'à - 51 m afin de reconnaître les potentialités aquifère des calcaires liasiques. Le débit d'artésianisme obtenu par des importantes venues d'eau à 38 m atteignait les 30 m^3/h avec une pression de 1,3 bar.

La **3ème étape** de foration a été la plus importante et la plus cruciale en terme décisionnel. Le principe retenu a été de réaléser en Ø311 mm jusqu'à 36,50 m et de remblayer jusqu'à -33 m par du gravier (8-15mm). La grosse difficulté a été de stabiliser le remblaiement au-delà des turbulences créées par les grosses arrivées d'eau. Ceci n'a été possible que par l'apport de cailloutis calcaires de densité plus importante (40-80 mm). Cette technique a ainsi permis de préparer la pose d'un tubage de protection acier en Ø244 mm avec cimentation de l'extrados.

L'auscultation de l'ouvrage par caméra et une diagraphie de flux ont permis de fixer la cote exacte de la cimentation (stabilisation du massif de graviers) et de vérifier qu'il n'y ait aucune perte d'eau dans les niveaux supérieurs.

L'injection de laitier de d=1,8 a été réalisée sous pression. Les quantités de laitier et d'eau nécessaires ont été calculées au préalable. La cimentation sous pression consiste alors à injecter la quantité de laitier définie à l'intérieur du tubage Ø 244 mm puis d'injecter à la suite immédiate, l'eau nécessaire pour pousser le laitier à l'extrados du tubage. Le contrôle des sorties d'eau au niveau de la décharge permet de vérifier quand le laitier est remonté en tête de tubage. Les vannes sont alors fermées durant le temps de prise du ciment (voir photos 1 et 2).

Photo 1 : *Forage équipé pour la cimentation*

Photo 2 : *Injection de laitier sous pression dans le tube Ø 244 mm*

Photo 3 : *Contrôle de la venue de laitier au niveau de la vanne de décharge*

La **4ème et dernière étape de foration** au MFT Ø222 mm a recoupé de grosses fractures localisées entre - 67 et - 69 m engendrant un débit d'artésianisme jaillissant à près de 465 m^3/h. La foration a été arrêtée à la cote de -70 m. Le forage a été laissé en trou nu de -33 à -70 m considérant la bonne tenue des parois (vérification par diagraphie).

Cet artésianisme a occasionné de nombreuses difficultés :

- contrôle de la foration : l'eau s'élevait jusqu'à la table de contrôle, perturbait la tâche du sondeur et inondait la plateforme de travail (voir photo 5),
- gestion des eaux de ruissellement (photo 4). Une canalisation des eaux avec rejet au pluvial a été nécessaire afin d'éviter l'inondation du parking et des parcelles voisines.

L'autre problématique provient de l'évaluation précise du débit. Un débitmètre a été installé sur une bride provisoire munie d'une vanne. Un canal Venturi a du être mis en place en aval de l'artésianisme afin de valider les débits mesurés au débitmètre. Par la suite, une bride soudée INOX a été installée sur la tête de l'ouvrage munie d'un piquage 2", d'un manomètre de haute précision, d'une vanne de régulation et d'un débitmètre.

Photo 4 : *Contrôle des eaux de ruissellement*

Photo 5 : *Vue du forage en fin de la foration*

Simulations d'exploitation

Des essais débit-pression (par palier et longue durée) ont été effectués afin d'estimer les potentialités hydrogéologiques de la nappe.

A partir des données de transmissivité et de rabattement obtenues sur les paliers, des estimations de rabattement ont été réalisés en considérant un pompage continu (voir graphique suivant). Ainsi, pour des débits de 50 et 111 m^3/h (les besoins de la commune sont évalués à 2400 m^3/jour maximum), les rabattements respectifs atteindraient 3,60 m et 5,67 m au bout d'1 an de pompage. En considérant que le niveau d'eau est de 14 m au dessus de la surface du sol, ces rabattements préserveraient l'artésianisme du forage et sont donc tout à fait envisageables.

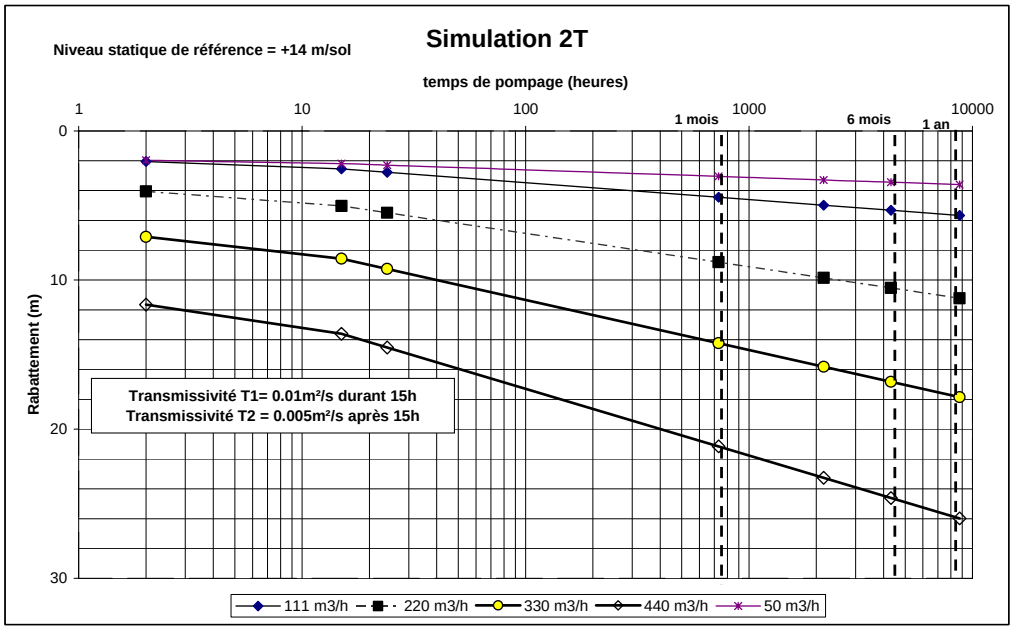


Figure 5 : *Simulation d'exploitation*

Conclusion

La réalisation du forage de la piscine de Millau pose la problématique du caractère prévisionnel de l'artésianisme notamment dans les milieux fracturés comme le karst.

Il est important dans un premier lieu d'établir un cahier des charges strict et structuré. Un suivi en continu par une personne experte est indispensable afin de prendre les meilleures décisions notamment en terme de cimentation, opération la plus délicate dans ce type d'ouvrage.

Dans le cadre du forage de la piscine de Millau, la cimentation a été contrainte par les arrivées d'eau importantes et très localisées qu'il a fallu stabiliser afin de poursuivre la foration et isoler convenablement les arrivées d'eau superficielle. L'état de cette cimentation a conditionné fortement la pérennité de l'ouvrage au vu des débits importants rencontrés au cours de la foration entre 67 et 69 m.

Ce forage de reconnaissance a répondu aux attentes de la commune en terme quantitatif (débit d'exploitation envisagé autour de 50 m^3/h). En terme qualitatif, le forage satisfait également aux attentes de la commune avec une température mesurée entre 17 et 18°C. L'agressivité certaine de l'eau devra, quant à elle, être contrôlée pour permettre l'exploitation de l'ouvrage.

Cette note pose aussi la problématique de la protection de ces ouvrages artésiens. Avec le développement de la géothermie et des puits privés, on se rend compte que de nombreux puits ou forages artésiens sont abandonnés en état d'écoulement permanent, et donc susceptibles d'engendrer un impact quantitatif non négligeable sur la ressource en eau.

Références bibliographiques

Pinchon L. SUBIAS C (sept. 2007) Compte rendu de travaux – Réalisation d'un forage de reconnaissance près du Centre Nautique Municipal de la ville de Millau. Mairie de Millau, France.

Lauga R. (1990) Pratique du forage d'eau et utilisation des crépines en génie civil et forages profonds. Edition Seesam, Paris.

Mabillot A. (1971) Guide du forage d'eau. Edition Lavoisier, Paris.

Castany G. (1980) Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Editions Dunod, Paris.

de Marsilly G. (1981) Hydrogéologie quantitative. Editions Masson, Paris.

La vie des ouvrages

Mise en exploitation des forages
Calcul des courbes de production pour des pompages intermittents
par Claude GRIOLET (DIREN Corse) 39

Choix des équipements hydrauliques
par Eric LARROQUE (FLOWSERVE) 47

Origine du fer et du manganèse dans les forages d'eau – préconisations
par Marie-Jacqueline MARSAC (HEH) 51

Rôle du dénoyage dans le colmatage d'un puits
Apports et limites de la simulation numérique
par François LARROQUE (Institut EGID Bordeaux 3) 63

Exploitation durable des ouvrages de captage d'eau souterraine
par Marc ALARY (VEOLIA EAU) 69

Gestion des ouvrages de production d'eau potable
par Bernard DROZ (SADE) 75

La gestion patrimoniale des forages d'eau potable
par Renaud FRANCOMME (LYONNAISE des EAUX) 77

Mise en exploitation de forages d'eau – Calcul des courbes de production pour des pompages intermittents

Claude GRIOLET

DIREN Corse, Route d'Agliani, 20600 BASTIA, France, claude.griolet@developpement-durable.gouv.fr

Résumé

La méthode des pompages intermittents (Driscoll,1986) permet de vérifier si le rabattement provoqué par le régime de pompage envisagé, appliqué sur une certaine durée, est acceptable ou non. Partant du principe que l'on veut atteindre en bout de période le rabattement maximal admissible, nous avons développé ces équations afin d'obtenir globalement une réponse à tous les cas de figure, présentée sous la forme d'un graphique des courbes de production à trois entrées. Nous l'avons également étendue aux cas où se manifestent des pertes de charge quadratiques d'une part, et où l'on observe une variation de la transmissivité d'autre part.

I – Introduction

Lors de la mise en production d'un forage, la question qui se pose est de définir quel est le régime d'exploitation optimal, c'est à dire quel est le débit de la pompe à installer, et quelle est la durée journalière de pompage, sachant que l'exploitation de l'ouvrage est limitée par le rabattement possible de la nappe. La méthode exposée par Driscoll (1986), et Lauga (1990), permet de calculer le rabattement final provoqué pour vérifier si l'on pourra pomper au régime envisagé sur toute la durée d'utilisation prévue sans dépasser un certain niveau admissible. Cette méthode a été développée en considérant une stricte proportionnalité entre les débits et les rabattements qu'ils provoquent, mais on peut rencontrer d'autres cas. Aussi, tout en conservant le principe de calcul initial, on a développé les équations pour obtenir l'ensemble des solutions globalement, et l'on a étendu la méthode aux cas où se manifestent des pertes de charge quadratiques et des variations de la transmissivité. Le résultat final se présente sous la forme d'un graphique à trois entrées.

II – Méthode des pompages intermittents

Selon Driscoll (1986) le rabattement théorique obtenu au bout d'une certaine période d'utilisation du forage, plusieurs mois par exemple, en ne pompant que quelques heures chaque jour, est la somme de deux composantes :

- le rabattement **s1** observé en fin de période de plusieurs mois, produit par le débit fictif continu équivalent **qf** ;

- le rabattement **s2** produit par le débit complémentaire **qc** à la fin du dernier pompage journalier.

Si **Q** est le débit horaire de la pompe, et si **h** est le nombre d'heures de pompage journalier :

- le débit fictif continu équivalent est : $qf = Q.\,h / 24$ (1)

- le débit complémentaire est : $qc = Q - qf$ (2)

Cette méthode a été utilisée pour vérifier si le régime d'exploitation envisagé sur la durée prévue est possible ou non, en ne considérant qu'une simple proportionnalité entre les débits et les rabattements.
Dans ce cas on peut facilement calculer les rabattements s1 et s2 à partir des résultats d'un pompage d'essai conduit au débit expérimental **Qe**.

Si on appelle **se** le rabattement théorique observé au bout de plusieurs mois, estimé par calcul, ou par extrapolation de la droite de Jacob obtenue lors de l'essai, et **se'** les rabattements observés sur 24 heures, alors :

$$s1 = se\,.\,qf / Qe \quad (3)$$

$$s2 = se'.qc / Qe \quad (4)$$

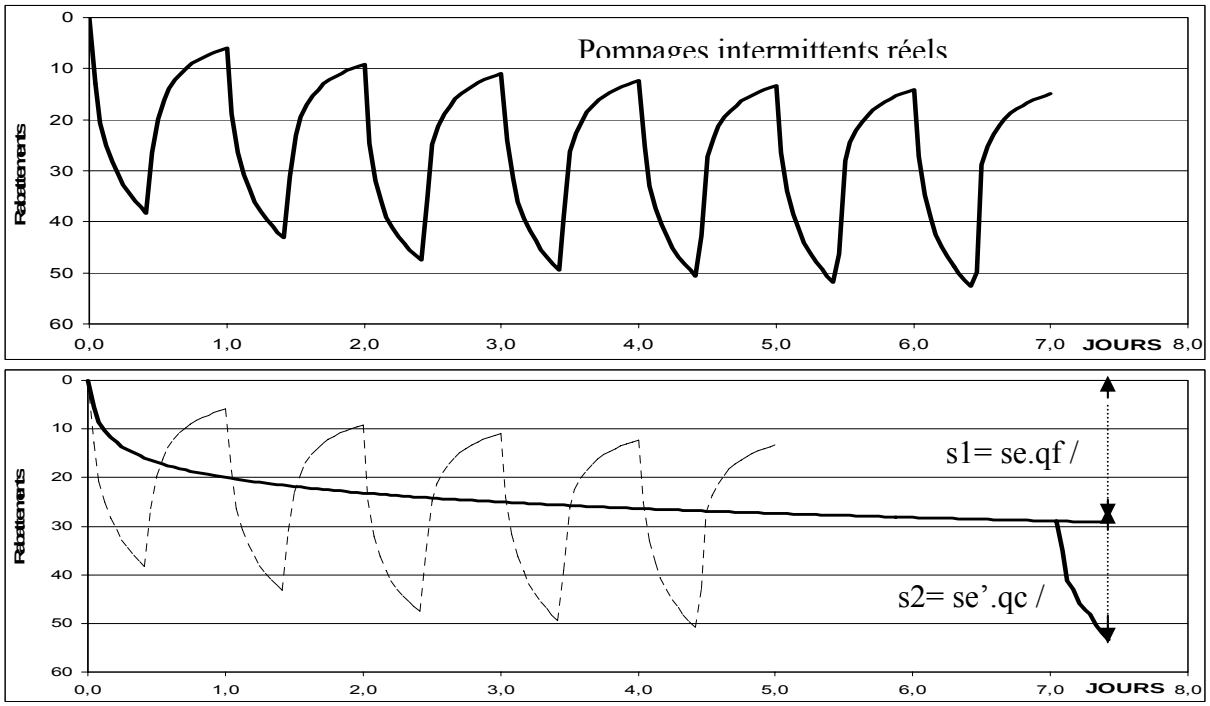


Figure 1: *Pompages intermittents et prédiction du rabattement en fin de période*

Dans le cas où le rabattement théorique calculé est supérieur au rabattement maximal admissible, il est nécessaire de recommencer le calcul avec un autre régime d'exploitation, jusqu'à ce que le résultat soit satisfaisant, ce qui peut être fastidieux.
Partant de ce constat, il paraissait donc intéressant de pouvoir disposer de toutes les solutions possibles d'un seul coup. C'est pourquoi nous avons développé la méthode, le résultat final se présentant sous forme de courbes de production (Griolet, 1993).

III – Calcul des courbes de production

III.1 – Cas des débits et des rabattements proportionnels

Si on se fixe comme objectif d'atteindre, mais non dépasser, le rabattement maximal admissible smax en fin de période, alors :

$$s1 + s2 = smax \qquad (5)$$

Il vient alors, après développement et arrangement des équations (3) et (4) , l'expression du débit de pompage **Q** qui respecte les contraintes fixées, de rabattement maximal admissible, de durée journalière de pompage, et de période d'utilisation :

$$Q = \frac{24.\ Qe\ .\ smax}{(\ h.se) + [\ se'.(\ 24\text{-}h)]} \qquad (6)$$

III.2 – Cas des pertes de charge quadratiques

Il arrive fréquemment que la relation débit-rabattement ne soit pas linéaire, mais de la forme (Castany, 1989) :

$$s = B.Q + C.Q^2 \qquad (7)$$

Les pertes de charge quadratiques se manifestent rapidement dès la mise en route de la pompe, et sont résorbées dès l'arrêt du pompage, au cours de la phase de repos. Ainsi, elles ne sont à considérer que lors de la dernière phase de pompage où elles sont réellement égales à $D + B.Q + C.Q^2$.

Si par ailleurs on admet que les pertes de charges quadratiques se manifestent rapidement, dès la mise en route de la pompe, et que la suite du pompage d'essai se déroule selon la théorie, si l'on observe la droite de Jacob et Cooper, alors on peut envisager de calculer les rabattements s1 et s2 en deux étapes.
La courbe caractéristique du forage (courbe débits-rabattements) étant établie pour un temps de pompage d'une heure, durée au-delà de laquelle on a une droite, le rabattement observé à ce moment peut être considéré comme le point de départ à partir duquel les rabattements, obéissant alors à la formule d'approximation logarithmique de Jacob et Cooper, sont proportionnels aux débits.
Selon cette formule, la pente de la droite obtenue en coordonnées semi-logarithmiques est (Kruseman, 1974) :

$$\Delta s / \log (t2 / t1) = 0{,}183.Q / T \qquad (8)$$

avec :

Δs : la variation de rabattement entre les temps t1 et t2 en mètres
Q : le débit de pompage en m^3h^{-1}
T : la transmissivité en m^2h^{-1}

A partir de 1 heure de pompage (t1), on peut donc estimer la variation de rabattement pour différents temps de pompage, et pour différents débits :

$$s12 = [0{,}183.qf.(1+ \log d)] / T \qquad (9)$$

$$s02 = D + B.Q + C.Q^2 \qquad (10)$$

$$s22 = (0{,}183.qc. \log h) / T \qquad (11)$$

où :

d : est la durée totale d'utilisation du forage (plusieurs semaines, ou mois) en heures
h : est la durée de pompage journalier en heures

Le rabattement maximal admissible smax étant le rabattement à atteindre en fin de période, sans le dépasser, il vient donc au final :

$$s1 = s12 \qquad (12)$$
$$s2 = s02 + s22 \qquad (13)$$
$$s1 + s2 = smax \qquad (14)$$

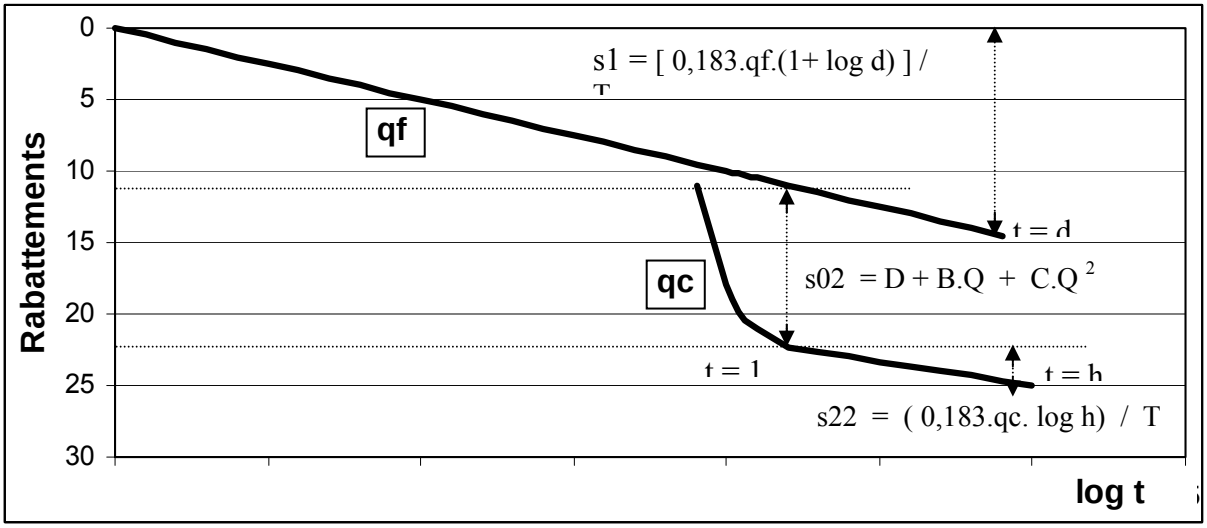


Figure 2 : *Principes des calculs intégrant les pertes de charge quadratiques*

soit :

$$s1 = [0{,}183.qf.(1+ \log d)] / T \qquad (15)$$

$$s2 = D + B.Q + C.Q^2 + [(0{,}183.qc.\log h) / T] \qquad (16)$$

Comme $qf = Q.h / 24$, que $qc = Q - Q.h / 24$, et que $Q = qf + qc$

il vient alors après substitutions et arrangement, le polynôme du second degré suivant, dont les racines sont les valeurs du débit de pompage Q pour une durée de pompage journalier h, sur une période d :

$$C.Q^2 + \left(B + \frac{0{,}183.h\,[\,1 + \log(d/h)]}{24.T} + \frac{0{,}183.\log h}{T}\right).Q + D - smax = 0 \qquad (17)$$

III.3 – Cas d'une courbe caractéristique composite

Dans certains cas, la relation entre le débit et le rabattement provoqué par pompage n'est pas une relation simple. Le cas le plus classique est une relation linéaire pour les débits les plus faibles, suivie d'une relation de type quadratique au-delà d'un certain débit, appelé débit critique.
Cette notion de débit critique est essentiellement physique, et exprime le passage d'un régime d'écoulement laminaire à un régime d'écoulement turbulent. La conséquence de ce changement est une plus grande consommation d'énergie hydraulique, qui se traduit par un rabattement plus important. Aussi, l'exploitation du forage peut devenir plus onéreuse en terme de consommation d'électricité au-delà de ce débit critique. Mais la seule vraie contrainte pour la sécurité et la longévité de l'ouvrage est de ne pas dépasser une vitesse d'entrée de l'eau dans les crépines de 3 cm/s (Griolet et Pasquier, 1994). On peut donc parfaitement et légitimement faire un calcul de production au-delà du débit critique, si cette condition est respectée.
La méthode consiste alors à calculer séparément les courbes de production pour chacune des deux gammes de débits, avant et après le débit critique, avec les relations correspondant à chaque cas.
On notera cependant que pour une relation quadratique apparaissant après le débit critique, l'expression mathématique des pertes de charge est alors de la forme :

$$s = B.Q + C.Q^2 + D \qquad (18)$$

(D étant tout simplement égal à zéro lorsque les pertes de charge quadratiques apparaissent dès le début).
Ainsi, d'une manière générale, on calcule les régimes d'exploitation théoriques permettant d'atteindre le rabattement maximal admissible, sans le dépasser, en fin de période d'utilisation intermittente de l'ouvrage, à l'aide de paramètres déterminés pour une gamme de débits bien précise, définie grâce à la courbe caractéristique du forage.
Deux cas peuvent alors se présenter. Ou les débits théoriques calculés sont compris dans cette gamme de débits réels, ou bien ils s'en écartent.
Pour les débits réels inférieurs au débit critique, si les débits théoriques calculés sont supérieurs au débit critique, ceci signifie que tout régime de pompage est possible, sur la période considérée, avec un débit horaire inférieur au débit critique.
Pour les débits réels supérieurs au débit critique, si les débits théoriques calculés sont inférieurs au débit critique, il n'y a pas de régime d'exploitation possible, soit pour la période d'utilisation envisagée, soit pour un pompage journalier de plus d'une heure.

III.4 – Cas d'une variation de transmissivité

Il arrive assez souvent, lors des essais de nappe de longue durée, qu'on observe un changement de pente de la droite de Jacob et Cooper, pouvant être le témoin d'une variation de la valeur de la transmissivité.
Cette variation peut se manifester avant ou après 24 heures de pompage. Si elle apparaît avant 24 heures de pompage, il faudra en tenir compte pour le calcul des rabattements provoqués, et par le débit fictif continu, et par le débit complémentaire. Si elle apparaît après 24 heures de pompage, seul sera concerné le calcul du rabattement dû au débit fictif continu.

III.4.1 – Débits et rabattements proportionnels

Lorsqu'il y a proportionnalité entre les débits et les rabattements qu'ils provoquent, la valeur de la transmissivité n'intervient que dans la valeur du rapport de proportionnalité. Ses variations sont donc intégrées dans les valeurs des rabattements observés lors des pompages d'essai, et l'on peut utiliser la formule (6) établie § III.1.

III.4.2 – Avec pertes de charge quadratiques

Dans ce cas, le rabattement s1 provoqué par le débit fictif continu est la somme du rabattement entre 1e début du pompage et ti , puis entre ti et d, soit:

$$s1 = \left[\frac{0{,}183h\,[1 + \log(ti)]}{24.T1} + \frac{0{,}183.h.\log(d/ti)}{24.T2} \right].Q \qquad (19)$$

avec ti : le temps au moment où se produit le changement de pente ,
d : le temps en fin de période d'exploitation,
T1 : la première transmissivité,
T2 : la seconde transmissivité.

Pour ce qui est du rabattement provoqué par le débit complémentaire, il vient :

a) - de h = 0 à h = ti

$$s23 = B.Q + C.Q^2 + D + (0{,}183.qc.\log h) / T1 \qquad (20)$$

$$= B.Q + C.Q^2 + D + \left[\frac{0{,}183.\log(h)}{T1} - \frac{0{,}183.h.\log(h)}{24.T1} \right].Q \qquad (21)$$

b) - et pour h > ti

$$s24 = B.Q + C.Q^2 + D + (0{,}183.qc.\log ti) / T1 + [0{,}183.qc.\log(h/ti)] / T2 \qquad (22)$$

$$= B.Q + C.Q^2 + D + \left[\frac{0{,}183.\log(ti)}{T1} - \frac{0{,}183.h.\log(ti)}{24.T1} + \frac{0{,}183.h.\log(h/ti)}{T2} - \frac{0{,}183.h.\log(h/ti)}{24.T2} \right].Q$$

Au final, les équations générales tenant compte à la fois des pertes de charge et d'une variation de la transmissivité s'écrivent donc :

c) – avant ti : smax = s1 + s23 (équations 19 et 21)

soit, après substitutions et arrangement :

$$C.\,Q^2 + \left[B + \frac{0{,}183.h.[1 + \log(ti/h)]}{24.T1} + \frac{0{,}183.h.\log(d/ti)}{24.T2} + \frac{0{,}183.\log(h)}{T1} \right].Q + D - smax = 0 \qquad (23)$$

d) –après ti : smax = s1 + s24 (équations 19 et 22)

soit, après substitutions et arrangement (25):

$$CQ^2 + \left[B + \frac{0{,}183.h}{24.T1} + \frac{0{,}183.\log(ti)}{T1} + \frac{0{,}183.\log(h/ti)}{T2} + \frac{0{,}183.h.\log(d/h)}{24.T2} \right].Q + D - smax = 0 \qquad (24)$$

IV – Présentation des courbes de production

Les équations présentées consistent à déterminer quel est le régime de pompage journalier que l'on peut appliquer sur une certaine période, qui permettra d'arriver en fin de période sans dépasser un certain rabattement maximal admissible, et ceci à partir des données d'un pompage d'essai. Le but est donc de calculer le débit de pompage possible pour différentes durées de pompage, sur 24 heures, et pour une ou plusieurs périodes d'exploitation (1, 2 ou 3 mois par exemple). L'organisation des calculs, qui nécessitent des données d'entrée différentes selon le cas, doit exploiter au mieux les ressources informatiques (Excel par exemple) et faciliter l'édition des courbes de production.
Les courbes produites sont la courbe du débit de pompage en fonction de la durée de pompage journalier d'une part, et la courbe du volume journalier produit en fonction du débit de pompage.

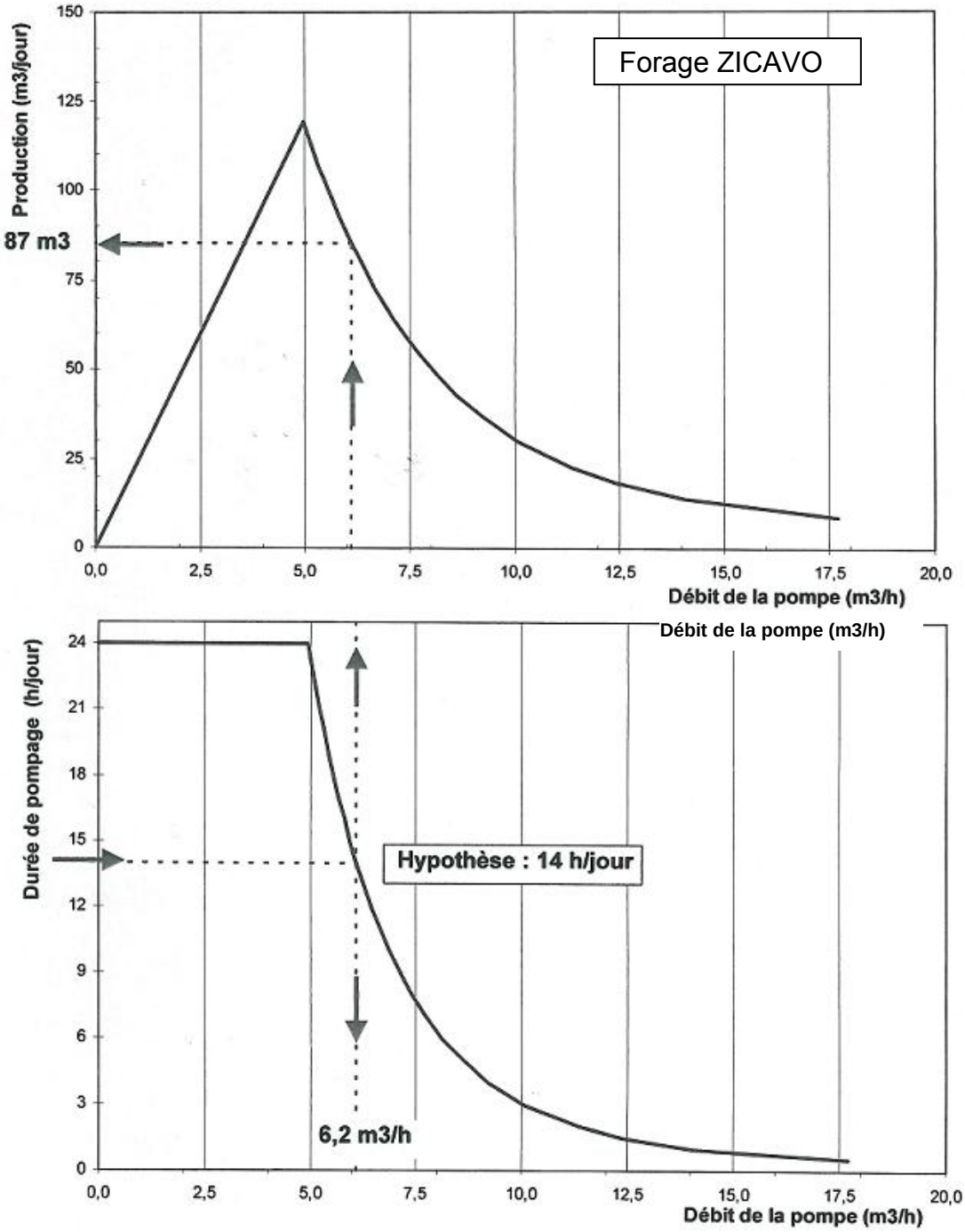


Figure 3 : *Exemple de courbes de production pour 100 jours d'étiage*

V – Conclusion générale

La méthode permettant de prédire le rabattement provoqué par des pompages intermittents a été initialement fondée sur la simple proportionnalité entre les débits et les rabattements qu'ils induisent, ce qui découle des lois de l'hydraulique souterraine, et qu'exprime notamment la formule d'approximation logarithmique de Jacob et Cooper en pompage.

Nous avons développé cette méthode de façon à obtenir d'un seul coup tous les régimes de pompage possibles, permettant d'atteindre, sur une période donnée, le rabattement maximal admissible, sans le dépasser.

Cependant, les niveaux mesurés dans un ouvrage en exploitation sont le résultat du rabattement de la nappe, mais aussi des pertes de charge singulières. En effet, dans ce cas le passage de l'eau à travers l'équipement mis en place (crépines, massif de gravier additionnel), ainsi que des vitesses de circulation très supérieures aux vitesses naturelles, sont la cause de pertes de charge qui apparaissent dès la mise en route de la pompe. La relation débits-rabattements est alors le plus généralement de type quadratique.

L'expression mathématique des rabattements dans ce cas est possible en envisageant deux phases de pompage successives, la première, d'une heure, pour exprimer le rabattement dû aux pertes de charge quadratiques à l'aide de la courbe caractéristique de l'ouvrage, la seconde pour exprimer la proportionnalité entre débit et rabattement selon les lois de l'hydraulique souterraine.

L'introduction dans ces calculs de la pente de la droite de Jacob et Cooper, et donc par ce biais de la valeur de la transmissivité, nous a tout naturellement amené à tenir aussi compte d'une variation de ce paramètre. Toutefois, il est absolument nécessaire de vérifier la cohérence des résultats théoriques obtenus avec les débits réellement essayés.

L'intérêt de la démarche suivie repose donc sur le fait de disposer, sur un document unique synthétique à trois entrées, de l'ensemble des réponses aux questions que l'on peut se poser lors de la mise en exploitation d'un forage d'eau, concernant la production journalière, le débit de la pompe à installer, et/ou la durée journalière de pompage. Toutefois cette démarche repose aussi sur deux hypothèses, que le volume des réserves est suffisant d'une part, et que les paramètres de l'aquifère resteront les mêmes à plus long terme d'autre part, ce qui ne peut être vérifié qu'en vraie grandeur. Aussi cette démarche, qui repose sur les critères objectifs connus au moment des essais, ne met pas à l'abri d'éventuelles déconvenues à plus long terme, d'où la recommandation de suivre l'évolution des niveaux en cours d'exploitation.

Références bibliographiques

Castany G (1989) Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Université, Paris, 236 pages.

Driscoll FG (1986) Groundwater and wells, 2ème édition, Reynolds Guyar Design Publisher, Austin, Minnesota, USA, 1089 pages.

Genetier B (1984) La pratique des pompages d'essai en hydrogéologie. BRGM, manuels et méthodes n° 3, Orléans, France, 132 pages, 7 fig. hors texte.

Griolet C (1993) Département de la Haute-Corse. Programme de recherche d'eau 1991. Commune de Pino : forages Luri 105.Q et 106.Q. Rapport de surveillance hydrogéologique. DIREN Corse, SEMA, Bastia, France, 15 pages, 28 figures, 2 annexes.

Griolet C et Pasquier C (1994) Finalité des pompages d'essai et difficultés inhérentes aux milieux fissurés en Corse. Rapport DIREN Corse, SEMA, Bastia, France, 8 pages, 5 figures, 2 annexes.

Kruseman GP et De Ridder NA (1974) Interprétation et discussion des pompages d'essai (traduit par MEILHAC, A.), International institute for land reclamation and improvement , Wageningen, The Nederlands, 313 pages.

Lauga R (1990) Pratique du forage d'eau et utilisation des crépines en génie civil et en forages profonds, Seesam Ed., Paris, 16 chapitres.

Choix des équipements hydrauliques

Ce texte est une retranscription partielle, illustrée par des extraits du diaporama, de la communication orale faite en séance.
Le comité de rédaction des actes

D'après la communication orale d'Eric LARROQUE

Flowserve Sales International, 5, rue Charles Duchesne, Aix en Provence 13851, France, Elarroque@flowserve.com

Généralités sur les pompes

Les pompes immergées sont utilisées en forage pour :

- l'alimentation en eau potable ;
- l'exhaure d'eau de mer en offshore ;
- les exhaures de mine ;
- l'industrie en général ;
- l'irrigation ;
- le thermalisme ;
- la géothermie.

Les caractéristiques des pompes (débit et pression de refoulement) dépendent de leur diamètre. La figure 1 présente l'étendue de la gamme pour des pompes dont les diamètres varient entre 4 et 36 pouces, pour des débits compris entre 1,5 et 5 000 m^3/h.

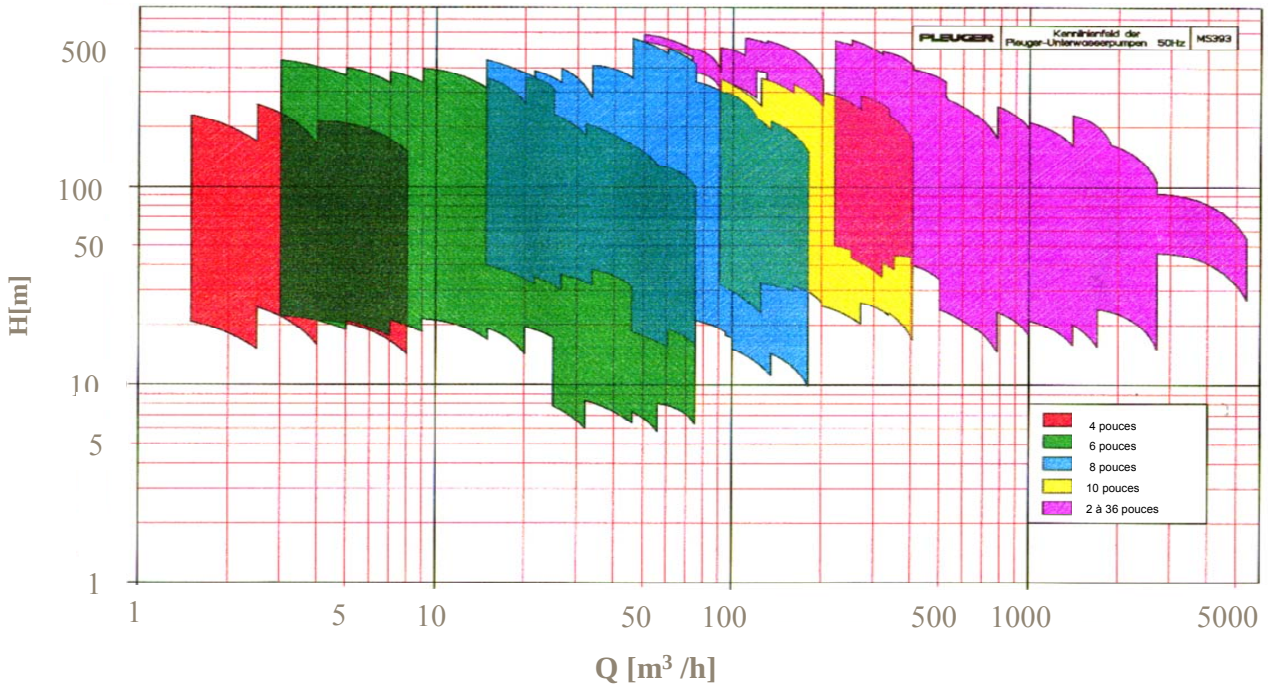


Figure 1 : *Caractéristiques des pompes immergées et plages de fonctionnement*

Installation type

Une installation type de pompe immergée nous montre (figure 2), du bas vers le haut :

- le moteur ;
- la crépine ;
- la partie hydraulique de la pompe ;
- la colonne d'exhaure ;
- la tête du forage ;
- la sorite du câble électrique ;
- un clapet et une vanne.

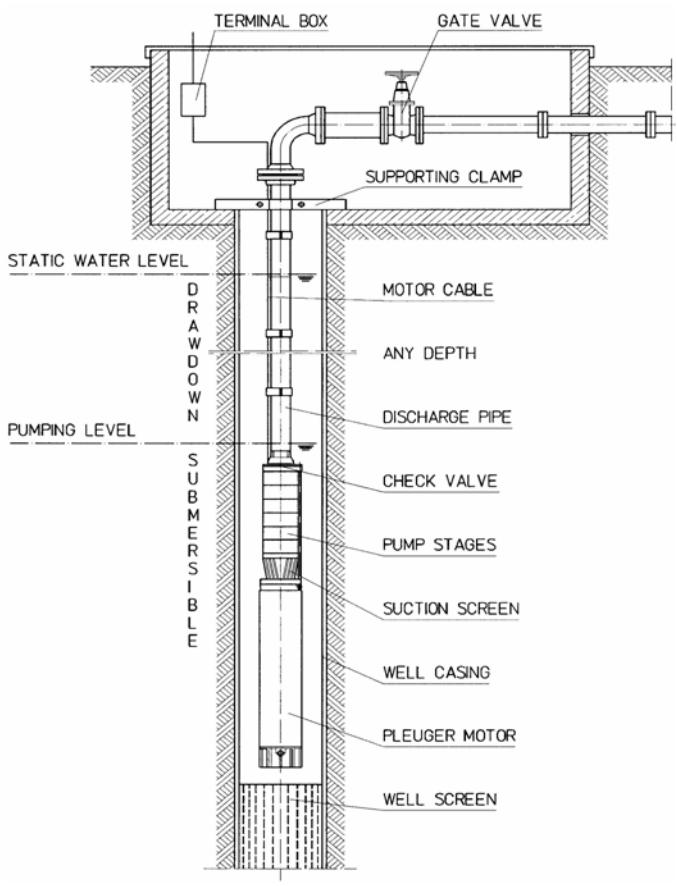


Figure 2 : *Installation type*

Le nombre d'étages de la partie hydraulique de la pompe varie en fonction de la pression souhaitée.

Le câble électrique, qui sort du moteur et rejoint la surface, doit être parfaitement solidaire de la colonne montante car il est impératif que rien ne dépasse ou n'accroche pour éviter les accidents lors des manœuvres.

Critères de sélection d'une pompe

Pour sélectionner une pompe, il est nécessaire de préciser le besoin qui dépend :

- du forage et en particulier de son diamètre ;
- des conditions hydrauliques d'exploitation, à savoir :
  - le débit d'exploitation ;
  - les niveaux statique et dynamique ;
- de la qualité de l'eau et en particulier :
  - sa température ;
  - son caractère corrosif ou incrustant ;
  - de la présence de fer ou autres éléments ;
  - de la quantité de matière en suspension
- de la position des crépines dans le forage.

Débit en m3/h	Diamètre de la pompe en pouces	Diamètre du forage en pouces
< 20	4	5 à 6
20 à 40	5	6 à 8
30 à 90	6	8 à 10
80 à 150	8	10 à 12
140 à 200	10	12 à 14
190 à 300	12	14 à 16
280 à 400	14	16 à 20
360 à 700	16	20 à 24

Tableau 1 : *Tableau de correspondance débit, diamètre de la pompe, diamètre du forage*

Les groupes immergés sont généralement limités à des concentrations en matières en suspension de 25 mg/l. Au-delà, l'abrasion des pièces en mouvement abîme la pompe.

Critères de sélection du moteur

Les critères de sélection du moteur sont :

- le mode de démarrage (instantané, progressif, vitesse variable, …) ;
- les conditions de fonctionnement (régime constant, régulation, …).
- les conditions de refroidissement ;
- de la tension disponible.

Les conditions de refroidissement dépendent :

- de la température de l'eau ;
- de la méthode de refroidissement ;
- de la vitesse de circulation de l'eau
- du caractère éventuellement incrustant de l'eau qui peut limiter, par des dépôts, les possibilités de refroidissement.

Le groupe de pompage doit toujours être situé au dessus des crépines ou des zones productives du forage, ceci pour permettre le refroidissement du moteur. En effet, le moteur étant situé à la base de la pompe, il faut que l'eau circule autour pour le refroidir. Un refroidissement correct est assuré à partir d'une vitesse de circulation de l'eau de 0,5 m/s. Cette vitesse dépend non seulement du débit, mais aussi de la différence de diamètre entre le forage et le corps de la pompe.

L'alimentation des pompes se fait en général en 380 V. Des voltages supérieurs (690, voire 1 000 V) peuvent présenter un intérêt pour réduire les coûts ainsi que le poids et le volume des câbles d'alimentation.

La gamme des pompes Pleuger et des exemples de réalisation sont présentés dans le diaporama figurant sur le DVD annexé aux actes du colloque.

Origine du fer et du manganèse dans les forages d'eau – préconisations

Marie-Jacqueline MARSAC, MJ[1]

[1] BE MARSAC-BERNEDE H.E.H ; Institut EGID Université Bordeaux 3

Résumé :

L'extension des réseaux d'eau potable sur l'ensemble du territoire français date des années 1950 à 1970. Parallèlement à cette extension, les besoins en eau potable et industrielle se sont accentués ainsi que les exigences en matière de qualité. De plus, les années 1980 ont connu un développement important de l'irrigation. Pour répondre à cette augmentation des besoins, de nombreux forages ont été réalisés au cours de la 2ème moitié du XXème siècle, dont une grande partie avant la promulgation de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 et de ses décrets d'application. Si depuis une vingtaine d'années, le fruit de l'expérience et les contraintes réglementaires ont conduit à la réalisation de forages toujours plus performants et répondant à des contraintes réglementaires fortes, il n'en a pas toujours été ainsi. Il existe un grand nombre de forages mal conçus qui connaissent des problèmes de vieillissement important (corrosion des tubages, colmatage), conduisant à la présence de fer et de manganèse à des teneurs rendant nécessaire un traitement avant desserte. Des pollutions par des bactéries du fer peuvent conduire également à la présence de fer et de manganèse en excès. Cependant, la présence de fer et de manganèse peut également avoir une origine naturelle due à un équilibre physico chimique qui s'établit entre le fluide et le terrain aquifère. La coupe technique d'un forage, son équipement hydroélectrique et sa gestion doivent être adaptés aux caractéristiques des eaux pompées afin de ne pas augmenter les teneurs en fer et manganèse naturelles dues à l'aquifère pour lesquelles seul un traitement est possible.

Après avoir présenté plusieurs coupes techniques de forage spécifiques aux différents types d'aquifère : poreux, fissuré sans recouvrement, fissuré avec recouvrement…, une méthodologie sera proposée afin de déterminer si le fer et le manganèse présents dans les eaux extraites des forages correspondent au « bruit de fond » dû aux interactions fluide/roche ou si les concentrations observées sont augmentées par les interactions entre l'eau et les divers équipements du forage (tubage, pompe, colonne d'exhaure) ou par des pollutions bactériennes. Cette méthodologie est basée sur des campagnes de mesures de paramètres physico-chimiques non conservatifs effectuées in-situ (température, pH, Eh, oxygène dissous, teneurs en fer et en manganèse et conductivité). Des dosages en laboratoire des bactéries du fer peuvent également être réalisées. Les observations sont faites au cours de pompage d'essai par paliers de débits croissants, sur des forages dont les équipements sont susceptibles de libérer des métaux. Ces mêmes observations sont également réalisées sur des ouvrages dont les équipements sont inertes (équipement PVC ou INOX) ou sur des sources afin de définir le « bruit de fond » de l'aquifère.

Au vu d'expérimentations réalisées sur des forages du département de la Dordogne, l'origine possible de la présence de fer et de manganèse dans les eaux d'exhaure des forages sera définie en fonction des aquifères captés et de la complétion des ouvrages. Les résultats présentés permettront de définir des coupes techniques et des équipements électromécaniques types en fonction du contexte hydrogéologique. Un guide des bonnes pratiques de gestion des ouvrages sera également proposé.

Introduction

L'extension des réseaux d'eau potable sur l'ensemble du territoire français date des années 1950 à 1970. Parallèlement à cette extension, les besoins en eau potable et industrielle se sont accentués ainsi que les exigences en matière de qualité. De plus, les années 1980 ont connu un développement important de l'irrigation. Pour répondre à cette augmentation des besoins, de nombreux forages ont été réalisés au cours de la 2ème moitié du XXème siècle, dont une grande partie avant la promulgation de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 et de ses décrets d'application. Si depuis une vingtaine d'années, le fruit de l'expérience et les contraintes réglementaires ont conduit à la réalisation de forages toujours plus performants et répondant à des contraintes réglementaires fortes, il n'en a pas toujours été ainsi. Il existe un grand nombre de forages mal conçus qui connaissent des problèmes de vieillissement important (corrosion des tubages, colmatage), conduisant à la présence de fer et de manganèse à des teneurs rendant nécessaire un traitement avant desserte.

Le fer présent dans les eaux de forage peut également être d'origine naturelle et correspondre au « bruit de fond » de la nappe captée.

Les conditions hydrogéologiques locales, la coupe technique du forage et les conditions d'exploitation peuvent également aboutir à l'apparition de teneurs excessives en fer. En effet, le rabattement dans le forage entraîne une variation du gradient hydraulique entre les aquifères encaissants et l'aquifère exploité et donc augmente les échanges entre un aquifère superficiel présentant des eaux naturellement chargées en fer (sable des Landes par exemple) et l'aquifère exploité (Miocène ou Oligocène de Gironde par exemple) par :

- augmentation des flux à la faveur d'une cimentation déficiente ou de perforation des tubages de la chambre de pompage ;
- augmentation des flux par drainance à travers les épontes semi-perméables.

Ce type de contamination s'applique également à d'autres substances indésirables.

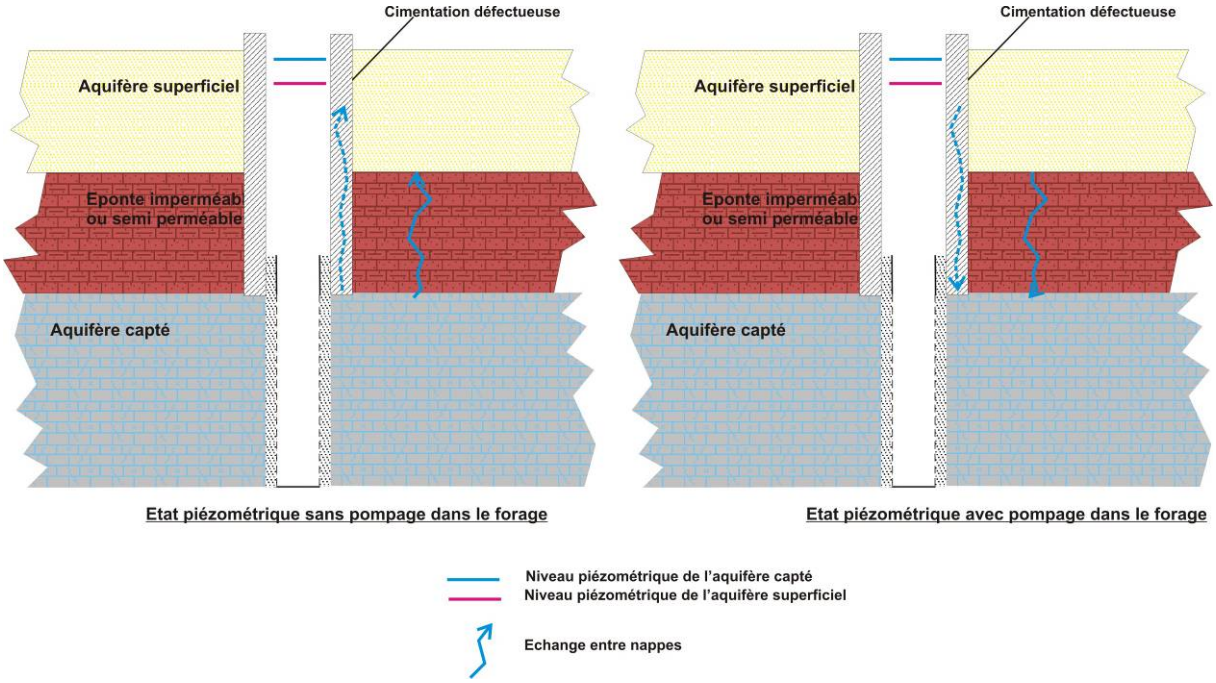


Figure 1 : Contamination à partir d'une nappe superficielle

Lorsqu'un forage présente des teneurs excessives en fer et en manganèse ou une augmentation des teneurs au cours de la vie de l'ouvrage (références de qualité pour une eau potable respectivement de 200 µg/l et 50 µg/l – arrêté du 11 janvier 2007), il est nécessaire de connaître la part d'origine naturelle et la part incombant à l'équipement du forage et à son mode d'exploitation, voire à d'éventuelles contaminations. Pour cela une méthodologie analytique peut être appliquée à des fins de discrimination de l'origine du fer.

1. Typologie des équipements de forage

1.1. Complétion des forages

La coupe technique d'un forage dépend de la nature des terrains traversés (recouvrement et aquifère) ainsi que de son usage. Les coupes techniques types présentées ci-dessous sont classées en fonction de l'encaissant.

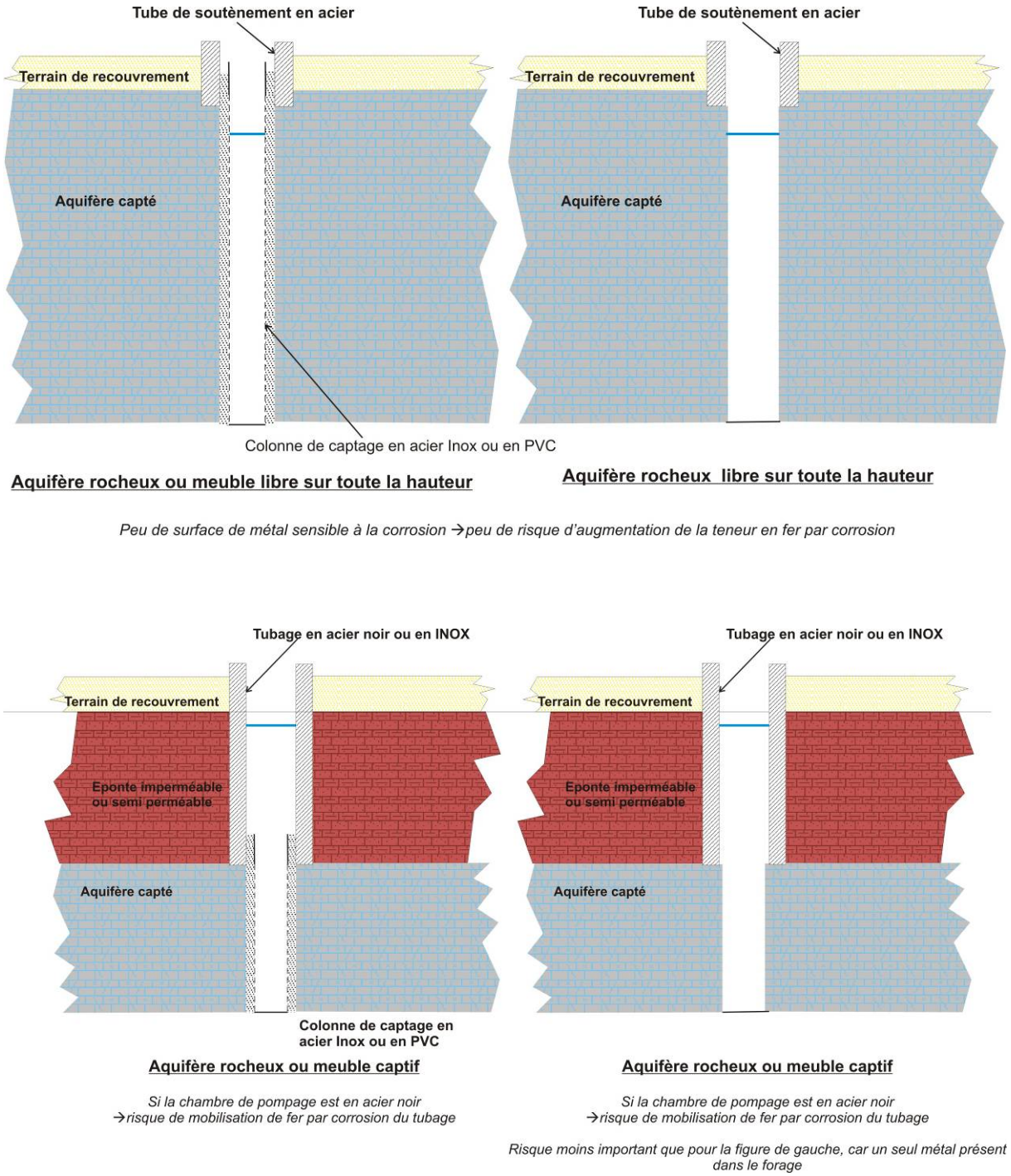


Figure 2 : Coupes techniques types en fonction de l'encaissant (respectant la réglementation).

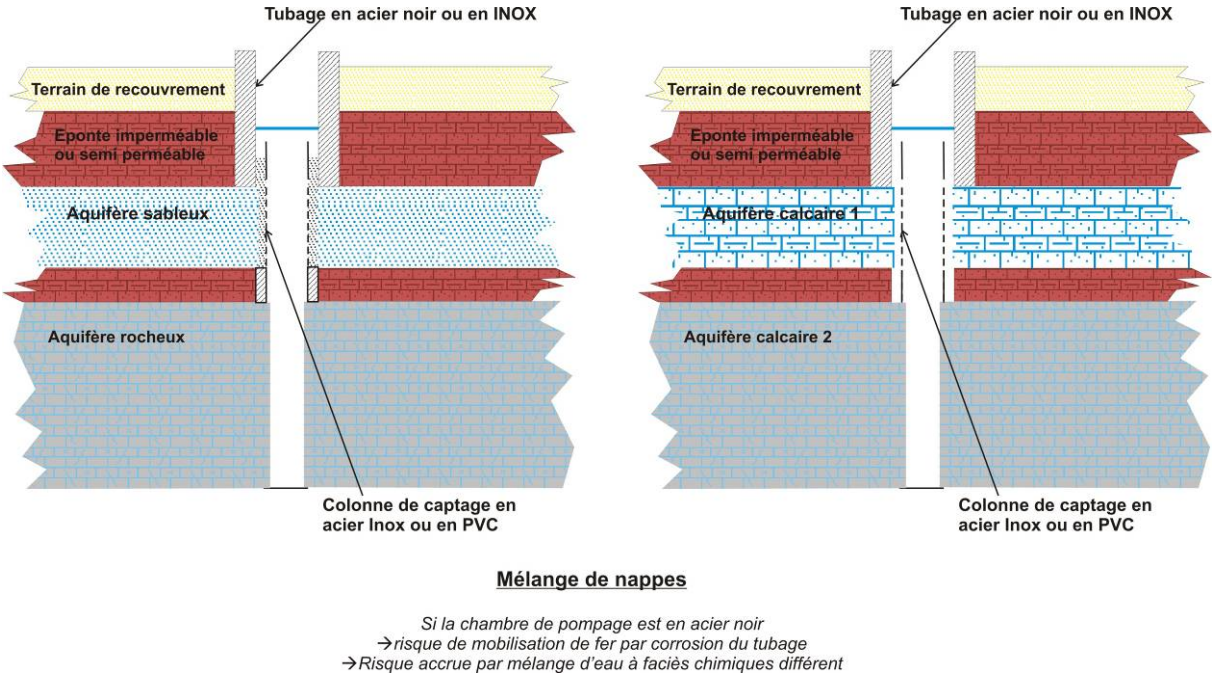


Figure 3 : Exemples de coupes techniques non conformes à la réglementation

1.2. Equipement hydroélectrique

Le plus souvent, un forage est équipé d'une pompe immergée dont les caractéristiques sont adaptées à la productivité de l'ouvrage et aux besoins. La pompe est suspendue à une colonne d'exhaure, un câble électrique et un câble de soutien.

Le diamètre de la pompe doit bien évidemment être très inférieur au diamètre de la chambre de pompage. Pour des raisons économiques, la différence de diamètre entre le tubage et la pompe est souvent faible (exemple : pompe de diamètre 200 mm dans un tubage de 250 mm). Le risque de contact entre ces deux éléments est donc important, surtout si l'on considère qu'un forage n'est pas parfaitement vertical alors qu'une pompe suspendue à sa colonne d'exhaure l'est (effet fil à plomb).

Les corps de pompe peuvent être en acier INOX ou non, les turbines peuvent être en bronze ou en acier INOX ou non.

Les colonnes d'exhaure peuvent être de différents types :

- Colonne à brides en acier noir, galvanisé ou INOX ;
- Colonne vissée ou emboîtée (à jonc) en acier noir ou INOX ;
- Colonne souple en matériau composite.

Les éléments de colonnes et la pompe sont reliés par des brides boulonnées. Les boulons peuvent être en acier noir ou en INOX.

La présence simultanée de métaux de diverses natures dans un milieu aqueux de caractéristiques physico-chimiques particulières, peut entraîner des phénomènes de corrosion liés à des effets diélectriques (contact entre métaux). Dans ce cas, les aciers les moins nobles sont corrodés :

- Tubage de la chambre de pompage en acier noir avec risque de perforation et de mobilisation de fer ;
- Colonne d'exhaure en acier noir ou galvanisé avec risque de perforation et de mobilisation de fer ;
- Boulons avec risque de rupture.

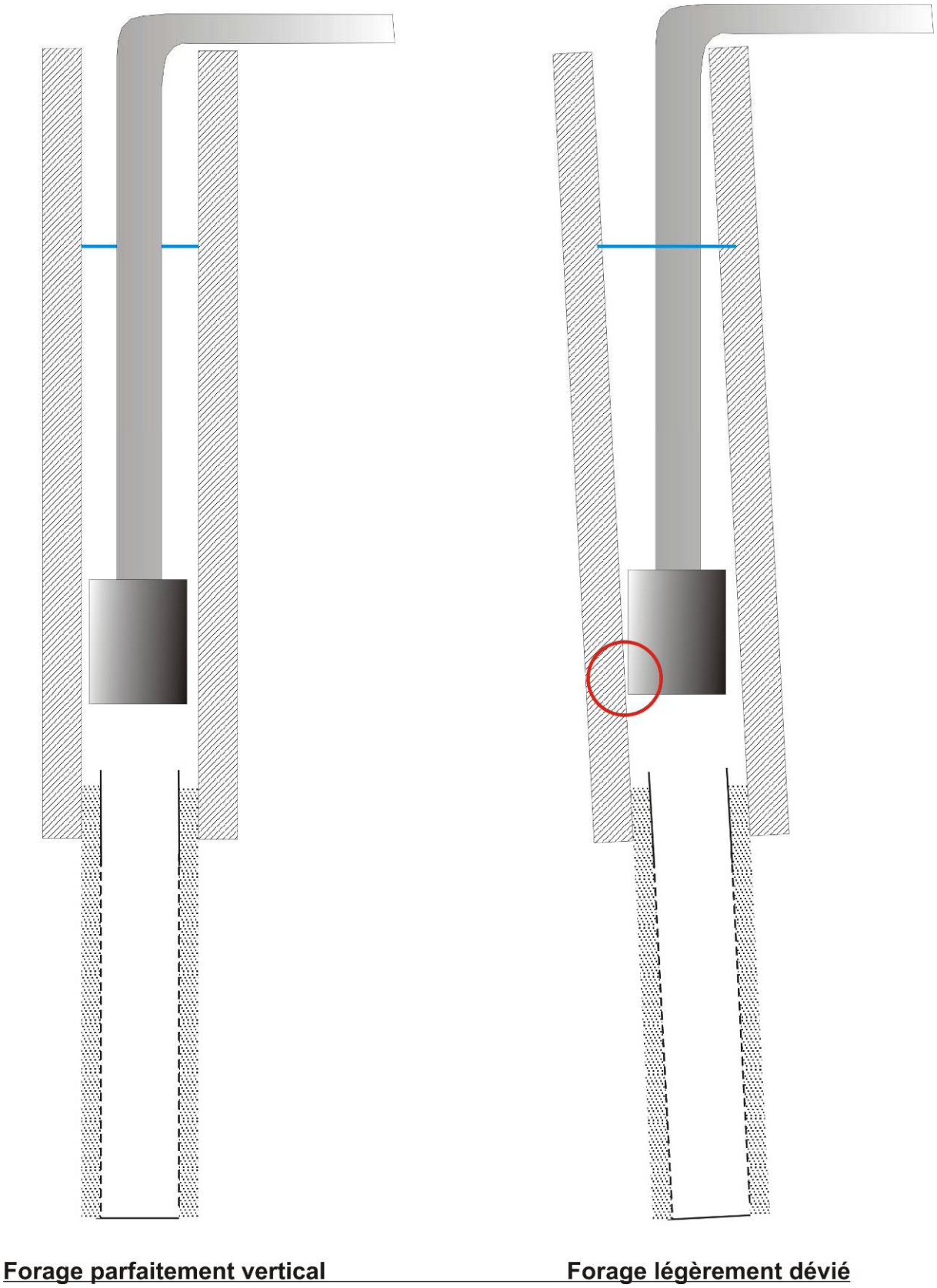


Figure 4 : Equipement hydroélectrique d'un forage

2. Méthodologie

2.1. Généralités sur la présence de fer et de manganèse dans les eaux souterraines

Le fer et le manganèse existent dans les eaux souterraines sous forme cationique. La forme du fer et du manganèse (ionique, métallique, hydroxydes…) dépend des conditions plus ou moins réductrices du milieu. Les conditions de pH et de Eh (potentiel d'oxydo-réduction) sont donc prépondérantes.

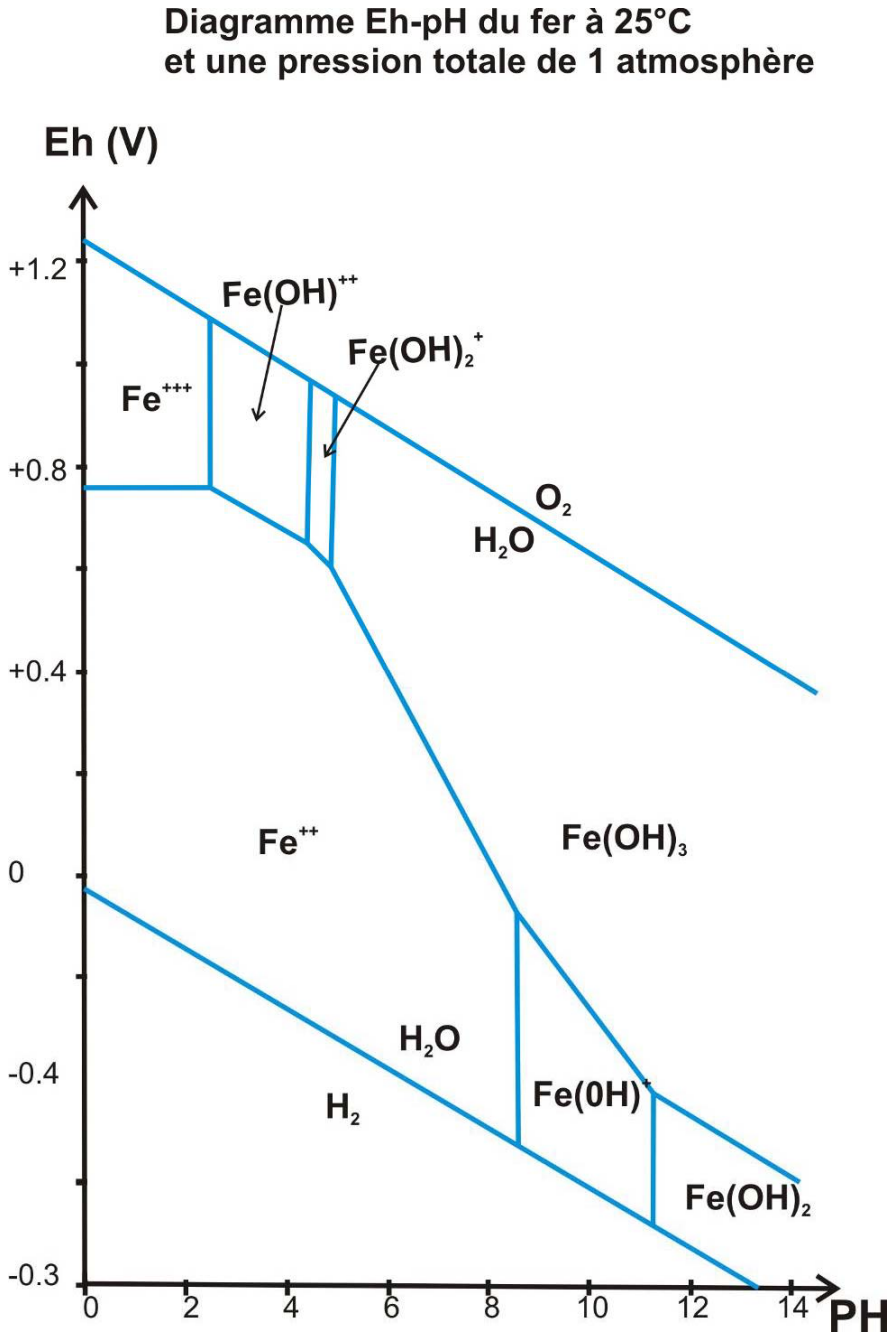
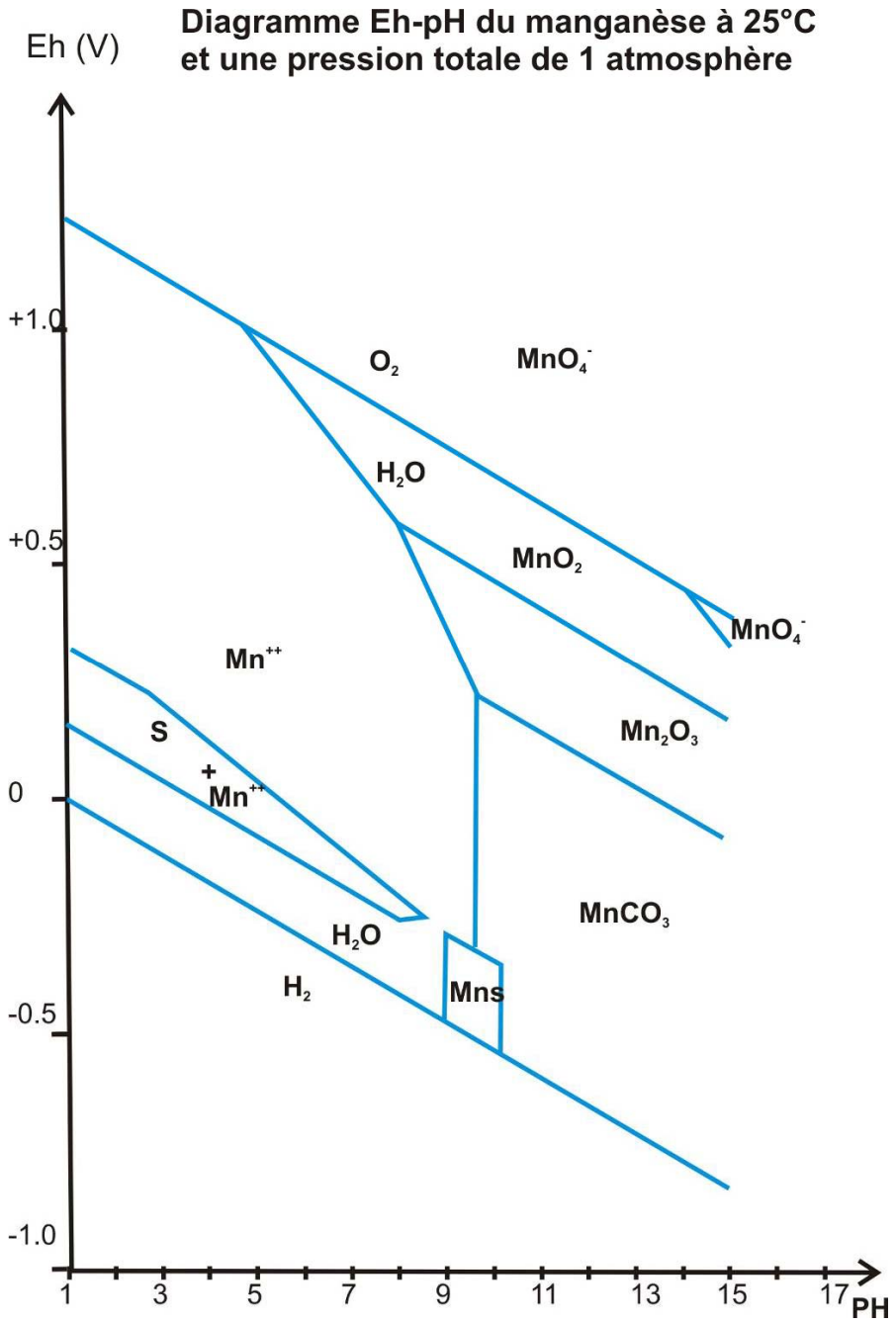


Figure 5 : Diagramme Eh-pH du fer

Le fer ferreux (Fe^{2+}) est soluble dans l'eau, le fer ferrique (Fe^{3+}) précipite sous forme d'hydroxyde. Aux conditions physico-chimiques habituellement rencontrées dans les eaux souterraines (pH et Eh), c'est le fer ferreux soluble qui est le plus souvent rencontré.

L'oxygène dissous contrôle principalement le potentiel d'oxydo réduction. L'oxygénation d'une eau conduit à une oxydation du fer ferreux en hydroxyde ferrique qui précipite. C'est sur ce principe que sont basés les traitements de déferrisation.

Figure 6 : Diagramme Eh-pH du manganèse



La forme ionique Mn^{2+} est soluble dans l'eau, les formes oxydées du manganèse (Mn^{4+}) sont insolubles (oxydes de manganèse). L'ion Mn^{2+} soluble existe à un potentiel d'oxydo réduction supérieur au fer, il est donc plus difficilement oxydable et donc plus difficilement traitable.

Dans le cas d'un fluide réducteur, un pompage alterné provoquera des cycles d'oxydation-réduction sur la zone de battement de la nappe, engendrant une corrosion du tubage ou de la colonne d'exhaure avec des encroûtements d'oxyde de fer et de manganèse entre autres, sur les tubages ainsi que sur et dans la colonne d'exhaure.

Figure 7 : Colonne d'exhaure avec dépôt d'oxydes dans la zone de marnage

2.2. Rôle des microorganismes du fer et du manganèse

Les bactéries du fer participent à l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique en fixant les ions ferriques dans leur organisme (flocs bactériens). Des processus analogues se produisent pour le manganèse.

En fixant le fer et le manganèse dissous dans les eaux de forage, le développement des bactéries du fer et du manganèse entraîne le plus souvent un colmatage des crépines et un encrassement des pompes. Les phénomènes « d'eau rouge » dans les canalisations ont également la même origine.

Une mauvaise association métallurgique dans un forage entraînera une corrosion localisée avec augmentation des concentrations en fer dissous pouvant conduire à un dépassement des limites de qualité. Si l'ouvrage concerné est contaminé par des bactéries du fer et du manganèse, un colmatage par un film bactérien du forage et de ses équipements peut être observé.

2.3. Origine du fer et du manganèse – protocole analytique

Soit le modèle théorique suivant :

Fe mesuré = Fe réservoir + Fe corrosion – Fe déposé

Avec

- Fe mesuré : concentration en fer dissous mesurée dans l'eau en tête de forage ;
- Fe réservoir : fer présent naturellement dans l'aquifère ;
- Fe corrosion : fer issu de la corrosion électrochimique de l'acier des équipements du forage (tubage et matériel d'exhaure) ;
- Fe déposé : fer précipité en amont du prélèvement (film bactérien et dépôt au niveau de la zone de battement de la nappe).

Ce modèle peut également être appliqué au manganèse.

Une inspection par caméra vidéo permet de déterminer si le terme Fe déposé est significatif. Un dosage des ferrobactéries peut également fournir une indication. S'il peut être négligé, le modèle devient alors :

Fe mesuré = Fe réservoir + Fe corrosion

Le terme Fe réservoir peut être connu par plusieurs méthodes :

- Si l'aquifère étudié est homogène, des dosages de fer peuvent être pratiqués sur des échantillons d'eau issus de forages équipés en totalité avec de l'acier INOX et/ou du PVC et des matériaux composites. Aucun phénomène d'oxydation des aciers n'étant susceptible d'avoir lieu, les concentrations en fer et en manganèse mesurées représenteront le « bruit de fond de l'aquifère ». Si le contexte hydrogéologique le permet, des prélèvements pourront également être réalisés sur des sources, en veillant néanmoins à ce que l'oxygénation de l'eau à son émergence n'ait pas déjà provoqué la précipitation du fer ferrique.

- Par pompage par paliers à débits croissant : sauf cas particulier, le fer présent dans l'eau de la nappe captée ne présente pas de variation en fonction du débit à l'inverse du fer corrosion. La quantité de fer produite par corrosion par unité de temps ne varie pas, l'intensité de la corrosion étant identique quelque soit le débit. Ainsi, plus le débit est élevé et plus la teneur en fer issue de la corrosion est faible par effet de dilution.

Le graphique Fe = f(1/Q) permet d'estimer les concentrations en fer dues à la corrosion et à l'aquifère. Cependant, elles ne permettent pas de déterminer les contaminations par infiltration ou drainance à partir d'une nappe superficielle ayant des eaux chargées en fer ou en manganèse. La connaissance du contexte hydrogéologique et un diagnostic du forage associés au protocole décrit ci-dessus doit permettre d'apporter le complément d'information nécessaire.

3. Exemples

3.1. Courbe Fe=f(1/Q)

Forage du Champs de Foire 1 à Coutras (33) :
- Date de réalisation : 1962 ;
- Chambre de pompage profonde de 208 m, en acier noir ;
- aquifère de l'Eocène capté entre 224 et 255 m.

Lors du diagnostic du forage en 2005 (ANTEA 2005), un pompage par palier a été réalisé avec prélèvement d'eau à la fin de chaque palier. Le fer et le manganèse ont été dosés.

Bien que le nombre de paliers soient insuffisants, la diminution de la concentration en fer dissous avec le débit indique que le terme fer corrosion est significatif. La concentration en fer de la nappe doit être proche de 0,19 mg/l.

En 2008, un nouveau forage a été réalisé à l'identique à une cinquantaine de mètres du premier, la concentration en fer dissous et en fer total de son eau est de 0,17 mg/l.

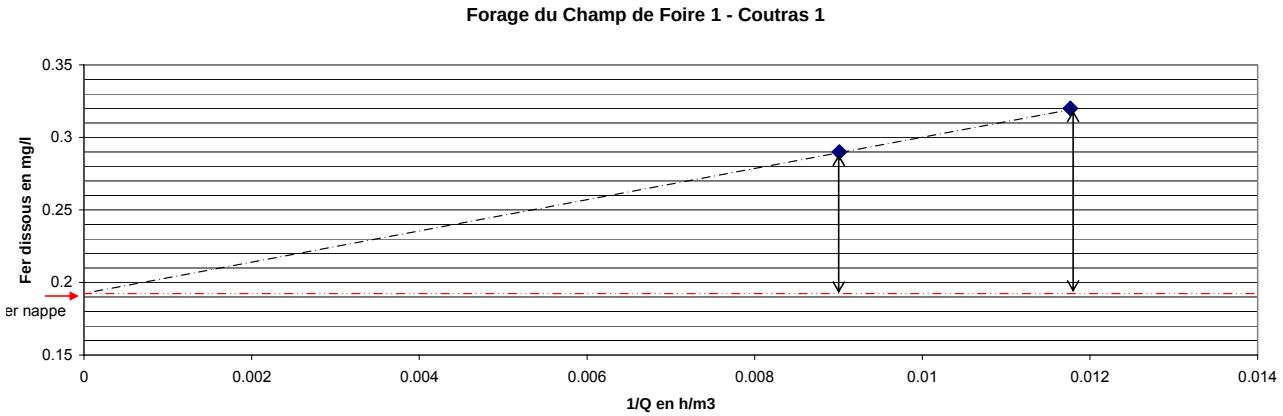


Figure 8 : Forage du Champ de Foire 1 – pompage par paliers – concentration en fer et en manganèse**.**

3.2. Forages profonds du département de la Dordogne

Une étude commandée par le Conseil Général de la Dordogne a permis d'appliquer la méthodologie présentée à un échantillon représentatif de forages profonds de la Dordogne (ANTEA, CFG 1996).

Une dizaine de forages ont été étudiés pour chacun des trois principaux aquifères présents au droit du territoire départemental :
- L'Eocène sableux
- Le Crétacé calcaire
- Le Jurassique calcaire.

Lorsque l'équipement des forages le permettait, des pompages par paliers de débit croisant ont été réalisés. Le programme d'analyses suivant a été mis en œuvre, soit sur un seul échantillon lorsqu'il n'était pas possible de pratiquer des paliers de débit, soit sur un échantillon par palier :

- Paramètres non conservatifs avec mesures in situ : température, pH, Eh, oxygène dissous, teneurs en fer dissous et en manganèse dissous et conductivité ;
- Corrosivité du fluide par mesure instantanée à l'aide d'une sonde à polarisation spontanée ;
- Analyses bactériologiques des micro-organismes du cycle du fer
- Bilan ionique des fluides.

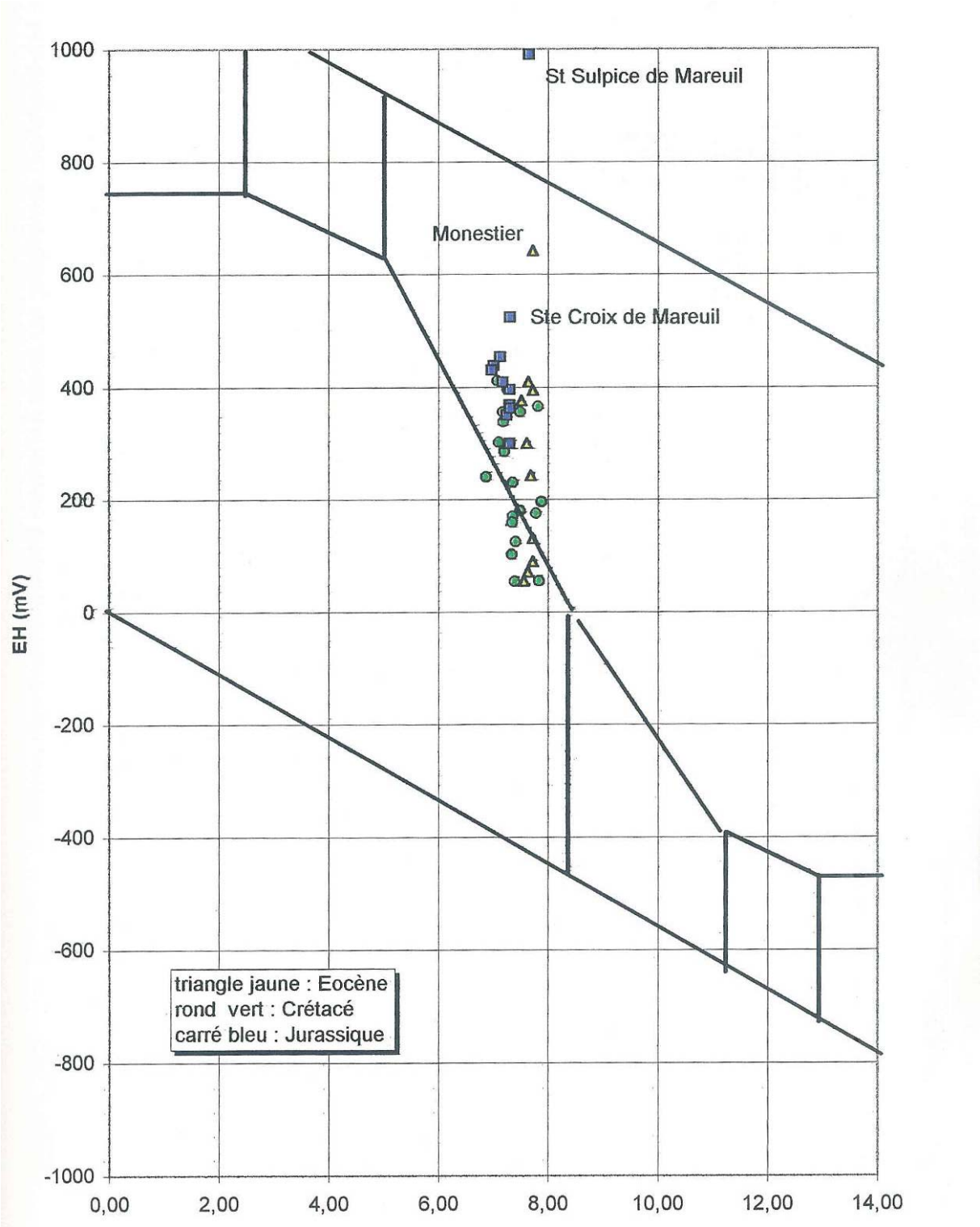


Figure 9 : Points représentatifs des fluides dans un diagramme Eh-pH des forages de la Dordogne (ANTEA-CFG 1996)

Comme le montre la figure ci-dessus, environ 1/3 des forages de la Dordogne ont des eaux susceptibles de contenir du fer ferreux soluble. Les points à Eh élevés correspondent à des eaux dont les prélèvements n'ont pas pu être faits en amont de la chloration, cette dernière ayant tendance à rendre l'eau oxydante.

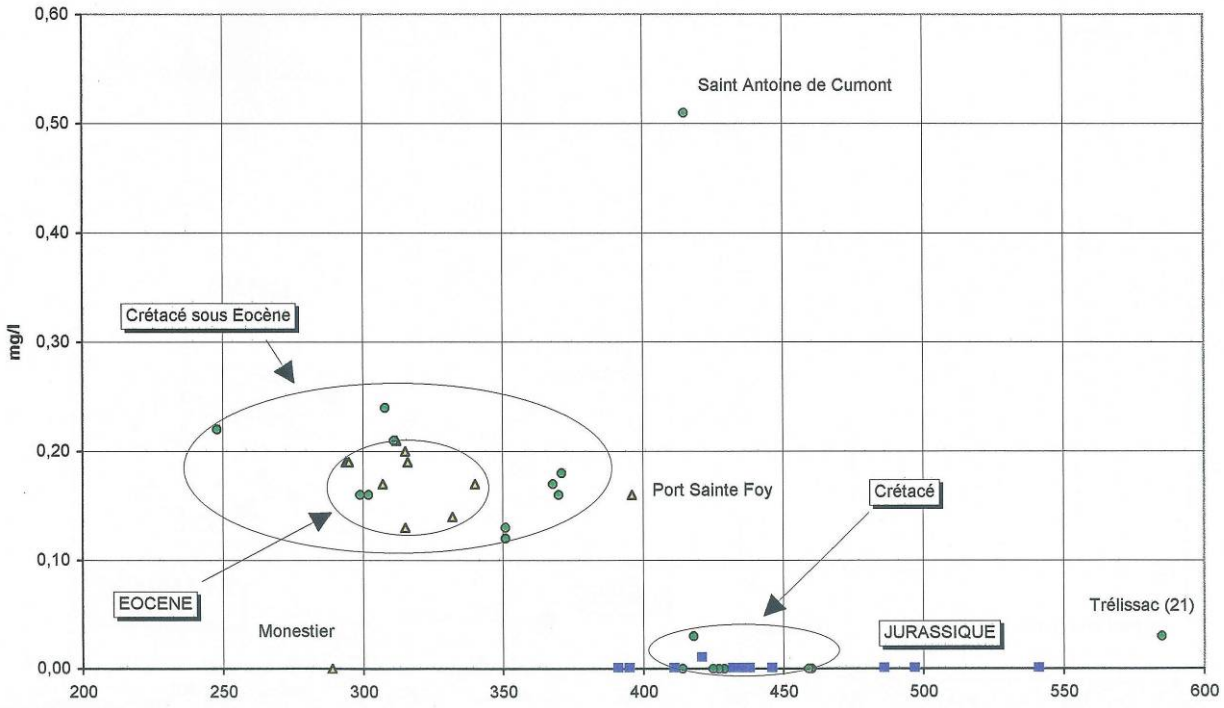


Figure 10 : Points représentatifs des fluides dans un graphique teneur en fer = f(Eh) (ANTEA-CFG -1996

Comme le montre le graphique ci-dessus, les eaux des forages à l'Eocène ou au Crétacé sous Eocène, à Eh modéré, présentent des teneurs en fer ferreux dissous significatives. Les eaux des forages au Crétacé et au Jurassique présentent généralement des eaux plus oxydantes avec des teneurs en fer dissous moindres.

Les principales conclusions de cette étude sont :

- Les eaux souterraines du département de la Dordogne ont un faciès bicarbonaté calcique et ne constituent pas un milieu particulièrement corrosif vis-à-vis des aciers au carbone ;
- Les conditions de Eh et de pH permettent de maintenir en solution des quantités relativement restreintes de fer, en particulier pour le Crétacé sans recouvrement tertiaire et le Jurassique dont le Eh situe ces eaux dans le domaine de précipitation des hydroxydes de fer ($Fe(OH)_3$.
- Dans l'Eocène et le Crétacé supérieur sous recouvrement tertiaire, où les conditions de Eh et de pH permettent la présence de fer en solution, un équilibre s'est établi entre l'eau et la roche, avec des teneur en fer naturel variant entre 0,13 et 0,22 mg/l.
- Pour l'Eocène et le Crétacé supérieur sous recouvrement tertiaire, l'origine du fer est lié à l'aquifère dans la quasi-totalité des cas ou l'incertitude a été levée par pompage par paliers ;
- Dans le Jurassique, on ne peut pas exclure des phénomènes de corrosion. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut, on ne retrouve pas ou peu de fer dissous dans ses eaux. On peut supposer que les conditions de pH et de Eh permettent la précipitation du fer et du manganèse issus des métaux par corrosion en hydroxyde ferrique et en oxyde de manganèse. Ces forages doivent être sensibles au colmatage ;
- Compte tenu de la faible agressivité des fluides, les conditions particulières à chaque ouvrage prévalent dans l'apparition de phénomènes corrosifs (courants vagabonds, mauvaise association de métaux…)

4. Conclusion et préconisations

4.1. Conception des ouvrages

Afin de ne pas mélanger des eaux à faciès chimiques différents, il convient de ne capter que des niveaux productifs à chimies homogènes, le déséquilibre chimique du mélange peut conduire à un enchaînement corrosion →dépôts.

L'association de métaux divers constitue un risque accru de corrosion au sein d'un forage, et ceci d'autant plus que le fluide est conducteur. La présence conjointe d'acier ordinaire et d'acier inoxydable dans un milieu conducteur favorise la création de courants galvaniques ou l'acier ordinaire constitue l'anode et est donc sacrifié. Pour les mêmes raisons, la composition des équipements de pompages doit être choisie avec soin. On veillera notamment à isoler les différents éléments de nature d'acier différente par des joints isolants. Les groupes de pompages et les colonnes devront être mis en place au centre du forage à l'aide de centreur inerte (téflon) pour éviter les points de contact avec le tubage de la chambre de pompage.

Dans le cas de fluide particulièrement corrosif, une bonne isolation électrique entre les différents métaux peut ne pas être suffisante. Un forage tubé en acier INOX et équipé d'un matériel de pompage également tout Inox peut être nécessaire.

4.2. Mode d'exploitation

L'exploitation du forage devra être menée en privilégiant un débit modéré sur de longue période de pompage, plutôt qu'un débit important sur des temps courts associés à des rabattements importants et à des cycles arrêt/marche des pompes fréquents, ceci afin d'éviter une succession de cycles oxydation puis réduction des parois des tubages et de la colonne d'exhaure dans la zone de battement de la nappe.

Un mode d'exploitation à cycles courts et répétés conduit également à la rétention de petits volumes d'eau peu oxygénée dans des infractuosités (raccord de tubage, rayure de l'acier, passage de câble, boulons des brides…) qui lorsque l'air remplace l'eau lors du pompage constituent autant de micro piles et donc de zones de corrosion privilégiée.

4.3. Intervention sur les ouvrages

Toutes les interventions sur un ouvrage peuvent avoir des conséquences néfastes en terme de corrosion et de dépôts dans les ouvrages.

La création d'hétérogénéité à la surface du métal (rayures, chocs, altérations de l'acier par soudure…) constituent des zones de fragilité propices à la corrosion. Il est donc important de limiter le plus possible ces dégradations, ce qui n'est pas toujours facile !

La contamination d'un forage par les ferro-bactéries peut subvenir lors des opérations de diagnostic ou de manipulation de la pompe. L'introduction dans le forage d'un groupe de pompage ayant été posé sur le sol peut suffire à introduire des souches présentes dans le sol. Ces éléments doivent donc être désinfectés avant d'être remis en place dans le forage.

4.4. Conclusion

Dans les cas les plus fréquents, il est possible de déterminer relativement facilement :

- la part de fer dissous présent dans les eaux de forage qui est due à l'équilibre qui s'est mis en place entre l'eau et la roche aquifère,
- la part due à des phénomènes corrosifs dans le forage.

Par contre il est plus difficile de déterminer les causes de la corrosion. Pour cela, un diagnostic de l'ouvrage est nécessaire afin de :

- Déterminer la coupe technique du forage lorsqu'elle est mal connue ;
- Recueillir les données sur le matériel d'exhaure ;
- Observer par démontage du matériel d'exhaure et par caméra vidéo dans le forage, les zones de corrosion et de dépôts.

Si le fer en excès provient de l'encaissant, une étude hydrogéologique devrait donner des pistes pour déterminer s'il provient du seul aquifère capté ou d'une contamination de ce dernier par des eaux superficielles.

Bibliographie

ANTEA-CFG (1996) Origine du fer et du manganèse dans les forages du département de la Dordogne – A06243

ANTEA (2005) Forages « Champs de Foire » à Coutras et forage « Rolland » aux Peintures (33) – Diagnostics par caméra vidéo, diagraphie et pompage d'essai – A38506/A

Rôle du dénoyage dans le colmatage d'un puits : apports et limites de la simulation numérique

François LARROQUE [1], Michel FRANCESCHI [1]

[1] EA GHYMAC n° 4321 Université de Bordeaux, Institut EGID, allée Daguin 33607 Pessac

Résumé
Pour les aquifères captifs ou semi-captifs peu profonds, le dénoyage du puits, résultat d'une configuration d'exploitation inadaptée, semble jouer un rôle dans la mise en place dépôts incrustant sur l'équipement du puits (crépine) ou sa proche périphérie (massif filtrant, aquifère). Ces dépôts réduisent d'autant la porosité du milieu aquifère et donc la productivité du puits. Pour préciser la part effective du dénoyage et son impact potentiel sur les processus de colmatage, nous proposons ici un modèle numérique couplé écoulement/transport/réaction développé à partir du code de calcul PHAST. Les premiers résultats de simulation conduisent à une distribution spatiale complexe des dépôts à l'axe du puits et sa proche périphérie présentant des similitudes avec certains dépôts observés lors de la réhabilitation d'ouvrages de production. Toutefois les masses trop faibles semblent souligner les limites de la modélisation distribuée classique pour cette problématique.

1. Introduction

La perte de productivité d'un ouvrage d'exploitation est souvent associée à des phénomènes de colmatage. Le colmatage et l'augmentation des pertes de charge associée trouvent leurs origines dans divers phénomènes non exclusifs qui peuvent être mécanique, chimiques ou encore biologique. Une des raisons commune à ces phénomènes de dégradation de l'ouvrage est le développement de dépôts de diverses origines entraînant une chute de la conductivité hydraulique dans la périphérie immédiate du puits et donc une diminution de la productivité de l'ouvrage. Une étude réalisée en 1998 par l'Association Technique et Scientifique Allemande sur l'Eau et le Gaz (DVGW), portant sur 12000 puits, a abouti aux statistiques suivantes concernant la problématique du vieillissement des ouvrages et la chute de productivité associée (Houben, 2003a):

- le colmatage d'origine chimique est responsable dans 87% des cas ;
- les processus de détérioration physique (colmatage par venues de sable, corrosion) concernent 13% des ouvrages (respectivement 9,3% et 3,7%) ;
- le colmatage d'origine biologique reste minoritaire sur le volume de puits investigué.

De fait, le développement de dépôts incrustants affecte les performances des puits d'exploitation. Une part prépondérante correspond à une détérioration de la conductivité hydraulique dans la proche périphérie de l'ouvrage ou directement sur la zone de production (massif filtrant, crépine). Les oxydes de fer, de manganèse et les carbonates sont les phases solides les plus communément rencontrées pour des qualités d'eau standard. Leur dépôt entraîne un colmatage partiel ou total de la porosité de l'aquifère, du massif filtrant ou encore de la crépine. Ce phénomène a été préalablement étudié (Walter, 1997, Hitchon, 2000, Houben, 2003a and 2003b). Il apparaît que les ouvrages exploitant des nappes captives, soumis à des phases de dénoyage répétées, sont plus exposés aux problèmes de colmatage (Driscoll, 1986).
Cet article décrit une première approche pour estimer l'impact du phénomène de dénoyage sur le colmatage à long terme d'un puits d'exploitation. Cette phase a pour but de développer le modèle numérique et tester la validité générale de la méthodologie retenue.

2. Approche conceptuelle

Le dénoyage d'un aquifère captif ou semi captif se produit lorsque le niveau dynamique de la nappe passe d'un niveau d'énergie à un niveau réel, à l'équilibre avec la pression atmosphérique, au dessous de l'unité géologique entraînant initialement le confinement. Pour un puits de production, ce phénomène se manifeste à la proche périphérie du puits (figure 1). Ce type de situation est lié à un dimensionnement du schéma d'exploitation inadapté.

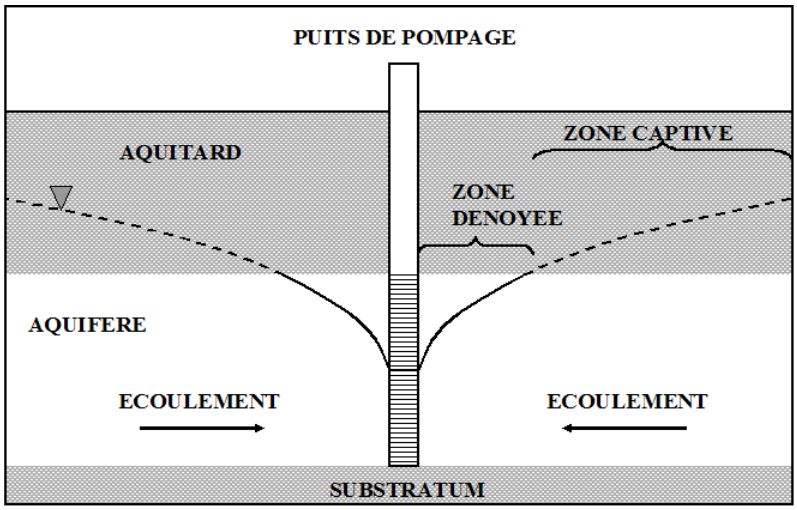


Figure 1: *principe général du dénoyage d'une nappe captive lors d'un pompage*

Le dénoyage n'est pas directement responsable d'une dégradation des propriétés physiques de l'aquifère, même si des phénomènes de fatigue rhéologique peuvent se produire. Toutefois, il entraîne localement des modifications physico-chimiques importantes, pouvant mener, sous certaines conditions, à des dépôts incrustants. Ce phénomène a déjà été observé pour des drains horizontaux dans des dispositifs d'assainissement (Leung et al., 2005).
En effet, le contact d'une eau de à l'état d'oxydo-reduction réduit (typique d'une eau souterraine), avec l'oxygène introduit durant la phase de dénoyage génère classiquement des dépôts et plus particulièrement des oxydes de fer, en quantité variable selon les concentrations initialement présentes en solution. Ce processus peut être décrit à l'aide de l'équation suivante:

$$4Fe^{2+} + O_2 + 10H_2O = Fe(OH)_{3(s)} + 8H^+$$

Les cinétiques de réaction pour ce phénomène sont bien décrites dans la littérature (Milero et al., 1987; Houben, 2004). Un processus d'autocatalyse, induit par les dépôts d'oxydes de fer, doit également être intégré pour rendre compte de la totalité du processus (Houben, 2004).
Parallèlement, les dépôts de carbonate doivent également être pris en compte. Ces derniers sont associés aux oxydes de fer à cause du dégazage de dioxyde de carbone à la très proche périphérie du puits lorsque l'écoulement devient turbulent (Houben et Treskatis, 2007). L'équation est la suivante:

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- = CaCO_{3(s)} + CO_{2(g)} + H_2O$$

Ces deux processus géochimiques sont couplés et utilisés pour rendre compte des dépôts incrustants pouvant se manifester lors de la phase de dénoyage.

3. Développement du modèle couplé écoulement/géochimie

A partir des constations précédentes, un modèle 3D écoulement/géochimie est construit. Le système correspond à un aquifère captif homogène, incluant un puits de pompage dont l'exploitation génère une situation locale de dénoyage. Le code de simulation utilisé est PHAST (Parkhurst et al., 2004). Ce modèle est un couplage du modèle géochimique PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999) et du modèle de transport/écoulement HST3D (Kipp, 1997). C'est un code de calcul général qui permet de simuler les écoulements, le transport et les processus géochimiques contrôlés par les équilibres ou les cinétiques. L'ensemble des données nécessaires aux simulations ont été mises en forme à partir du pré-processeur GOPHAST (Winston, 2006)). Les résultats ont été traités à l'aide de la plateforme de calcul MATLAB™.
L'aquifère est initialement considéré comme captif, homogène, isotrope et d'épaisseur constante (20 mètres). La conductivité hydraulique K retenue est de $5x10^{-5}$ m s^{-1}. La porosité du matériau est de 0.25. La discrétisation spatiale du domaine, compte tenu de l'homogénéité, fait appel à des règles de symétrie radiale pour limiter le nombre de mailles de calcul. Un quart du domaine est modélisé (figure 2), centré sur le puits de pompage dont le débit est divisé par 4. Le puits est simulé par une condition de flux de type Neumann sur la totalité de l'épaisseur de l'aquifère (puits parfait). Les coté opposés au puits correspondent à des charges imposées (conditions de type Dirichlet). Les valeurs de charge et de débit ont pu être dimensionnées à partir de la solution analytique de Thiem, permettant de créer des conditions locales de dénoyage à la périphérie du puits. Le schéma de discrétisation fait appel à un maillage carré emboîté de 0,5 mètres à la périphérie du puits passant par la suite à 1 mètre. Au total, le modèle est constitué par 64000 cellules de calcul actives.

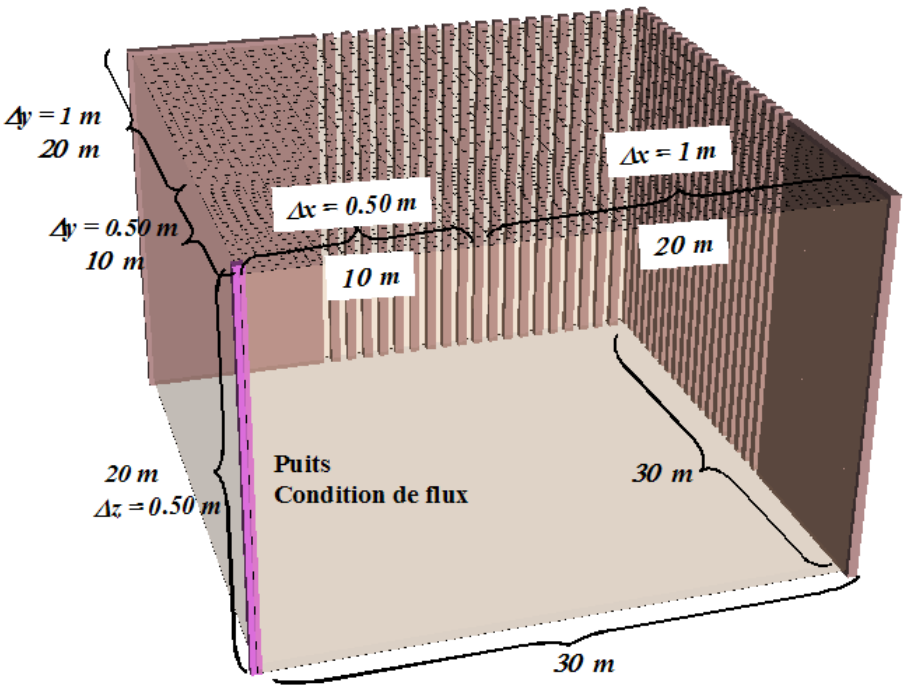


Figure 2: *schéma de discrétisation et conditions aux limites retenus*

Les paramètres de transport (dispersivité) sont considérés comme homogène sur le domaine de simulation. Compte tenu du caractère théorique de l'application, un ratio de 1/10 entre dispersivité latérale et verticale est retenu (Gelhar et al., 1992). Ce paramètre est un paramètre essentiel dans la caractérisation des phénomènes de transport et est directement lié à l'échelle de caractérisation du système étudié (Boggs et al., 1992). Plusieurs valeurs ont ainsi été retenues et testées afin d'appréhender la sensibilité du modèle.
Le modèle est utilisé pour des simulations géochimiques transitoires à partir d'un régime d'écoulement établi en régime permanent.

4. Simulation du colmatage au puits et sa périphérie

Une première simulation, présentée ici, a permis de vérifier la cohérence générale du modèle. Les choix de discrétisation spatiale et temporelle ont ainsi être testés.
Une eau interstitielle présentant un faciès hydrochimique classique pour une eau potable issue d'une nappe captive est utilisée (tableau 1). Cette eau est proche de l'équilibre avec la calcite, avec une pression partielle Pco_2 de $10^{-2.5}$ atm

Variable	Eau interstielle
Temperature (°C)	25
pH	7.624
pe	0.528
C (mmol/litre)	2.284
Ca (mmol/litre)	1.089
Fe (10^{-3} mmol/litre)	5.2

Tableau 1: *faciès hydrochimique de l'eau interstielle*

Les conditions hydrodynamiques utilisées pour le modèle induisent une zone de dénoyage, équivalente à une surface projetée de 0,80 mètres de rayon. Dans ces conditions, une simulation transitoire correspondant à un régime équivalent de 250 heures de dénoyage est effectuée.
La distribution obtenue pour les incrustations d'oxyde de fer présente une distribution complexe (figure 3).

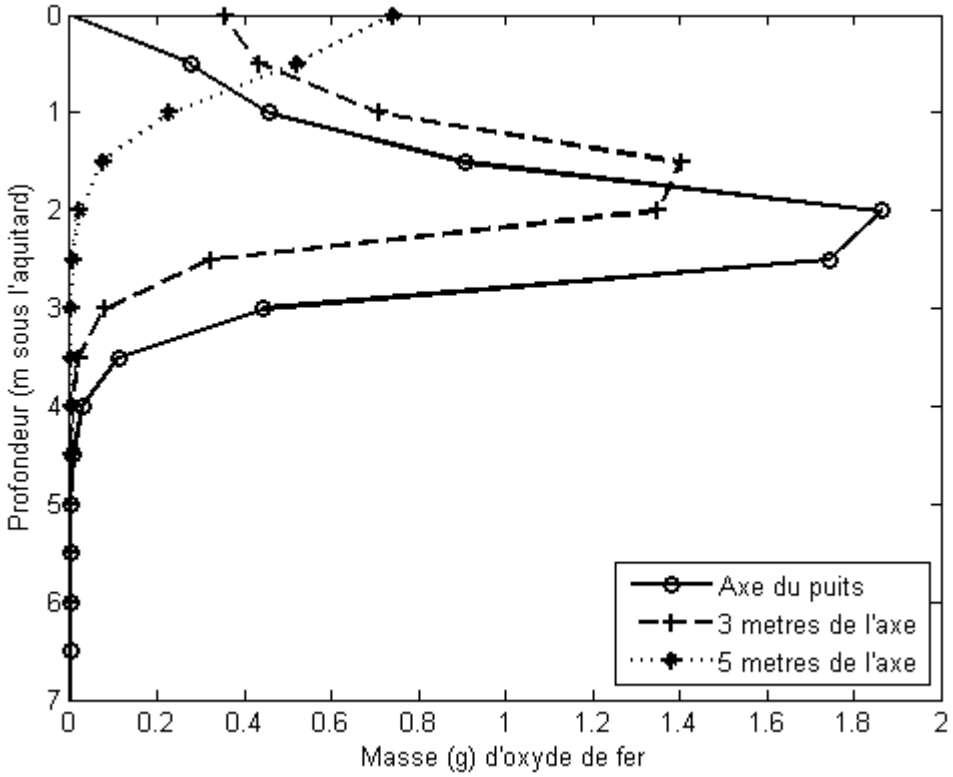


Figure 3: *masse d'oxyde de fer précipitée pour 250 heures de dénoyage*

La majeure partie du dépôt est observée à la périphérie immédiate du puits. A l'axe du puits, les incrustations tendent à être plus abondantes dans la partie supérieure de la crépine. La valeur maximale de masse précipitée est atteinte entre 2 et 3 mètres de profondeur. La partie la plus supérieure reste affectée très modérément.
Latéralement, en s'éloignant du puits, la distribution évolue. A 3 mètres de l'axe, bien que la distribution générale des dépôts reste comparable à celle calculée pour le puits, la quantité de dépôt diminue. On note toutefois, malgré des valeurs absolues faibles, la présence d'un dépôt à l'interface entre aquifère et aquitard, dont la quantité augmente avec la distance, jusqu'à 5 mètres pour devenir nulle au delà de cette distance, pour les conditions de simulation utilisées. Les premières observations soulignent l'hétérogénéité des dépôts d'oxyde de fer engendrés par le dénoyage. La distribution générée par le phénomène semble présenter une structure courbée. La majeure partie des dépôts s'effectue à l'axe du puits. La valeur maximale est atteinte dans la partie supérieure de la crépine. Ce type de distribution semble cohérent avec les rares données disponibles concernant la répartition des précipités sur les ouvrages d'exploitation (Houben, 2007).
Les quantités d'oxyde de fer déposées sont faibles. La faible teneur en fer de l'eau interstielle et la durée relativement brève de la période de dénoyage peuvent en partie expliquer ce fait. En effet, considérant une exploitation moyenne de 12 heures par jour pour le puits simulé, 250 heures de simulation correspondraient à une durée effective de 21 jours. Or les phénomènes de chute de productivité affectent généralement des ouvrages exploités depuis plusieurs années. Des tests sur la composition initiale de l'eau interstitielle et sur les durées de simulation permettront de vérifier les ordres de grandeur des masses déposés.

4. Conclusions et perspectives

Un modèle couplé géochimie/transport/écoulement a été développé pour comprendre les phénomènes de colmatage induits par les processus de dénoyage d'un aquifère. Les premières simulations ont validé les choix en terme de discrétisation et de conditions aux limites, permettant de restituer la distribution de dépôts d'oxydes de fer suite à une période de dénoyage équivalente à 250 heures. Les résultats indiquent une distribution complexe des dépôts avec comme élément majeur une part importante des dépôts obtenue à l'axe du puits, dans le premier tiers de la crépine. Les masses absolues précipitées sont faibles mais restent liées aux conditions de simulation utilisés dans cette première approche (concentration en fer de l'eau interstielle et durée équivalente de dénoyage). Il ressort toutefois que les zones de dépôts mises en évidence pourraient jouer un rôle important dans l'évolution de la productivité. En effet c'est à la crépine que les vitesses sont maximales et que les dépôts pourraient dès lors générer des pertes de charge importante.

Ce modèle ne constitue pour l'instant qu'une première approche. Plusieurs développements doivent être apportés et en particulier :

- tests de sensibilité sur les paramètres de transport (dispersivité);
- impact de la composition de l'eau interstielle;
- impact de la durée équivalente de dénoyage.

Parmi les perspectives, le couplage d'un modèle de perméabilité devrait permettre de calculer les variations induites par le colmatage et estimer l'impact du processus de dénoyage sur l'évolution de la productivité de l'ouvrage à long terme. Plusieurs modèles de ce type existent (Saripalli et al., 2001, Li et al., 2006). Toutefois, la problématique d'obturation de la crépine par les formations précipitées pourrait nécessiter le recours à des modèles plus particuliers de type pétrolier (Han et Dusseault, 2003), où la caractérisation du puits passe par une prise en compte très fine de l'interface puits/aquifère qu'il sera cependant difficile de restituer compte tenu des choix de construction numérique retenus ici.

Références bibliographiques

Boggs, J. M.; Young, S. C.; Beard, L. M.; Gelhar, L. W.; Rehfeldt, K. R. & Adams, E. E. 1992. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer, 1, overview and site description. *Water Resour. Res.* **28**: 3281—3291.

Driscoll, F. G. 1986. *Groundwater and wells*, Reynolds Guyar Designs.

Gelhar, L. W.; Welty, C. & Rehfeldt, K. R. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resour. Res.* **28**: 1955—1974.

Han, G. & Dusseault, M. B. 2003. Description of fluid flow around a wellbore with stress-dependent porosity and permeability. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **40**: 1--16.

Hitchon, B. 2000. "Rust" contamination of formation waters from producing wells. *Applied Geochemistry* **15**: 1527-33.

Houben, G. & Treskatis, C. 2007. *Water Well - Rehabilitation and Reconstruction*, McGraw-Hill.

Houben, G. J. (2004). Modeling the buildup of iron oxyde encrustations in wells. *Ground Water* **42**: 78-82.

Houben, G. J. 2003a. Iron oxyde incrustations in wells. Part 1: genesis, mineralogy and geochemistry. *Applied Geochemistry* **18**: 927-939.

Houben, G. J. 2003b. Iron oxyde incrustations in wells. Part 2: chemical dissolution and modeling. *Applied Geochemistry* **18**: 941-954.

Kipp, K. L. 1987. HST3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground-water flow systems. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 86-4095.

Li, L.; Benson, C. H. & Lawson, E. M. 2006. Modeling porosity reductions caused by mineral fouling in continuous-wall permeable reactive barriers. *Journal of Contaminant Hydrology* **83**: 89--121.

Millero, F. J.; Sotolongo, S. & Izaguirre, M. 1987. The oxidation kinetics of Fe(II) in seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **51**: 793--801.

Leung, C.; Jiao, J.; Malpas, J.; Chan, W. & Wang, Y. 2005. Factors affecting the groundwater chemistry in a highly urbanized coastal area in Hong Kong: an example from the Mid-Levels area. *Environmental Geology* **48**: 480—495.

Parkhurst, D. & Appelo, C. A. J. 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2):A computer program for speciation, reaction path, 1D-transport and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water Investigative Report.

Parkhurst, D. L.; Kipp, K. L.; Engesgaard, P. & Charlton, S. R. 2004. PHAST - A program for simulating ground-water flow, solute transport, and multicomponent geochemical reactions. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A8.

Saripalli, K. P.; Meyer, P. D. & Bacon, D. H. 2001. Changes in hydrologic properties of aquifer media due to chemical reactions: a review.. *Critical reviews in Environmental Science and Technology* **31**: 311-349.

Walter, D. A. 1997. Geochemistry and microbiology of Iron-related well-screen encrustation and aquifer biofouling in Suffolk County, Long-Island, New York. U.S. Geological Survey Water Resour. Invest. Rep. 97-4032.
Winston, R. B. 2006. GoPhast: A Graphical User Interface for PHAST. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A20.

Exploitation durable des ouvrages de captage d'eau souterraine

Marc ALARY [1], Boris DAVID [1]

[1] Veolia Eau Direction Technique, 1 rue G.B Pirelli, 94410 Saint-Maurice, France

Résumé
La gestion patrimoniale des captages d'eau souterraine occupe une place essentielle dans la préservation de la ressource en eau. L'exploitant a pour mission de mettre en place une gestion préventive en assurant un suivi efficace de l'état et des performances des ouvrages de captage, afin de détecter au bon moment des problèmes potentiels, de déterminer les causes de ces défaillances et d'apporter les remèdes appropriés. Il doit donc surveiller régulièrement un certain nombre de paramètres liés à l'exploitation des captages (débit, niveaux, productivité, état de l'ouvrage, rendement du système de pompage, etc.). Pour ce faire, il dispose d'outils de plus en plus sophistiqués, notamment grâce à la télégestion, qui permettent de suivre l'ouvrage de façon précise et fiable et qui constituent des moyens d'aide efficaces pour prendre les décisions les mieux adaptées aux différentes situations. Ainsi, l'exploitant contribue à la gestion durable de la ressource en eau.

Introduction

Environ 63% des eaux potables distribuées en France, soit 3,5 milliards de mètres cubes, sont puisés dans les nappes d'eau souterraine au moyen d'environ 40 000 puits, forages et captages de source (Lallemand-Barrès et Roux, 1999). Ces ouvrages de captage constituent un véritable patrimoine qu'il convient d'entretenir et de protéger afin d'assurer leur pérennité et la continuité de l'alimentation en potable. Ils constituent aussi des points de communication entre les terrains superficiels et les nappes d'eau souterraine et peuvent donc avoir un impact important sur la qualité de la ressource en eau souterraine. Le temps où il était possible de créer et d'exploiter un ouvrage de captage « artisanal », sans se soucier de l'impact sur la ressource et avec un minimum de contraintes administratives est révolu depuis longtemps. Le souci de préserver durablement la ressource en eau souterraine est aujourd'hui un enjeu majeur qui se traduit dans la réglementation au travers notamment de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA), et se met en pratique par le biais d'actions concertées à l'échelle des bassins versants dans le cadre des Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE).

Pour l'exploitant des systèmes d'alimentation en eau potable (AEP), la préservation de la ressource en eau nécessite de mettre en œuvre une gestion rigoureuse des ouvrages de captage. Outre la protection de la ressource, s'ajoute une dimension économique non négligeable car extraire l'eau du milieu naturel et la rendre utilisable pour la consommation humaine représente un coût important. Une bonne gestion des ouvrages de captage permet à l'exploitant d'optimiser et de pérenniser son exploitation, en évitant ou en anticipant les défaillances majeures, ce qui engendre à terme d'importantes économies. Cet article s'attache à rappeler quelques pratiques de gestion permettant d'exploiter durablement les ouvrages de captage d'eau souterraine et présente un outil développé par Veolia Eau pour faciliter le suivi de la performance hydraulique des forages à partir des données issues de la télégestion.

Pratiques de gestion des ouvrages de captage

Un captage d'eau souterraine est un élément essentiel du système d'alimentation en eau potable et la moindre défaillance du captage peut avoir des conséquences majeures voire désastreuses pour la continuité de l'alimentation en eau des populations desservies. Ce n'est cependant pas un équipement technique tout à fait comme les autres puisque il permet de prélever une ressource qui se ne voit pas depuis la surface. Sa conception, sa réalisation, les matériaux qui le constituent sont des paramètres déterminants pour son exploitation. De même, si les interventions humaines sont pratiquées dans l'ignorance des règles de gestion des captages d'eau souterraine, le fonctionnement même de l'ouvrage peut s'en trouver compromis (Agences de l'Eau, 1994). En outre, lorsqu'un ouvrage doit être remplacé, la procédure est aujourd'hui longue (plusieurs années) et les exigences de qualité de conception et de réalisation du nouveau captage engendrent un coût important pour la collectivité.

Tous ces aspects militent en faveur d'une surveillance accrue du captage existant afin d'en ralentir la dégradation et de pérenniser son exploitation. La réalisation, la surveillance et l'entretien des ouvrages de captage sont d'ailleurs réglementés au titre du code de l'environnement (articles L-214-4 à 214-8) et de la loi sur l'eau de janvier 1992 qui, par les arrêtés qui en découlent (arrêté du 11 septembre 2003 modifié en 2006) et des décrets d'application, a rendu obligatoire un contrôle minimum de l'état des ouvrages (BRGM, 2004). Depuis peu, une norme relative à la réalisation, au suivi et à la surveillance des ouvrages d'eau souterraine a également été publiée (AFNOR, 2007).

Comme la plupart des ouvrages, un captage d'eau souterraine vieillit et ce phénomène est inéluctable. Le vieillissement est lié à plusieurs facteurs, y compris des facteurs naturels comme le contexte hydrogéologique, la profondeur de la nappe captée, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau, mais aussi des facteurs humains comme une conception inadaptée de l'ouvrage, des mauvaises pratiques d'exploitation, et l'absence de suivi et/ou d'entretien. Il est donc possible d'atténuer les effets du vieillissement en agissant à la fois sur la réalisation de l'ouvrage (technique de forage, choix des équipements, choix de la crépine et du massif filtrant, etc.) et sur son mode d'exploitation (adaptation du régime de pompage) (Gilli, Mangan, Mudry, 2004).

Lorsqu'un exploitant prend en charge la gestion d'un captage d'eau souterraine, il se retrouve souvent face à un ouvrage qui a déjà une histoire et n'a donc finalement de réelle maîtrise que sur le régime d'exploitation qu'il va mettre en place. Sa première démarche doit être de se constituer un dossier technique dans lequel sont compilés les éléments essentiels à la connaissance de l'ouvrage et de son fonctionnement :

- le contexte hydrogéologique,
- la coupe technique,
- les caractéristiques techniques des équipements,
- les caractéristiques hydrauliques de l'ouvrage (débit, productivité),
- la qualité physico-chimique de la nappe captée,
- les contraintes réglementaires qui l'encadrent (arrêté de DUP),
- les conditions d'exploitation,
- les différentes interventions dont il a fait l'objet (changement de pompe, diagnostics, travaux de régénération et/ou de réhabilitation, etc.).

L'ensemble de ces données peut être synthétisée dans une fiche signalétique de l'ouvrage qui constitue le socle technique à partir duquel l'exploitant peut optimiser les conditions d'exploitation et le suivi de l'ouvrage. A partir de ces données, il est notamment en mesure de comprendre le fonctionnement du captage, d'identifier des paramètres de suivi pertinents et de définir un ou plusieurs seuils d'alerte (niveau dynamique critique, débit maximal, etc.) au delà desquels continuer à exploiter aux mêmes conditions met en péril son ouvrage. Il lui est aussi plus facile de mettre en oeuvre un suivi adapté à chaque ouvrage en fonction de sa sensibilité au vieillissement.

Un suivi rigoureux des ouvrages de captage repose sur le suivi à la fois de l'état et de la performance du triptyque aquifère/ouvrage/système de pompage (Howsam, *et.al.* 1995). Les principaux paramètres de suivi de ce triptyque sont résumés dans le Tableau 1. Le suivi mis en place doit en effet permettre à l'exploitant de déterminer si une dérive constatée est plutôt liée à l'aquifère (par exemple, une baisse régionale de la nappe captée conséquence d'une diminution de la recharge naturelle ou d'une surexploitation), à la performance de l'ouvrage, l'indicateur principal étant dans ce cas souvent le débit spécifique, ou au système de pompage (pompe colmatée ou usée, colonne d'exhaure perforée) (Misstear, Banks, Clark, 2006). L'exploitant n'a généralement que peu d'emprise sur l'aquifère. Par contre, en agissant efficacement sur l'ouvrage, l'exploitant doit être en mesure de détecter à temps les problèmes potentiels (baisse de productivité, venues de turbidité, etc.) et d'en déterminer les causes.

La mise en place d'un suivi de qualité passe aussi par la définition de protocoles rigoureux permettant à l'exploitant de réaliser des mesures précises et fiables. Pour le suivi des niveaux par exemple, il faut s'assurer notamment que le repère de mesure de niveau d'eau est fixe et bien matérialisé sur l'ouvrage. Pour le suivi de la performance hydraulique des forages à l'aide du débit spécifique, il faut aussi s'assurer que les temps de pompage et de remontée avant la mesure des niveaux dynamiques et statiques soient constants. Ce point est essentiel car il permet de déterminer les débits spécifiques toujours dans les mêmes conditions et de pouvoir les comparer. Il est d'ailleurs souvent admis qu'une dérive de cet indicateur de plus de 15% par rapport à l'origine doit amener l'exploitant à engager un diagnostic de l'ouvrage (Driscoll, 1989). Enfin, dans le cas d'un suivi télégéré, il faut s'assurer que les sondes sont correctement installées et paramétrées pour fournir des mesures cohérentes et facilement analysables.

	Aquifère	**Ouvrage**	**Système de pompage**
Performance	Prélèvement/recharge Niveau piézométrique Relation rivière/nappe Qualité de l'eau	Débit de pompage Niveaux statique et dynamique Débit spécifique Qualité de l'eau	Débit de pompage Hauteur Manométrique Totale Consommation d'énergie
Etat	Prélèvement/recharge Niveau piézométrique Relation rivière/nappe Qualité de l'eau	Apparence des tubages/crépines Cimentation Massif filtrant	Apparence de la pompe Bruits et vibrations Apparence de la colonne de refoulement Compteur volumétrique

Tableau 1 : *Principaux paramètres de suivi de l'état et des performances liés à la ressource en eau souterraine (adapté de Howsam et al., 1995-*

Le suivi des paramètres quantitatifs doit être complété par la surveillance de la qualité physique de l'eau : couleur et odeur, turbidité et matières en suspension, conductivité. En effet des variations de ces paramètres sont aussi des indicateurs de défaillance. L'observation d'une dégradation de la qualité de l'eau est souvent, mais pas toujours, couplée à une dérive de productivité de l'ouvrage. Outre la surveillance des paramètres liés à l'ouvrage, l'exploitant doit aussi vérifier régulièrement l'état et les performances des dispositifs de pompage (consommation électrique, apparence visuelle des pompes et des colonnes d'exhaure). La défaillance d'une pompe est parfois à l'origine de problèmes rencontrés lors de l'exploitation (baisse de débit). Elle peut aussi être indicatrice d'une dégradation de l'ouvrage, dû par exemple à du colmatage. Enfin, suivant les prescriptions établies dans l'arrêté de DUP pour la protection des captages ou bien en fonction des dérives observées lors du suivi, l'exploitant s'attache à réaliser des inspections visuelles régulières de l'extérieur et de l'intérieur de son ouvrage via des examens caméra. Ces inspections télévisées sont d'ailleurs primordiale pour établir un diagnostic fiable de l'état de l'ouvrage puisqu'elles permettent très souvent d'expliquer l'origine des anomalies constatées lors du suivi : colmatage, corrosion, ensablement, etc.

La mise en place d'un suivi rigoureux permet à l'exploitant, non seulement d'identifier assez tôt les phénomènes annonciateurs d'une défaillance de l'ouvrage (baisse de productivité, apparition de turbidité, etc.), mais aussi de dresser un diagnostic de l'origine de cette défaillance. Il peut donc définir le traitement le plus adapté et l'appliquer avant que l'ouvrage ne se dégrade d'avantage. De par cette approche préventive, il assure la continuité de son exploitation, il évite des réparations couteuses voire l'abandon pur et simple de l'ouvrage, et il prolonge la vie de son ouvrage. Le bénéfice en terme économique est donc indéniable, mais au delà de cet aspect, cela permet à l'exploitant à la fois d'assurer le confort quotidien des populations qu'il alimente et de préserver la ressource en eau.

Suivi de la performance des forages à l'aide de la télégestion

Aujourd'hui, de plus en plus de captages sont équipés de dispositifs de télémétrie, ce qui facilite le suivi de l'exploitation, à condition bien sûr que les capteurs soient correctement placés dans l'ouvrage, bien paramétrés et contrôlés régulièrement. Cette évolution technologique offre l'opportunité de développer des outils de suivi et d'analyse performants. Veolia Eau a par exemple développé un outil informatique qui permet de réaliser des bilans d'exploitation de ses captages à partir des données issues de la télégestion. Cet outil donne la possibilité de suivre l'évolution des principaux paramètres d'exploitation (niveaux statiques et dynamiques, niveaux maxi et mini journaliers, rabattements, débits moyens et instantanées, débits spécifiques), des séquences de pompage (nombre de démarrages/arrêts, temps de pompage, volumes journaliers pompés) et de visualiser graphiquement les résultats. Pour contrôler la fiabilité des mesures, l'outil effectue aussi automatiquement un certain nombre de vérifications sur les données acquises : taux d'acquisition des données de niveau et d'index volumétriques, coefficient d'instabilité des niveaux statiques et dynamiques. L'utilisateur a la possibilité soit d'éliminer manuellement les valeurs qui lui semblent incohérentes ou peu fiables, soit de paramétrer son bilan pour que ces valeurs soient nettoyées automatiquement. La figure 1 présente un exemple de restitution mensuelle des paramètres de suivis calculés par l'outil.

Site : Forage F1 Mois de : février 2008

date		Nappe		Forage							Pompage	
		Mini jour	Maxi jour	Niveau Statique	Niveau dynamique	Rabattement	Débit moyen	Débit instantané	Débit spécifique sur Qm	Débit spécifique sur Qi	Durée phase pompage	Volume journalier
vendredi	01	-7,80	-5,72	-5,73	-7,58	1,85	141,61	144,00	76,59	77,88	18:19:36	2598
samedi	02	-7,85	-5,72	-5,75	-7,62	1,87	141,86	132,00	75,94	70,66	17:54:25	2173
dimanche	03	-7,59	-5,60	-5,60	-7,33	1,73	134,68	132,00	77,94	76,39	16:07:17	2445
lundi	04	-7,49	-5,56	-5,60	-7,40	1,80	138,68	132,00	77,09	73,37	17:31:02	2425
mardi	05	-7,59	-5,54	-5,57	-7,38	1,81	140,29	132,00	77,68	73,09	17:05:47	2411
mercredi	06	-7,69	-5,50	-5,50	-7,36	1,87	142,67	144,00	76,42	77,13	16:43:39	2173
jeudi	07	-7,61	-5,48	-5,49	-7,38	1,89	143,48	144,00	75,84	76,11	16:05:02	2487
vendredi	08	-7,54	-5,47	-5,51	-7,42	1,91	143,22	144,00	74,94	75,35	17:23:03	2200
samedi	09	-7,51	-5,35	-5,36	-6,94	1,58	133,58	120,00	84,81	76,19	15:23:10	2427
dimanche	10	-7,49	-5,35	-5,36	-7,22	1,86	141,47	144,00	76,23	77,59	16:53:33	2052
lundi	11	-7,41	-5,28	-5,33	-7,19	1,87	142,28	144,00	76,21	77,13	14:50:22	2170
mardi	12	-7,37	-5,27	-5,31	-7,19	1,87	141,67	144,00	75,64	76,88	15:37:27	2364
mercredi	13		-5,38	-5,38	-7,23	1,85	141,61	144,00	76,55	77,84	18:20:28	2575
jeudi	14	-7,48	-5,39	-5,39	-7,20	1,81	139,53	144,00	77,01	79,47	17:12:30	2364
vendredi	15	-7,41	-5,41	-5,41	-7,26	1,86	140,16	144,00	75,52	77,59	16:25:59	2336
samedi	16	-7,45	-5,42	-5,43	-7,30	1,88	139,33	144,00	74,31	76,80	16:05:59	2120
dimanche	17	-7,44	-5,37	-5,39	-7,24	1,85	139,53	144,00	75,30	77,71	15:07:13	1901
lundi	18	-7,37	-5,35	-5,35	-7,18	1,82	138,56	144,00	76,09	79,08	15:38:38	2429
mardi	19	-7,41	-5,42	-5,42	-7,22	1,80	137,76	132,00	76,36	73,17	16:55:51	2388
mercredi	20	-7,52	-5,48	-5,50	-7,44	1,95	143,24	144,00	73,64	74,04	17:04:54	2421
jeudi	21	-7,62	-5,49	-5,55	-7,48	1,93	142,69	144,00	73,89	74,57	15:53:14	2255
vendredi	22	-7,64		-5,62	-7,53	1,91	141,75	144,00	74,41	75,59	17:56:23	2524
samedi	23	-7,73	-5,61	-5,65	-7,52	1,88	141,58	132,00	75,43	70,32	16:51:02	2141
dimanche	24	-7,67	-5,54	-5,56	-7,49	1,93	141,29	144,00	73,36	74,77	14:39:31	2129
lundi	25	-7,60	-5,60	-5,61	-7,48	1,87	138,86	144,00	74,25	77,01	16:46:16	2453
mardi	26	-7,66	-5,56	-5,61	-7,45	1,84	139,71	132,00	75,80	71,62	15:37:15	2039
mercredi	27	-7,64	-5,65	-5,67	-7,54	1,87	139,25	144,00	74,39	76,92	18:15:14	2601
jeudi	28	-7,77	-5,73	-5,76	-7,64	1,88	138,91	132,00	73,89	70,21	18:32:26	2490
vendredi	29	-7,74	-5,70	-5,70	-7,57	1,86	139,05	144,00	74,64	77,29	17:10:21	2292
Mini		-7,85	-5,73	-5,76	-7,64	1,58		120,00		70,21	14:39:31	1901
Moy		-7,57	-5,50	-5,52	-7,37	1,85		139,86		75,58	16:42:20	2326
maxi		-7,37	-5,27	-5,31	-6,94	1,95		144,00		79,47	18:32:26	2601
Total											484:27:37	67449

Paramètres / Bilan mensuel / **Synthèse mensuelle** / Courbes mensuelles / Bilan journalier / Courbe Niv-por

Figure 1 : *Synthèse mensuelle du bilan de suivi des performances de l'ouvrage*

Les données obtenues sont ensuite consolidées dans une synthèse pluriannuelle dont la fréquence de mise à jour est choisie par l'utilisateur. Cette synthèse peut contenir toutes les données disponibles depuis l'origine de l'ouvrage, y compris les résultats des pompages d'essai et du suivi manuel avec notamment la possibilité d'ajouter les données manuelles antérieures à la mise en place de la télégestion. Elle permet l'analyse graphique de l'évolution du comportement de l'ouvrage dans le temps et la comparaison avec son état d'origine. Par le paramétrage préalable de l'ouvrage (niveau critique, profondeur de la crépine, débit maximal autorisé, etc.), elle permet également de mettre en évidence les dépassements de seuils, lui conférant ainsi un avantage indéniable dans la surveillance du comportement de l'ouvrage et le déclenchement anticipé d'un diagnostic en cas de défaillance de celui-ci. La figure 2 présente un exemple de restitution graphique de suivi des paramètres de niveau et de débit spécifique où sont matérialisés des seuils de référence (niveau dynamique maximal admissible, sommet de crépine).

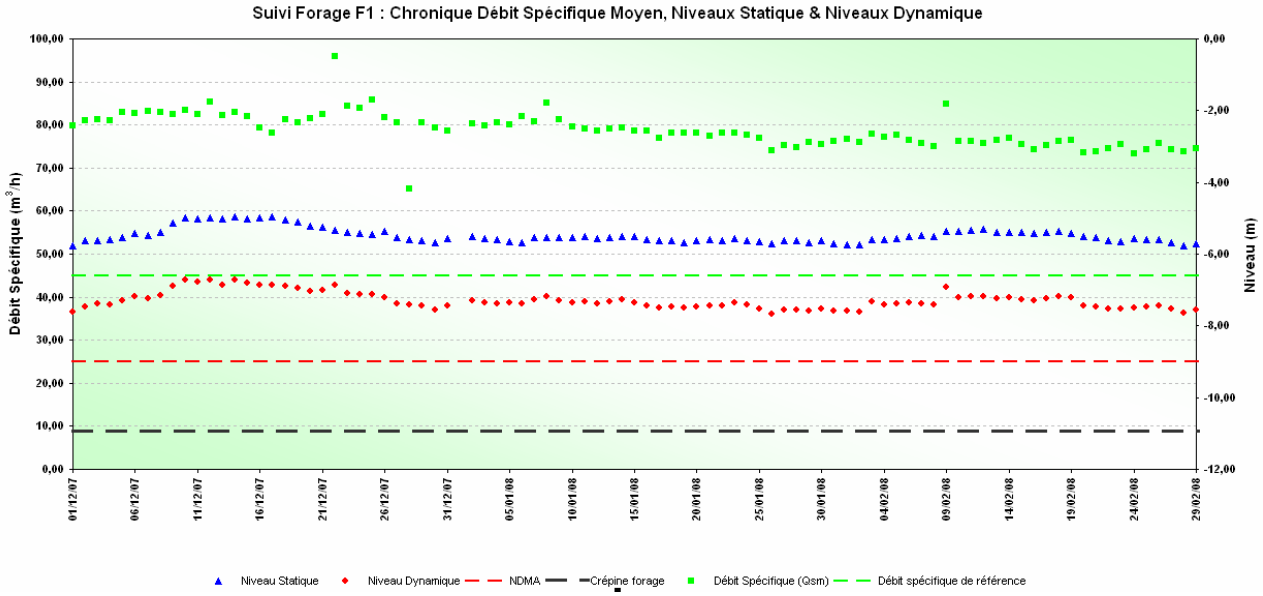


Figure 2 : *Chronique de suivi des performances de l'ouvrage*

La figure 3 illustre le comportement de l'ouvrage dans le temps par l'analyse de l'évolution des points de mesure débit/rabattement par rapport aux courbes caractéristiques établies à l'issue des différents pompages d'essai.

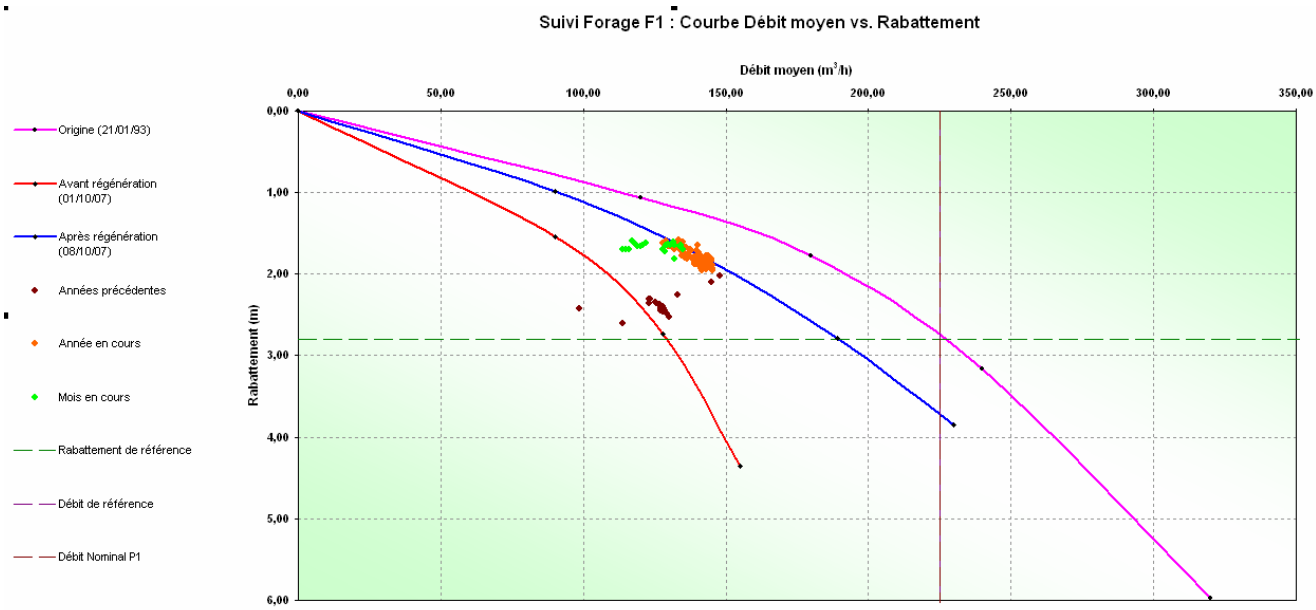


Figure 3 : *Evolution de la productivité de l'ouvrage par rapport aux courbes caractéristiques*

Pour l'exploitant cet outil permet de faciliter les prises de décision en vue d'optimiser la gestion des ouvrages et permet de fournir à son client des informations précises sur l'évolution de l'état des infrastructures exploitées, notamment dans la cadre du Rapport Annuel du Délégataire.

Conclusions

L'exploitation durable des captages d'eau souterraine est devenue un enjeu majeur dans la volonté de protéger la ressource en eau. Dans ce contexte, l'exploitant a un rôle important à jouer puisqu'il maîtrise la chaîne de production de l'eau potable, et les ouvrages permettant d'extraire la ressource du milieu naturel en sont un des éléments fondamentaux. Il n'est pas un simple « producteur » d'eau, il est un aussi acteur de la gestion patrimoniale de la ressource et à ce titre, il se doit d'être en pointe sur tous les sujets qui touchent à l'amélioration de la surveillance et de l'entretien des captages. La qualité du suivi qu'il met en place, sa capacité à analyser l'évolution de l'exploitation et à anticiper les défaillances de ses ouvrages pour apporter à temps les remèdes adaptés, sont les éléments déterminants pour la préservation de la ressource. D'autant plus qu'avec l'évolution des techniques de suivi automatisé et de télétransmission, il dispose d'outils de plus en plus performants et précis pour surveiller les captages.

La manière de gérer les captages d'eau souterraine a des conséquences bien au-delà de l'ouvrage lui-même. En effet, la gestion durable des captages permet : d'éviter des ruptures d'exploitation et des réparations couteuses voire même le remplacement de l'ouvrage, de limiter au maximum les risques de contamination et de surexploitation de la ressource, et donc finalement de faire faire des économies substantielles à la communauté. Parallèlement au développement d'outils performants pour assurer un suivi rigoureux des ouvrages de captages, Veolia Eau effectue aussi des recherches de solutions innovantes en matière de prévention des phénomènes de colmatage et de régénération des ouvrages vieillissants, qui s'inscrivent pleinement dans une démarche d'exploitation durable des ouvrages de captage d'eau souterraine.

Références bibliographiques

AFNOR (2007), Réalisation, suivi et abandon d'ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraine réalisés par des forages, NF X 10-999

Agences de l'Eau (1994) Guide pratique pour le contrôle et l'entretien des captages d'eau souterraine. Etude inter-agences n°32

Driscoll FG (1989) Groundwater and wells. Johnson Filtration Systems

Gilli E, Mangan C, Mudry J (2004) Hydrogéologie : Objets, méthodes, applications. 2ème cycle/Master, CAPES , Agrégation. Dunod

Howsam P, Misstear B, Jones C (1995) Monitoring, maintenance and rehabilitation of water supply boreholes. CIRIA report 137

Lallemand-Barrès A, Roux JC (1999) Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Editions BRGM

BRGM (2004) Guide d'application de l'arrêté ministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau, Ministère de l'écologie et du développement durable

Misstear B, Banks D, Clark L (2006) Water wells and boreholes. Wiley

Gestion des ouvrages de production d'eau potable

Ce texte est un résumé.
Pour en savoir plus, visionner la vidéo de la conférence sur le DVD joint ou sur www.ahsp.fr.
Le comité de rédaction des actes

Bernard DROZ [1], Joël SILLARD [1]

[1] SADE Forages d'eau, 4, rue Gambetta, 59350 Saint André lez Lille

Depuis longtemps, les eaux souterraines ont été préférées aux eaux de surface, très vulnérables aux pollutions, de température variable, et soumises aux variations sévères climatiques (sécheresses et crues). De ce fait, on a pendant longtemps souvent considéré un forage ou un puits comme un ouvrage immuable, capable de fournir un même débit sans connaître de perturbation notable.

Malheureusement, l'exploitation d'un ouvrage d'eau potable peut parfois connaître de graves mésaventures, qui génèrent des situations de crise lorsque l'eau n'arrive plus au robinet ou lorsque la qualité de l'eau se dégrade.

On se trouve alors souvent désarmé et on a du mal à gérer cette crise, parce que l'on ne s'est pas rendu compte que l'ouvrage pouvait évoluer depuis sa création et mal vieillir, avec des degrés de souffrance parfois importants.

Le vieillissement d'un ouvrage captant les eaux souterraines est un phénomène naturel et inéluctable, avec des pathologies diverses qui peuvent de temps en temps accentuer son vieillissement et entraîner irrémédiablement sa perte.

C'est pourquoi il importe de suivre son évolution depuis sa création pour observer la manière dont il réagit avec le temps, sur le plan hydrodynamique et hydrochimique, et au niveau même de sa structure.

La création de 5 fiches de vie associées à un diagnostic permettra de mieux connaître son fonctionnement ou de mieux comprendre son dysfonctionnement.

On établira ainsi la carte d'identité de l'ouvrage permettant d'avoir une connaissance de l'état zéro (fiche 1), puis on définira les consignes d'exploitation qui ont été mises en place à sa création (fiche 2). On remettra au goût du jour l'ensemble des aspects administratifs nécessaires à la protection de l'ouvrage et on décrira le système d'exploitation de l'ouvrage (fiche 3). Un regard sur son évolution permettra de différencier, s'ils existent, les entretiens préventifs et les entretiens curatifs qui ont eu lieu au cours de la vie du forage (fiche 4). La liste des documents ayant servi à l'établissement des fiches de vie sera inscrite dans la fiche 5.

Le diagnostic proprement dit de l'ouvrage s'appuiera sur les fiches de vie pour définir l'état de santé de l'ouvrage et analyser les causes pouvant affecter la ressource et l'ouvrage, afin de proposer une amélioration de l'exploitation de l'ouvrage.

Une réflexion sera ensuite menée sur l'avenir de l'ouvrage, s'il peut être poursuivi sans contraintes, ou sous réserve de mesures à prendre, pouvant aller jusqu' à être problématique ou fortement compromis.

Ce n'est que par ce type de démarches que l'on arrivera à assurer une gestion optimale du couple "nappe-forage" afin d'arriver à conjuguer les possibilités d'une ressource et les besoins en eau des populations.

La gestion patrimoniale des forages d'eau potable

Ce texte est un résumé.
Pour en savoir plus, visionner la vidéo de la conférence sur le DVD joint ou sur www.ahsp.fr.
Le comité de rédaction des actes

Renaud FRANCOMME [1], Michel FARGEOT [1]

[1] Lyonnaise des Eaux Suez, 91, rue Paulin, BP 90185, 33000 Bordeaux

Le Centre Bordeaux Aquitaine (Lyonnaise des Eaux Suez) exploite un parc d'une centaine de forages d'eau potable dans le cadre d'un contrat de concession pour l'alimentation en eau potable de la Communauté Urbaine de Bordeaux.

Ce parc d'ouvrages a une moyenne d'age de 41 ans, le plus vieux a 72 ans. Dans le cadre d'une gestion optimisée des ouvrages et de la ressource nous avons développé une méthodologie visant à pérenniser le patrimoine délégué.

La gestion patrimoniale repose sur :

- Le développement d'outils permettant le monitoring en continu des ouvrages ;
- L'acquisition en mode industriel des informations structurelles et hydrodynamiques par le biais de diagnostics complets et de tests de pompage ;
- Le développement d'un outil d'analyse de risque sur la base de l'ensemble des informations acquises ;
- La mise en œuvre et l'encouragement au développement de techniques novatrices pour la réhabilitation des ouvrages.

Les outils de monitoring en continu.

- Producti'veille :

Nous avons développé un module d'analyse des données (niveau, débit) transmises en continu. Cela permet de calculer de manière reproductible le débit spécifique de chaque forage au cours du temps. Les résultats sont disponibles par intranet. Ce suivi permet de détecter les variations de performances hydrodynamiques dès leur apparition mais aussi de suivre l'efficacité dans le temps des actions mises en œuvre.

- Spiro'veille :

Basé sur le même principe que Producti'veille ce module permet de suivre l'efficacité hydraulique des pompes au cours du temps. Cette méthode permet de maîtriser et optimiser le wh/m³ des installations et d'anticiper le renouvellement des pompes avant leur rupture.

- Quantiprod :

En collaboration avec l'institut EGID Université Bordeaux 3, nous avons développé une méthode interprétative des tests de pompage qui permet de déterminer la part des causes endogènes (colmatage) et exogènes (baisse de pression de l'aquifère) au forage dans la baisse de productivité.

Les résultats issus de cette méthode permettent de déterminer le programme d'intervention uniquement sur les ouvrages qui le nécessitent.

En complément de ce suivi en continu, nous réalisons un suivi hydrodynamique et structurel plus détaillé.

- Test de pompage :

Nous sommes équipés (capteurs, centrale d'acquisition, traitement de données) et autonomes pour réaliser de façon industrielle les tests de pompage selon les règles de l'art. Cela nous permet de réaliser en moyenne 10 à 12 tests complets par an.

- Diagnostics complets :

Afin de déterminer l'état structurel des ouvrages mais aussi de disposer de l'ensemble des informations nécessaires en cas de travaux, nous réalisons 10 diagnostics complets (hydrodynamique, diagraphie, dimensionnel, visuel) par an soit 10 % du parc.

- Traitement des données :

L'ensemble des informations de la vie du forage est stocké dans une base de données Lyonnaise des Eaux et un module de traitement permet d'affecter un facteur de risque à chaque paramètre. Cela permet de déterminer les priorités d'interventions selon les thématiques choisies mais aussi de prévoir le programme d'interventions des années futures.

Cette connaissance du parc géré et l'objectif de pérenniser le patrimoine confié permettent de favoriser auprès des entreprises du secteur le développement de techniques nouvelles de réhabilitation telles que le chemisage par sertissage sur de grandes longueurs, la cimentation par valve entre packers, les décolmatages ciblés.

Les méthodes d'investigation

Investigations de diagnostic dans les forages : trop ou pas assez (ou les meilleures) ?
par Claude ARMAND (ANTEA) 81

L'intérêt des diagraphies de mesures de vitesse du fluide en forage d'eau
par Guy FAURE (IDEES EAUX) 83

Identification des variations endogènes/exogènes de productivité d'un puits au sein d'un parc d'ouvrages d'exploitation
par Alain DUPUY (Institut EGID Bordeaux 3) 85

Programme de diagnostic des forages AEP du département de la Mayenne
par Alexis ROBERT (Conseil général de la Mayenne) 91

Sonde de mesure de corrosion par procédé électromagnétique
par Michel SEGUIN (HYDROINVEST) 103

Technologies d'investigation avancées pour une gestion active des aquifères
par Angeline KNEPPERS (SCHLUMBERGER WATER SERVICES) 107

Investigations de diagnostic dans les forages : trop ou pas assez (ou de meilleures)?

Claude ARMAND [1], Muriel LAJARTHE [2]

1 ANTEA, 13 avenue Léonard de Vinci, 33600 PESSAC, France, email : c.armand@antea-ingenierie.fr
2 SEMM LOGGING, Les Maufras, 18360 VESDUN, France, email : lajarthe@semmlogging.com

Résumé
La pérennité, la productivité des captages et le maintien de la qualité de l'eau produite sont des préoccupations permanentes des Maîtres d'Ouvrage, Exploitants et Services de l'Etat chargés du contrôle de l'eau de consommation humaine. L'évolution réglementaire impose une maintenance préventive des forages exploités pour l'eau potable.
Comment optimiser ces diagnostics représentant une dépense importante pour les collectivités ?
L'association des compétences de sociétés spécialisées mais indépendantes entre elles et non liées à des travaux, fournitures ou prestations en aval constitue la solution :

- Le bureau d'études hydrogéologiques déterminera le programme « conceptuel » le plus adapté à l'hydrogéologie locale.
- L'entreprise de diagraphies proposera un programme adapté, optimisé économiquement, et pouvant faire appel à des techniques novatrices.

L'interprétation des mesures en commun, avec correction des données et indication des limites des différentes méthodes, débouchera sur un diagnostic objectif et argumenté.

Contexte

Les Maîtres d'Ouvrage de forages d'eau potable, les Exploitants et les Services de l'Etat chargés du contrôle de la qualité de l'eau de consommation humaine se posent tous les mêmes questions, et en particulier :

- Quel est l'état actuel de mon forage, et quelle va être sa tenue dans le temps (pérennité) ?
- Mon forage est-il vulnérable aux contaminations de toutes sortes (qualité) ?
- Quelle est la productivité de mon ouvrage, comment va-elle évoluer (productivité) ?

En outre, depuis 2003 la législation impose une périodicité de 10 ans au plus pour les contrôles des forages exploités pour l'eau potable.

Comment identifier la corrosion, voire le percement d'une chambre de pompage, la présence de dépôts colmatants, l'origine de matières en suspension observées dans l'eau d'exhaure, les infiltrations soupçonnées d'eaux superficielles parasites à l'extrados des tubages par défaut de cimentation ?

Intérêt des techniques d'investigation par diagraphies et limites

Les techniques d'investigations par diagraphies sont nombreuses, très variées, et potentiellement très coûteuses pour la collectivité. S'y ajoute le coût du retrait et de la remise en place de la pompe d'exploitation, qui représente souvent la part majoritaire de la dépense de diagnostic. Or, en fonction des caractéristiques des forages (diamètre, profondeur, configuration des tubages etc…) les diagraphies traditionnelles ne sont pas toujours utiles, voire réalisables. Il est donc indispensable de se poser les questions suivantes :

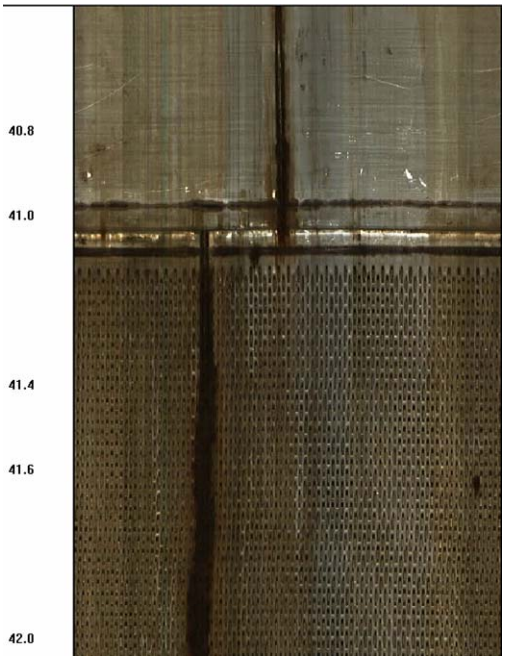
- Les méthodes d'investigation traditionnelles présentent elles toutes un intérêt dans le cas de mon forage ? (utilité)

Par exemple : Cela présente-t-il réellement un intérêt de réaliser des mesures d'inclinaison systématiquement dans des forages très peu profonds ? Ou encore, cela présente-t-il un intérêt de réaliser un contrôle de cimentation dans le cas de forages re-chemisés ?

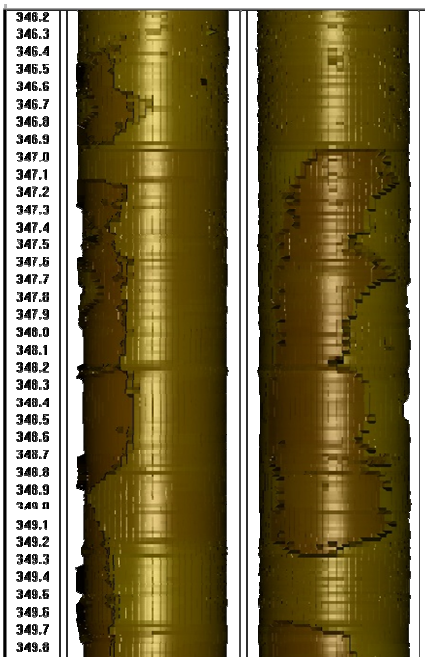
- Ces méthodes sont elles toutes réalisables dans le cas de mon forage ? (faisabilité)
- Existe il une solution dans le cas d'une diagraphie utile mais non réalisable dans le cas de mon forage ? (alternative)

Par exemple, les contrôles de cimentation traditionnels par méthode acoustique (CBL) ne s'effectuent qu'en eau. Par conséquent, ces derniers ne sont jamais réalisés dans la partie haute des forages, constituant pourtant la partie la plus vulnérable vis-à-vis des contaminations de surface. Or des techniques moins connues telles que les diagraphies nucléaires de type « ***Gamma-Gamma*** » permettent la mise en oeuvre de contrôles de cimentation efficaces, même au dessus du niveau statique. Autre exemple : Les mesures de débit s'effectuent traditionnellement avec des outils de type « Micromoulinet ». Or le seuil de déclanchement de l'hélice de l'outil constitue une limite pour la mesure de faibles débits. Là encore, des techniques avancées telles que les diagraphies de type « ***Heat Pulse*** » permettent la mesure de très faibles débits.

A noter, par ailleurs, que bon nombre de techniques de diagraphies habituellement appliquées en géotechnique peuvent être avantageusement appliquées à des problématiques hydrogéologiques. Citons par exemple, les techniques de type « ***diamétreur acoustique*** » qui permettent de mettre en évidence de manière très fine, les reliefs (positifs ou négatifs) affectant un tubage. Ou encore, les techniques « ***d'imagerie de paroi*** » qui permettent d'obtenir une image déroulée et cotée du puits investigué.



Détail (2m) d'une imagerie de paroi réalisée sur un forage d'eau



Extrait d'un diamétreur acoustique réalisé sur un forage d'eau

Association de compétences

Pour maîtriser le coût des diagnostics il est donc essentiel d'optimiser le programme d'investigation en choisissant les bons outils (traditionnels ou spécifiques) en fonction d'un contexte donné (caractéristiques du forage, contexte hydrogéologique local, problématique particulière etc…).

Ce choix ne peut se faire qu'en associant les compétences d'un bureau d'hydrogéologie et d'une société de diagraphies, spécialisées, qualifiées et de compétences nationales.

- **le bureau d'étude d'hydrogéologie**, indépendant des entreprises de travaux en aval, dispose de l'expérience hydrogéologique locale, de la mémoire des ouvrages de captage et du contexte d'évolution des nappes, et de la permanence relationnelle avec la collectivité. Il définit le programme « conceptuel » de diagraphies opportun en tenant compte à la fois de la problématique rencontrée mais aussi de l'optimisation économique de la prestation.
- **l'entreprise spécialisée en diagraphies**, elle aussi indépendante des entreprises de travaux en aval et du bureau d'études hydrogéologiques, est équipée de l'ensemble de la gamme du matériel disponible sur le marché. Elle est en mesure de proposer le matériel d'investigation le plus adapté, d'interpréter les mesures avec toute la technicité nécessaire, en prenant en compte les corrections à apporter aux données, et en dialogue permanent avec l'hydrogéologue chargé de la rédaction du rapport.

La complémentarité de ces deux entités qualifiées et indépendantes est le gage d'un programme adapté, optimisé, et d'un diagnostic objectif.

L'intérêt des diagraphies de mesure de vitesse du fluide en forage d'eau

Ce texte est un résumé.
Pour en savoir plus, visionner la vidéo de la conférence sur le DVD joint ou sur www.ahsp.fr.
Le comité de rédaction des actes

Guy FAURE

IDEES EAUX, 20 rue Paul GAUGUIN, 39170 SAINT LUPICIN, g.faure@ideeseaux.com

Il existe tout un panel de diagraphies hydrogéologiques utilisables par les maîtres d'ouvrages et qui sont principalement :

- les mesures de température et conductivité ;
- les mesures par des sondes géochimiques ;
- les diagraphies de flux (micromoulinet).

La dernière revêt une importance particulière car c'est la seule qui permet de quantifier la productivité totale de l'ouvrage de manière directe en identifiant et en cumulant les productivités de chaque venue.

La mise en œuvre est contraignante car elle dépend de la sensibilité de l'hélice de la sonde, elle oblige donc l'opérateur à installer un dispositif de pompage dont le débit doit être proportionnel au diamètre de l'ouvrage pour provoquer des vitesses du fluide supérieures à la sensibilité de l'hélice.

La mise en œuvre d'un tel dispositif peut générer des complications dans le mode d'exploitation de l'ouvrage (avec le plus souvent l'obligation du retrait de la pompe immergée en place), occasionnant ainsi un surcoût, ensemble d'éléments susceptibles quelquefois de freiner le maître d'ouvrage dans cette démarche.

Toutefois depuis 10 ans que nous réalisons ce type de mesures, nous avons pu acquérir un grand nombre de connaissances sur les ouvrages inspectés mais aussi, et c'est le but de cette communication, améliorer les connaissances sur la circulation des eaux au sein d'un aquifère considéré comme étant isotrope et unique.

A partir de plusieurs exemples le diaporama présenté illustre ce propos ce qui permet de tirer certaines conclusions directement utilisables par les maîtres d'œuvre.

Identification des variations endogènes/exogènes de productivité d'un puits au sein d'un parc d'ouvrages d'exploitation

LARROQUE François [1], DUPUY Alain [1], FRANCESCHI Michel [1], FRANCOMME Renaud [2]

1 EA GHYMAC n° 4321 Université de Bordeaux, Institut EGID allée Daguin 33607 Pessac
2 Lyonnaise des Eaux – Centre des Moyens Techniques de Bordeaux

Résumé
Les diminutions de productivité peuvent être liées à des causes endogènes à l'ouvrage (colmatage de la crépine, problèmes de corrosion,...) mais également à des causes exogènes, liées généralement aux conditions de gisement de la nappe et aux pressions anthropiques (évolution des propriétés hydrodynamiques, baisse régionale de la piézométrie,...). Un ensemble d'outils basé sur des données d'exploitation disponibles pour des ouvrages de production et enregistrées en routine est adapté et testé pour identifier les parts relatives des différents phénomènes. L'objectif est d'isoler les ouvrages dont la baisse de productivité relève de problématiques locales pouvant être traitées à l'échelle de l'ouvrage, d'ouvrages dont les variations sont inhérentes à des problématiques de gestion régionale. Les résultats obtenus sur le site sont concluants. Toutefois la pleine exploitation des résultats issus de cette approche reste assujettie à une connaissance précise de l'ouvrage et de son contexte d'exploitation.

1. Introduction

Les ouvrages d'exploitation en nappe et particulièrement en nappe captive présentent généralement une diminution de leur productivité au cours du temps, se traduisant par de plus forts rabattement pour un débit de pompage inchangé (Driscoll, 1986). Ce phénomène se traduit immédiatement par un fort impact économique pour l'exploitant. Cette diminution de productivité peut avoir de multiples causes, liées à l'ouvrage même, sa proche périphérie ou encore des causes liées à l'évolution globale des conditions de gisement de la ressource considérée. L'identification des causes endogènes (propres au puits) ou exogènes (inhérentes à l'exploitation régionale de la nappe) pour la gestion d'un ouvrage est primordiale pour une gestion efficace du puits et/ou du champ captant.

Procéder à l'estimation des parts relatives de chaque phénomène ne peut être envisagé qu'à partir d'une batterie de test incluant des essais de pompages, des tests de diagraphies, des analyses physico-chimiques et un examen vidéo des installations de pompage. L'ensemble de ces examens est coûteux en temps et en moyens. En outre, ces examens ne permettent que de rendre compte d'un état général au temps de l'examen. La mise en oeuvre d'une politique de gestion à long terme à partir de ces outils reste donc assujettie à de lourds investissements, puisque nécessitant régulièrement des contrôles de vérification. Pourtant, le couplage de ces informations ponctuelles nécessaires avec les données classiques d'exploitation devrait pouvoir permettre de mieux appréhender le vieillissement des ouvrages d'exploitation et anticiper ainsi certaines opérations de maintenance.

Cet article présente certains des outils de traitement développés et appliqués dans un cadre méthodologique plus large afin de mieux caractériser le vieillissement des puits et la perte de productivité généralement associée. Un des points important est d'estimer si la baisse de productivité est liée à l'évolution tendancielle de la nappe exploitée ou si le phénomène est induit par une variation des propriétés hydrauliques de l'ouvrage et de son proche environnement.

2. Approche méthodologique globale

Le développement de la méthodologie d'étude s'est appuyée sur les données disponibles sur le champs captant fournissant une part de des volumes d'eau nécessaires à l'alimentation en eau potable de la Communauté Urbaine de Bordeaux. Cet ensemble de puits (42) capte la nappe captive de l'Oligocène, en rive gauche de Garonne (figure 1). L'ensemble des données historiques et d'exploitation a été fourni par le Centre de Moyens Techniques de Bordeaux de la Lyonnaise des eaux. Ces données, correspondant généralement aux données types disponibles pour les champs captant, sont constituées par:

- les coupes techniques et géologiques de l'ouvrage;
- les diagnostics de forage;
- les interprétations d'essais de pompage à différentes dates;
- les analyses physico-chimiques;
- les chroniques d'exploitation de l'ouvrage (débits, rabattement) à des pas de temps variables selon les ouvrages.

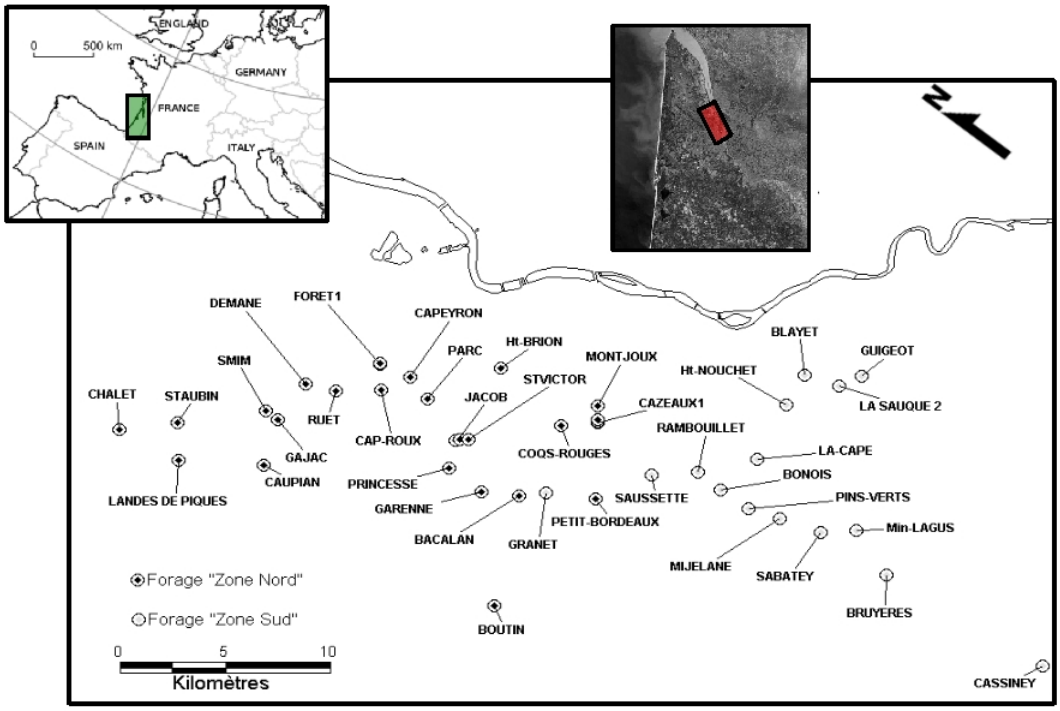


Figure 1: *contexte géographique et ouvrages d'exploitation retenus*

A partir de cet ensemble de données, un cadre méthodologique global a été développé afin de préciser et quantifier le cas échéant les phénomènes qui peuvent entraîner une diminution de productivité des ouvrages d'exploitation au cours de leur exploitation. Compte tenu de la complexité de ces phénomènes et des interactions possibles, plusieurs axes d'étude ont été retenus:

- étude hydrogéologique régionale et comportement hydrodynamique de la nappe captée;
- analyse du comportement hydraulique des ouvrages;
- évolution temporelle du champ captant;
- approche physique et géochimique locale des processus de colmatage

Le but final est de faire converger ces méthodes vers le développement d'un ou plusieurs indicateurs normalisés permettant d'obtenir une typologie adaptée pour les variations de productivité des ouvrages d'exploitation. Cet indicateur, en cours de réalisation, pourrait permettre à terme à l'exploitant de mieux cerner les actions prioritaires à mettre en oeuvre, notamment celles directement liées à l'ouvrage (phénomène de détérioration physique) par rapport à celles nécessitant une gestion plus globale entre différents acteurs (abaissement général de la piézométrie).

3. Tests hydrauliques et chroniques d'exploitation

La détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère est classiquement réalisée à partir des interprétations des essais de pompage. L'obtention de ces paramètres permet de quantifier les fonctions transmissives et capacitives de la nappe. Toutefois, ces méthodes d'interprétation ne seront ici utilisées non pas pour décrire un état de la nappe au temps *t* mais une variation potentielle de ses propriétés au cours du temps. Dans le cas d'une forte chute de productivité, une signature pourrait être décelable dans l'évolution des paramètres hydrodynamiques.

Une réinterprétation systématique des essais de pompage disponibles a été menée, en utilisant les essais réalisés à la création de l'ouvrage et les derniers essais disponibles. En considérant les paramètres obtenus (transmissivité et coefficient d'emmagasinement) comme des indicateurs globaux du fonctionnement hydraulique du complexe puits/aquifère, la comparaison de ces paramètres à différentes dates est alors intéressante pour étudier l'évolution de la productivité de l'ouvrage. Cette comparaison entre deux périodes est obtenue par une simulation directe de courbes théoriques de rabattement à partir de la solution de Theis (Theis, 1935) pour les différents jeux de paramètres à un débit normalisé (figure 2).

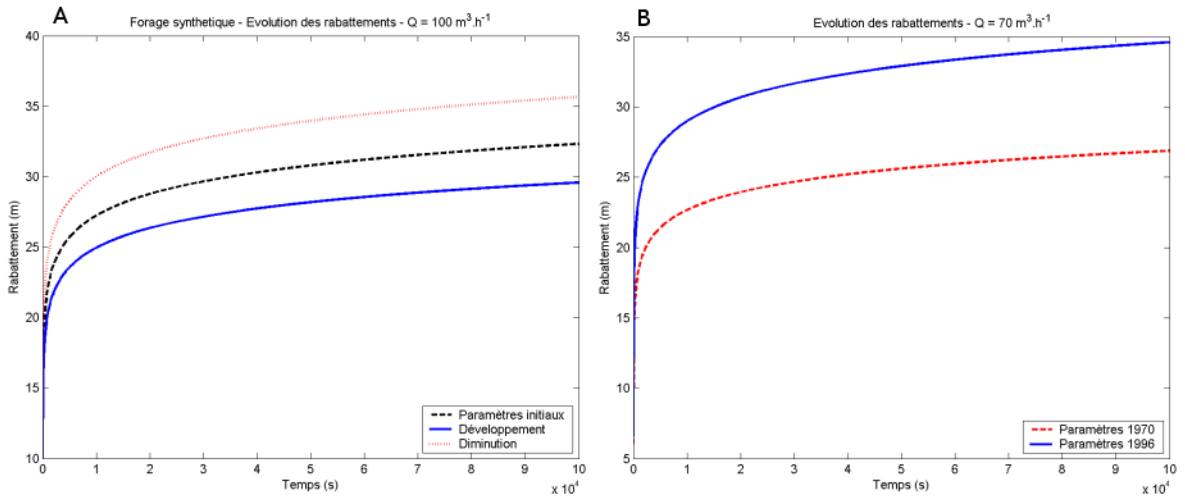


Figure 2: *rabattements transitoires pour un débit fixe pour des variations de paramètres hydrodynamiques équivalents.*

A modèle théorique pour un développement ou une détérioration de l'ouvrage

B application à un ouvrage réel indiquant un développement depuis sa création en 1970

Les séries temporelles haute résolution ont été utilisées pour discerner des évolutions dans le fonctionnement de l'ouvrage. Ce traitement a fait appel à des techniques de traitement du signal utilisées en hydrologie mais assez peu en hydrogéologie. Les chroniques initiales couvraient une période de trois ans, avec un pas d'échantillonnage de 6 minutes (débit, rabattement). Outre les techniques de ré-échantillonnage et de filtrage classiques, l'analyse par transformée en ondelettes continues et discontinues (Labat et al., 2005a, Labat et al., 2005b) a été retenue pour déceler les principales composantes structurant le signal de rabattement (figure 3).

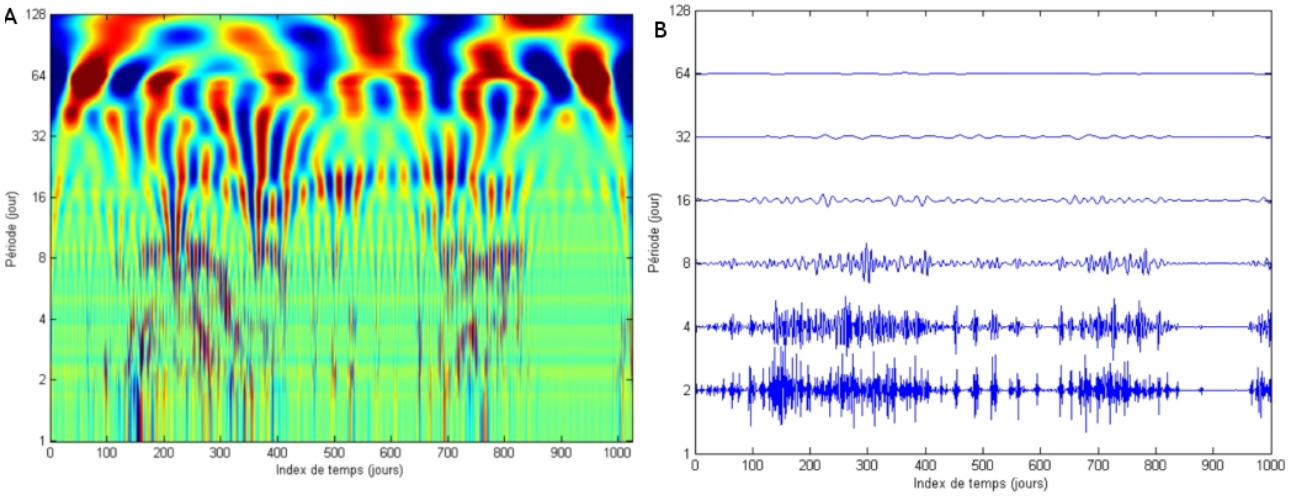


Figure 3: *transformées en ondelettes continues (A) et discontinues (B). Les composantes périodiques entre les index de temps 100 et 400 correspondent à la cyclicité d'exploitation de l'ouvrage sur la période considérée. Au delà d'une période de 8 jours, le signal n'est plus structuré et aucune composante basse fréquence n'est identifiable.*

Ce traitement permet une double analyse dans les domaines temporel et fréquentiel. Les composantes hautes fréquences peuvent être associées à des phénomènes liés à l'exploitation de l'ouvrage (courte période) alors que les basses fréquences sont généralement associées à des phénomènes de plus forte inertie tel que l'évolution générale de la piézométrie à long terme. Pour chaque ouvrage, les transformées en ondelettes ont été réalisées. D'une manière générale, seules les composantes de courte périodes, cycliques ou non sont visibles. Il n'a pas été possible sur les périodes étudiées d'isoler une tendance générale d'évolution de la piézométrie.

4. Modèle de comportement de l'ouvrage

Pour estimer l'impact du vieillissement sur les ouvrages de production, des modèles de comportement simplifiés capable de rendre compte de l'évolution générale des rabattements au cours du temps au forage considéré ont été développés. Ce type de modèle doit permettre, si il est correctement construit et validé, de mettre en évidence les comportements d'ouvrage qui s'écartent d'un comportement « normal », c'est-à-dire sans évolution de ses caractéristiques techniques propres. On peut envisager qu'il soit possible de repérer des phénomènes de variation à long terme de ceux accidentels ou à très court terme.

Les modèles ont été développés à partir de la solution de Cooper-Jacob (1946) en se basant sur le principe de superposition temporelle, en adoptant le formalisme analytique proposé par Birsoy et Summer (1980):

$$s_n = \frac{2.3Q_n}{4\pi T}\log\left[\left(\frac{2.25T}{r^2 S}\right)\beta_{t,(n)}(t-t_n)\right]$$

avec s_n rabattement au temps t, T transmissivité de l'aquifère, r distance du point d'observation, Q_n débit de pompage à la $n^{ième}$ période, et

$$\beta_{t,(n)} = \prod_{i=1}^{n-1}\left(\frac{t-t_i}{t-t'_i}\right)^{Q_i/Q_n}$$

avec t_i temps à partir duquel le $i^{ème}$ pompage débute, t-t_i temps depuis lequel le $i^{ème}$ pompage a débuté, t'_i temps à partir duquel le $i^{ème}$ pompage stoppe, t-t'_i temps depuis lequel le $i^{ème}$ pompage a stoppé, Q_i débit de pompage durant la $i^{ème}$ période.

Les modèles analytiques ont été développés au pas de temps annuel en intégrant les prélèvements moyens et une valeur moyenne de rabattement pour une période de simulation de 30 ans (figure 4).

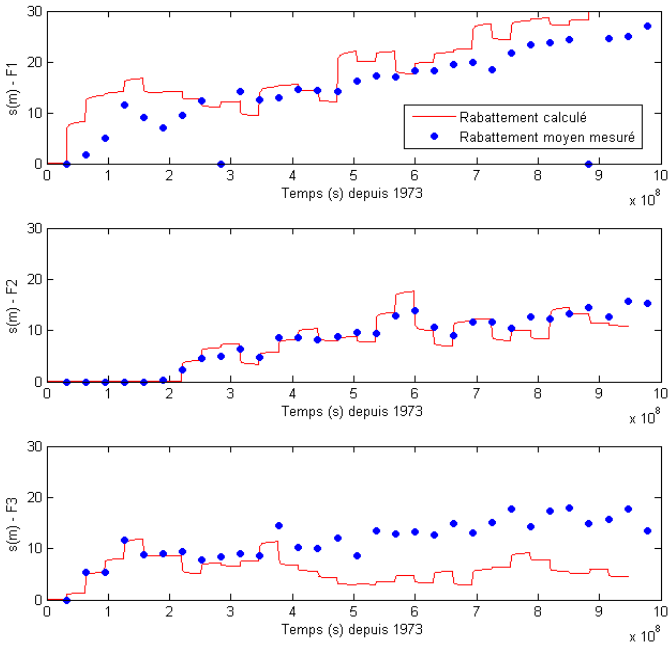


Figure 4: *simulation des rabattements pour 3 ouvrages sur 30 années d'exploitation.*

Les restitutions générales fonctionnent correctement. Les écarts observés au modèle (ex: F3 sur la figure 4) peuvent souligner un changement de comportement de l'ouvrage ou une modification de son environnement. La limite essentielle de cette approche concerne la spatialisation de la solution et la prise en compte des effets d'interférences avec les autres ouvrages. Une modélisation analytique distribuée pourrait constituer une solution mais la problématique du calage et de la validation de tels modèles reste entière.

5. Conclusion et perspectives

Le développement de ces outils associés à d'autres éléments a permis le développement d'une base de données formalisant l'ensemble des informations pour chaque ouvrage du champ captant. Les différentes méthodes appliquées à chaque ouvrage, en fonction des données disponibles et le croisement des différents résultats ont mené dans certains cas à l'identification de problématiques particulières (détérioration soudaine de l'ouvrage ou au contraire diminution progressive de la productivité). Parmi les développements, le géoréférencement de l'ensemble de ces indices devrait permettre d'identifier des groupements particuliers d'ouvrages présentant des caractéristiques communes d'évolution pour un paramètre donné (propriété de l'aquifère, dénoyage local,...) ou des phénomènes liés au schéma d'exploitation (problématique des interférences entre ouvrage). La spatialisation des données soulève toutefois le problème de l'hétérogénéité spatiale pour tout développement quantitatif. La prise en compte de la variabilité spatiale nécessite des données suffisantes et contraint généralement à travailler à une échelle qui n'est plus forcément compatible avec cette problématiques puits/aquifère.

En résumé, le traitement au cas par cas ou à l'échelle d'une partie d'un champ captant des problématiques liées au vieillissement des ouvrages et à la chute de productivité est possible. Le couplage de plusieurs outils de natures différentes dans un cadre méthodologique global, associé à une bonne connaissance des installations permet d'identifier des comportements particuliers et procure des indices sur la nature endogène/exogène de leurs origines. Toutefois, la généralisation semble difficile compte tenu des problématiques liées aux environnements propres de chaque ouvrage. Les approches présentées sont descriptives, à partir de volumes de données importants qui ne sont pas forcément disponibles pour tous les ouvrages d'exploitation. La piste de la modélisation distribuée (vision explicative/quantitative) ou d'un indicateur commun (vision explicative/qualitative) est une perspective, posant la question d'une gestion globale des ouvrages ou alors au cas par cas.

Références bibliographiques

Birsoy, Y. & Summers, K. 1980. Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data, Ground Water. *Ground Water* **18**: 137-146.

Cooper, H. H. & Jacob, C. E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field hystory. *Trans Amer Geophys Union* **3**: 526-534.

Driscoll, F. G. 1986. *Groundwater and wells*, Reynolds Guyar Designs.

Labat, D., Ronchai, J. & Guyot, J. L. 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. *Journal of Hydrology* **314**: 275--288.

Labat, D., Ronchail, J. & Guyot, J. L. 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part 2--Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability. *Journal of Hydrology* **314**: 289--311.

Theis, C. V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans Amer Geophys Union* **16**: 519-524.

Programme de diagnostic des forages d'alimentation en eau potable du département de la Mayenne

ROBERT Alexis[1], PIVETTE Bernard[2], DELPORTE Cyril[3]

1 Conseil général de la Mayenne, Hôtel du Département, 53000 LAVAL, France, alexis.robert@cg53.fr
2 PIVETTE Consultant, 16 rue du Lavoir, 53120 BRECÉ, France, pivette.consultant@wanadoo.fr
3 Conseil général du Lot, Avenue de l'Europe, 46000 CAHORS, France, cyril.delporte@cg46.fr

Résumé
Au début des années 2000, plusieurs forages AEP (Alimentation en Eau Potable) ont fait l'objet d'un diagnostic à la suite d'une importante baisse de productivité. Ces diagnostics ont mis en évidence un colmatage si prononcé que la réalisation d'un nouveau forage s'est avérée nécessaire occasionnant un surcoût important comparé à une opération de décolmatage.
Devant ce constat, le conseil général a mis en place un programme de diagnostic des forages. Ces diagnostics consistent en un essai de pompage par paliers afin de déterminer la courbe caractéristique de l'ouvrage et la comparer avec celle obtenue lors de l'essai de réception. Des conseils de suivi, d'entretien et d'exploitation sont formulés dans un compte rendu afin d'orienter l'exploitant dans son mode d'exploitation et dans sa programmation de maintenance de l'ouvrage. Cette opération a un but de sensibilisation et de formation des exploitants ; ils devraient ainsi être en mesure d'anticiper un éventuel colmatage.

I. Le contexte départemental

La Mayenne est un département rural comptant environ 300 000 habitants et 3 villes de plus de 10 000 habitants. Sa superficie est de 5 175 km².

I.1. Hydrogéologie

Le département de la Mayenne est presque exclusivement concerné par le socle armoricain représenté par des schistes et grès du Briovérien, des plutons granitiques et les faciès métamorphiques associés, des structures paléozoïques (en particulier le synclinorium de LAVAL) constituées majoritairement de schistes, de grès mais également de calcaires (cambriens et carbonifères) et des petits bassins ou recouvrements sablo-graveleux attribués au Pliocène.

De la fin des années 70 au début des années 90, le conseil général a entrepris d'importantes recherches en eau souterraine notamment pour approfondir les puits traditionnels sujets au tarissement lors des périodes prolongées de sécheresse. Ces programmes de recherche ont permis aux collectivités (communes et structures intercommunales) de se doter de forages leur garantissant une meilleure sécurité d'approvisionnement tout en assurant une diversification des ressources en eau potable à l'échelle départementale.

Trois types de forages peuvent être distingués :

- le premier exploitant la nappe phréatique souvent fortement contaminée par les nitrates (et dépourvue de fer et de manganèse),
- le second exploitant des niveaux aquifères captifs ou semi-captifs présentant une dénitrification naturelle fréquemment totale avec des teneurs en fer et manganèse parfois importantes (jusqu'à 10 mg/l de fer),
- le troisième captant des niveaux aquifères aux caractéristiques chimiques différentes.

Les deux derniers cas représentent des situations favorables au colmatage.

Il est important de préciser que dans les années 80, les pompages d'essai étaient souvent de 72 heures. Une aussi faible durée de pompage ne permettait pas de mettre en évidence des limites étanches, ou plutôt des diminutions latérales de perméabilité, classiquement rencontrées en domaine de socle. Ceci conduisait donc à des préconisations d'exploitation largement supérieures aux potentialités réelles de la nappe et à un risque de colmatage des ouvrages.

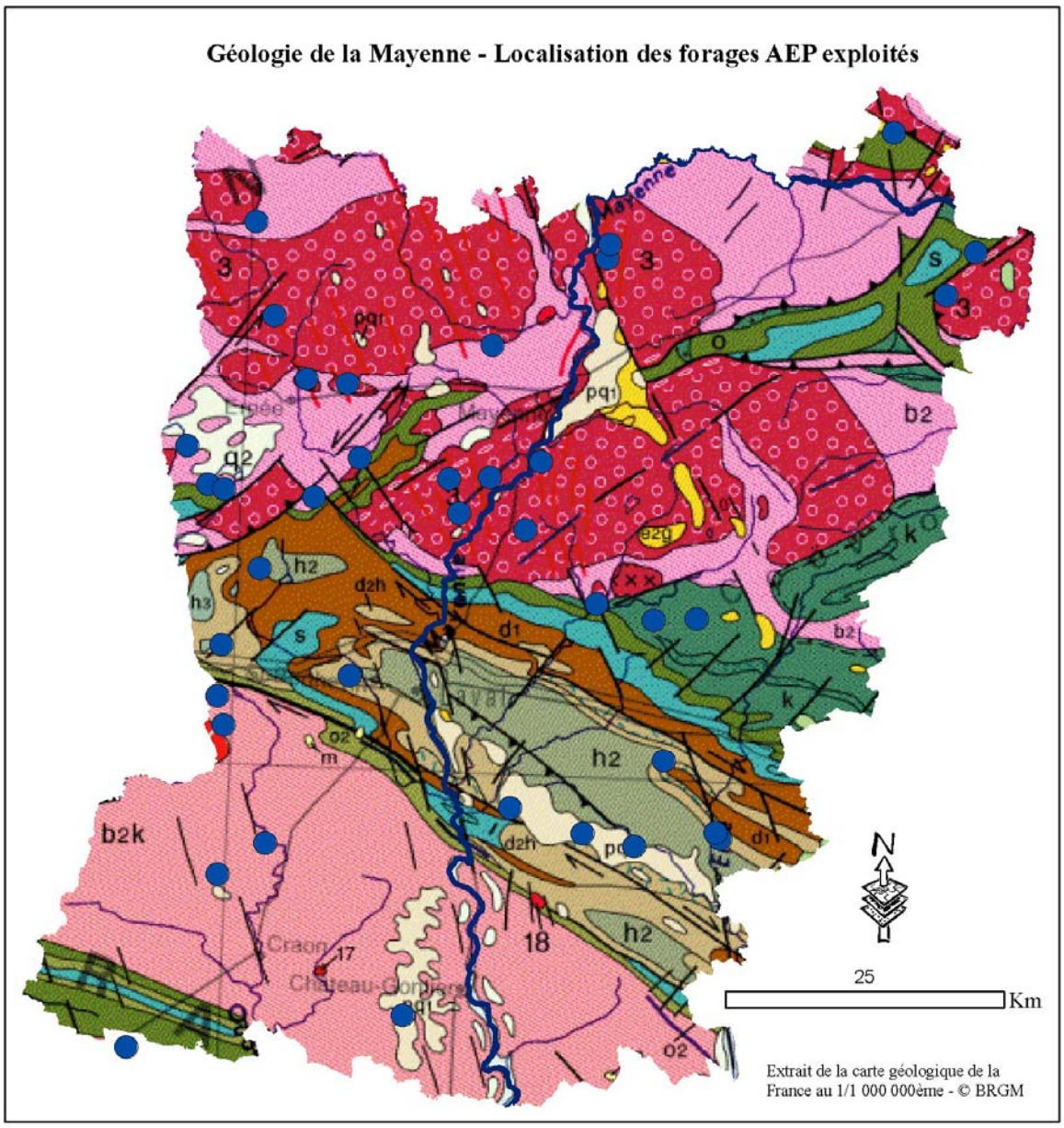


Figure 1 *: Carte géologique*

I.2. La dimension stratégique des captages d'eau souterraine

Aujourd'hui, les eaux souterraines représentent environ 40% des volumes d'eau potable (soit environ 11 Mm³/an) et sont exploitées à partir de 73 captages dont 43 forages dans tous les contextes géologiques (et à peu près autant de puits, certains captages étant constitués de plusieurs ouvrages). Le forage le plus ancien date de 1968, leur âge moyen est de 18 ans (1990), leur profondeur moyenne est de 50 m environ (variant de 17 à 180 m).

Les volumes d'eau potable issus des eaux superficielles (60 % des volumes) sont en grande partie (à 85 % environ) pompés dans la rivière Mayenne au niveau de 6 prises d'eau. Les trois plus importantes prises d'eau dans la Mayenne permettent d'assurer le renforcement de secteurs représentant près de 80 000 personnes. Le schéma départemental d'alimentation en eau potable ainsi que le SAGE Mayenne ont mis en évidence un manque de diversification sur l'axe Mayenne et la nécessité d'intégrer l'importance des eaux souterraines pour la sécurisation, la diversification des ressources en eau potable et la limitation de la pression de prélèvement sur la rivière Mayenne.

D'autre part, plusieurs captages d'eau souterraine sont composés d'un puits et d'un forage profond ce dernier permettant, même avec des débits très modestes, d'abattre les teneurs en nitrates des eaux du puits. Ce dispositif permet aux collectivités de pérenniser leurs captages et d'assurer une diversification des ressources.

Les captages d'eau souterraine représentent donc un élément stratégique de l'AEP du département, tant du point de vue quantitatif que qualitatif, mais aussi pour assurer une sécurisation et une diversification de l'AEP. Mais la pérennité de cette situation est conditionnée par l'absence de surexploitation des ouvrages et la réalisation d'un suivi de leur vieillissement et d'un entretien.

Au début des années 2000, trois forages ont fait l'objet d'un diagnostic à la suite du constat d'une importante baisse de productivité par l'exploitant. Les diagnostics réalisés ont mis en évidence un colmatage si prononcé qu'une opération de régénération aurait été un échec. La solution retenue pour ces sites a consisté en la réalisation d'un nouveau forage à proximité et a occasionné un surcoût important comparé à une opération de décolmatage et un arrêt d'exploitation de plusieurs semaines pour les travaux.

I.3. Aspects économiques

Ce programme est la suite logique d'investissements conséquents réalisés depuis la fin des années 80 pour la pérennisation et la protection des captages d'eau souterraine ainsi que la conduite d'un programme d'optimisation ayant pour objet la recherche d'eau profonde de qualité dans un but de dilution de l'eau nitratée de captages existants. Ces sommes sont réparties entre les collectivités productrices d'eau, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et le conseil général de la Mayenne. Les coûts de protection d'un captage d'eau souterraine sont en moyenne de 100 000 € (études, procédure, achats de terrain, travaux et indemnisations découlant de l'arrêté de déclaration d'utilité publique).

Le montant de ce programme de diagnostic de colmatage des forages s'élève à 50 000 € HT environ pour réaliser l'état des lieux des forages du département. Le coût par ouvrage est légèrement supérieur à 1 000 € HT.

A titre d'information et de comparaison, le coût d'une diagraphie (vidéo, micromoulinet) est compris entre 1 000 et 2 000 € HT, le coût d'une opération de réhabilitation est de 10 000 à 20 000 € HT et le coût de réalisation d'un forage d'exploitation d'une centaine de mètres est de 50 000 à 70 000 € HT.

II. Démarche mise en place

C'est à la suite du constat de colmatage de ces trois ouvrages par un bureau d'études que le conseil général de la Mayenne a conduit, en 2005, un premier programme de diagnostics concernant 10 forages. Ce premier programme a été prolongé pour quatre à cinq ans afin d'intégrer l'ensemble des forages AEP exploités du département.

L'objectif de ce programme est de connaître l'état des forages, d'apporter des conseils d'exploitation des ouvrages, mais principalement de sensibiliser les collectivités et les compagnies fermières aux risques de colmatage et à l'importance du suivi et de l'entretien réguliers de leurs forages afin d'assurer leur pérennité et d'anticiper un éventuel colmatage.

II.1. Modalités du programme

En 2009 ou 2010, tous les forages auront bénéficié d'un diagnostic simplifié pris en charge par le conseil général (et subventionné par l'agence de l'eau Loire-Bretagne). Ce diagnostic simplifié doit permettre d'appréhender l'évolution des pertes de charges des ouvrages depuis leur création grâce à la réalisation d'un essai par paliers. La réalisation de mesures plus poussées (diagraphies en particulier) reste à la charge complète de la collectivité, soit parallèlement au diagnostic, soit ultérieurement.

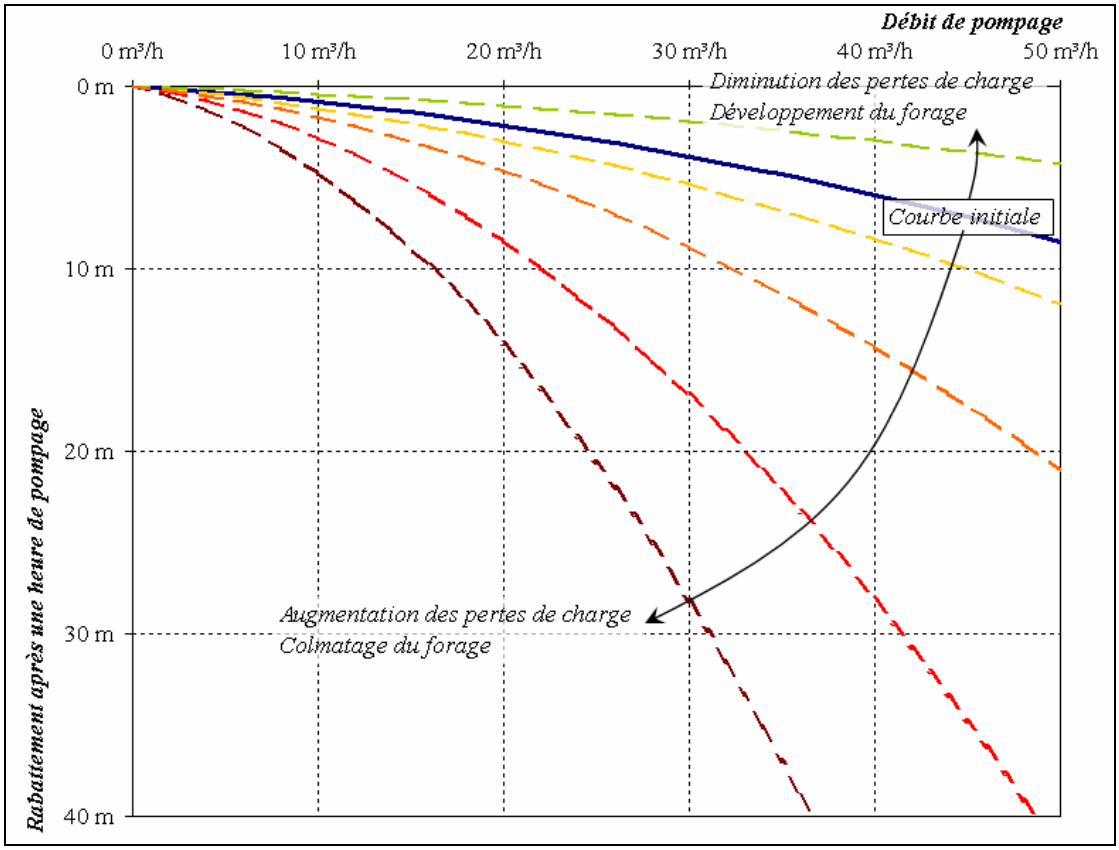


***Figure 2** : Évolution d'une courbe caractéristique*

La synthèse des données antérieures, la réalisation de l'essai de puits et l'interprétation sont confiées à un bureau d'études spécialisé (PIVETTE Consultant) mandaté par le conseil général au moyen d'un marché à bons de commande pluriannuel.

Les programmes annuels sont définis par l'hydrogéologue départemental qui assure également la transmission des comptes rendus à la collectivité et/ou au délégataire. Occasionnellement, le conseil général organise des réunions techniques d'information à destination des élus et techniciens des collectivités productrices d'eau potables et des compagnies fermières.

II.2. Déroulement d'un diagnostic

A la suite de la détermination des forages à diagnostiquer dans l'année et au recueil des accords des collectivités, l'hydrogéologue départemental transmet au bureau d'études tous les éléments nécessaires à la réalisation du diagnostic : coupe technique et géologique du forage, étude hydrogéologique, données des essais de pompage antérieurs, débit d'exploitation, résultats du suivi sanitaire de l'eau brute. ...

Le bureau d'études est chargé de contacter la collectivité concernée pour définir la date d'intervention en fonction des contraintes d'exploitation et convenir d'une visite préalable. Cette première visite est importante pour définir les conditions de réalisation de l'essai par paliers et en particulier les réglages et mesures du débit de la ou des pompes d'exploitation. L'ouvrage sera mis à l'arrêt avant l'essai (24 heures). L'essai de 3 paliers non enchaînés d'une heure est ensuite réalisé en présence du technicien chargé de l'exploitation du forage.

Parallèlement à cette intervention du conseil général, il arrive que certaines collectivités, ayant déjà rencontré des difficultés d'exploitation, aient réalisé des mesures complémentaires qui sont alors intégrées au diagnostic (micro-moulinet, inspection vidéo, log qualité).

Le bureau d'étude réalise la synthèse de toutes les données et rédige un compte rendu par forage. Ce compte rendu rassemble les différentes caractéristiques du forage et fournit à l'exploitant tous les éléments nécessaires pour contrôler lui-même l'évolution de la courbe caractéristique de son ouvrage. De plus, si de fortes dégradations des caractéristiques hydrauliques du forage sont mises en évidence par l'essai de puits, le bureau d'études conseille la réalisation de diagraphies, ou la réalisation d'une opération de décolmatage ou d'un nouvel ouvrage. Un ordre de grandeur des coûts est également indiqué.

Les comptes-rendus sont transmis en plusieurs exemplaires aux collectivités et aux délégataires par le conseil général. Cet envoi est accompagné d'un courrier de rappel des conclusions et préconisations du diagnostic ainsi que de commentaires ou précisions comme l'augmentation des rabattements ou les coordonnées d'entreprises spécialisées pour des diagraphies ou une régénération.

II.3. Classification des forages

La conclusion du diagnostic conduit à classer l'ouvrage dans une des cinq catégories suivantes (extraits du rapport de synthèse du programme 2007) :

CLASSE	SIGNIFICATION	CONSEILS D'EXPLOITATION
Classe 1	ouvrage ne présentant pas d'augmentation significative des pertes de charge	- aucune intervention particulière n'est à prévoir - un suivi annuel du débit spécifique (débit d'exploitation divisé par le rabattement au bout d'une heure) est cependant recommandé
Classe 2	ouvrage présentant une augmentation significative, voire importante, des pertes de charge sans effet immédiat sur ses capacités de production	- des investigations complémentaires sont recommandées - un suivi annuel du débit spécifique doit être réalisé afin de caractériser la cinétique de la dégradation mise en évidence
Classe 3	ouvrage présentant une augmentation importante des pertes de charge susceptible de se traduire, à court terme, par une réduction des capacités de production	- des investigations complémentaires doivent être réalisées (inspection vidéo, micromoulinet…) ainsi qu'un suivi semestriel du débit spécifique afin de caractériser la cinétique de la dégradation mise en évidence - en fonction des résultats des investigations et du suivi, une intervention de réhabilitation pourra être recommandée
Classe 4	ouvrage présentant une augmentation importante des pertes de charge, à l'origine d'une réduction significative de sa capacité de production	- une intervention de réhabilitation est à prévoir - assurer un suivi semestriel du débit spécifique
Classe 5	ouvrage colmaté, pour lequel les chances d'une réhabilitation sont très faibles, voire nulles	- la réalisation d'un nouvel ouvrage, à proximité, est recommandée - assurer un suivi semestriel du débit spécifique

***Tableau 1** : Classification des forages*

En complément de la classification, chaque diagnostic comporte des conseils et observations particulières, par exemple :

- rabattement maximal admissible,
- diminution du débit de la pompe,
- réalisation d'un bilan d'exploitation de la ressource,
- contrôle de la profondeur de l'ouvrage,
- avertissements sur des difficultés d'exploitation estivale (rabattements plus importants liés à d'importantes baisses de niveau),
- évolution du rendement (rapport pertes de charges totales - pertes de charges linéaires),
- étalonnage de la sonde de niveau à contrôler.

III. Résultats

III.1. Bilan des diagnostics 2005-2007

Lors des programmes 2005, 2006 et 2007, trente forages ont été diagnostiqués. Les principaux résultats sont les suivants :

CLASSE	NOMBRE	POURCENTAGES	
Classe 1	15	50 %	67 % des ouvrages ne présentent pas de vieillissement remettant en cause les capacités d'exploitation
Classe 2	5	17 %	
Classe 3	6	20 %	23 % des ouvrages présentent une dégradation importante des caractéristiques hydrauliques pouvant remettre en cause les capacités d'exploitation
Classe 4	1	3 %	
Classe 5	3	10 %	10 % des ouvrages sont colmatés et doivent être remplacés

***Tableau 2** : Principaux résultats*

Aucun exploitant ne réalisait des mesures régulières de rabattement (pompage d'une heure), et dans quelques situations le technicien ne dispose pas d'une sonde piézométrique manuelle permettant une mesure fiable des niveaux d'eau.

La majorité des forages en classes 3, 4 et 5 présente un colmatage lié à l'exploitation d'aquifères confinés étant à l'origine de dépôts d'hydroxydes de fer (ou de manganèse) et d'encroûtements bactériens liés au fer. Ces colmatages ont pu être favorisés par un débit d'exploitation trop élevé entraînant un dénoyage des arrivées d'eau. Les dépôts carbonatés sont plus rares et rencontrés dans les calcaires captifs ou semi-captifs.

Quelques cas des classes 3, 4 et 5 pourraient s'expliquer, par exemple, par des modifications des caractéristiques hydrauliques du massif filtrant ou de colmatage de micro-fractures à proximité du forage car aucun dépôt n'est constaté par inspection vidéo.

D'autre part, on note également quelques améliorations des pertes de charges au niveau des forages exploitant des aquifères calcaires libres et karstifiés : ils se sont développés au cours du temps (classé en 1).

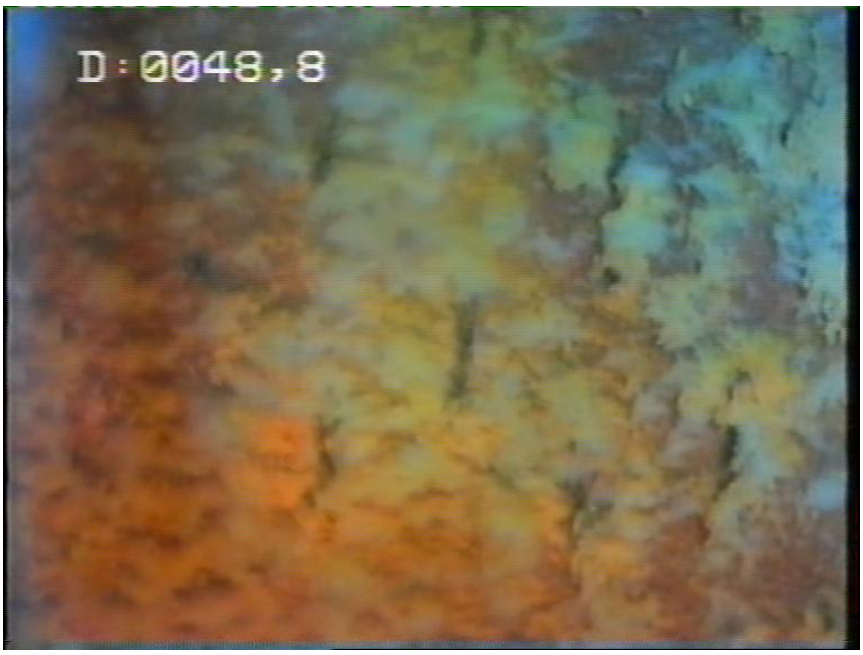


***Figure 3** : Dépôts minéraux et organiques liés au fer (forage du Fay)*

A la suite de la réalisation de ces 30 diagnostics simplifiés, les travaux suivants ont été réalisés par les collectivités :

Suivi des débits spécifiques	Très peu de retours des collectivités pour interpréter leurs mesures de contrôle
Demande d'une présentation du diagnostic à la collectivité	Une dizaine de présentations
Diagraphies (micromoulinet, vidéo)	9 forages
Décolmatage en projet	3 forages
Forage décolmaté	1 forage
Projet de remplacement du forage	2 forages
Forage remplacé	1 forage (forage d'essai réalisé)

Tableau 3 *: Travaux réalisés par les collectivités suite au diagnostic*

On constate donc que le diagnostic est suivi de mesures concrètes lorsque des problèmes importants sont mis en évidence. Par contre, le suivi routinier des débits spécifiques ne semble pas réalisé.

III.2. Exemples

Afin d'illustrer ces propos, les quatre cas suivants vont être brièvement exposés et commentés (extrait des comptes-rendus correspondants et des rapports de diagraphies) :

- forage du Grand Rousson,
- forage de la Morinière,
- forage de Montavallon F3,
- forage des Chaintres.

➢ Le forage du Grand Rousson

Ce forage de 25 mètres de profondeur a été réalisé en 1977 dans les calcaires carbonifères du synclinorium de Laval. Il est équipé d'un tube en semi-inox de 550 mm de diamètre crépiné entre -5 et -23 mètres. La nappe captée est libre dans un contexte karstique, l'eau est très dure. Le débit d'exploitation est de 53 m³/h pour une production moyenne de 380 m³/j.

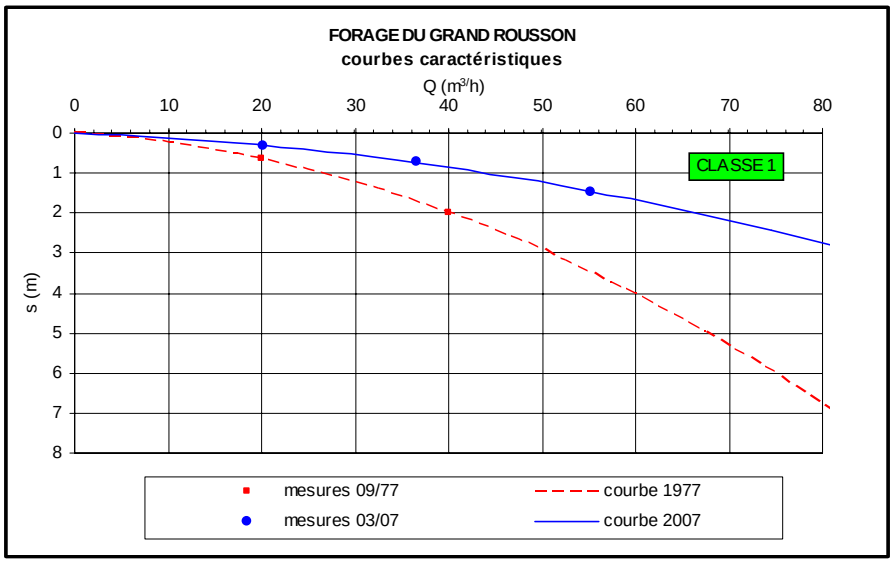


Figure 4 *: Courbes caractéristiques*

On constate une très nette amélioration des pertes de charges de l'ouvrage par rapport à l'état initial. L'amélioration de la productivité de l'ouvrage est très vraisemblablement due à un développement des fissures et/ou des drains karstiques de l'aquifère depuis la mise en exploitation. Ce forage peut être considéré comme appartenant à la classe 1.

➢ Le forage de la Morinière

Ce forage de 60 mètres de profondeur a été réalisé en 1998 dans des granites cadomiens pour remplacer le puits existant. Il est équipé d'un tube en inox de diamètre 260 mm crépiné entre -17 et -58 mètres. La nappe captée présente probablement une dénitrification naturelle partielle (présence de nitrates et de fer). Le débit d'exploitation est compris entre 25 et 30 m³/h pour une production moyenne de 200 m³/j.

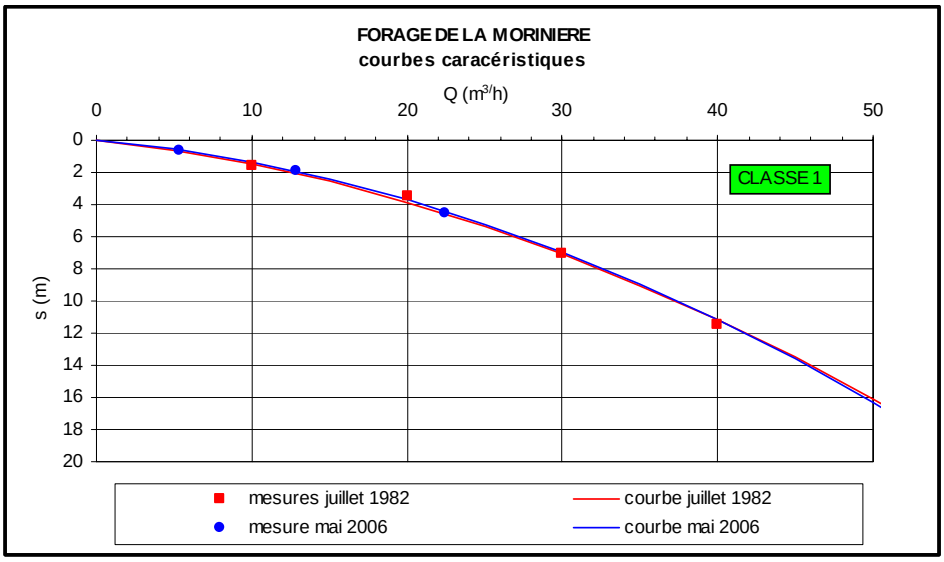


***Figure 5** : Courbes caractéristiques*

Après 24 ans d'exploitation, on ne constate aucune modification significative de la courbe caractéristique de l'ouvrage, ce qui permet de considérer le forage comme appartenant à la Classe 1. Par contre, il apparaît que l'exploitation au débit actuel peut entraîner des niveaux dynamiques trop bas engendrant un dénoyage probable des arrivées d'eau. Une réduction du débit d'exploitation horaire a donc été préconisée.

Bien que cet ouvrage présente des facteurs de risque de colmatage (présence de fer, dénoyage d'arrivées d'eau et mélange probable de deux aquifères) aucune augmentation des pertes de charge n'est constatée.

➢ Le forage de Montavallon F3

Ce forage de 58 mètres de profondeur a été réalisé en 1996 dans des calcaires et calcschistes carbonifères pour remplacer un forage colmaté. Le nouveau forage est équipé d'un tube en PVC de 250 mm de diamètre crépiné entre -30 et -39 mètres et entre -44 et -55 mètres. La nappe captée présente une dénitrification naturelle partielle et une eau très dure. Le débit d'exploitation est de 45 m³/h pour une production moyenne de 600 m³/j.

Après 10 ans d'exploitation, on constate une augmentation importante des pertes de charges. Cette dégradation des caractéristiques hydrauliques du forage ne remettent pas en cause le débit d'exploitation et n'entrainent pas de dénoyage des crépines. Mais, compte tenu du colmatage du forage précédent, cet ouvrage peut être considéré comme appartenant à la classe 3.

Suite au diagnostic, la collectivité a réalisé une inspection vidéo et une mesure au micromoulinet. La vidéo a permis de visualiser d'importants dépôts minéraux et organiques responsables du colmatage des crépines. Ces dépôts semblent peu indurés.

La collectivité a engagé une opération de régénération de son forage qui doit être réalisée fin octobre 2008.

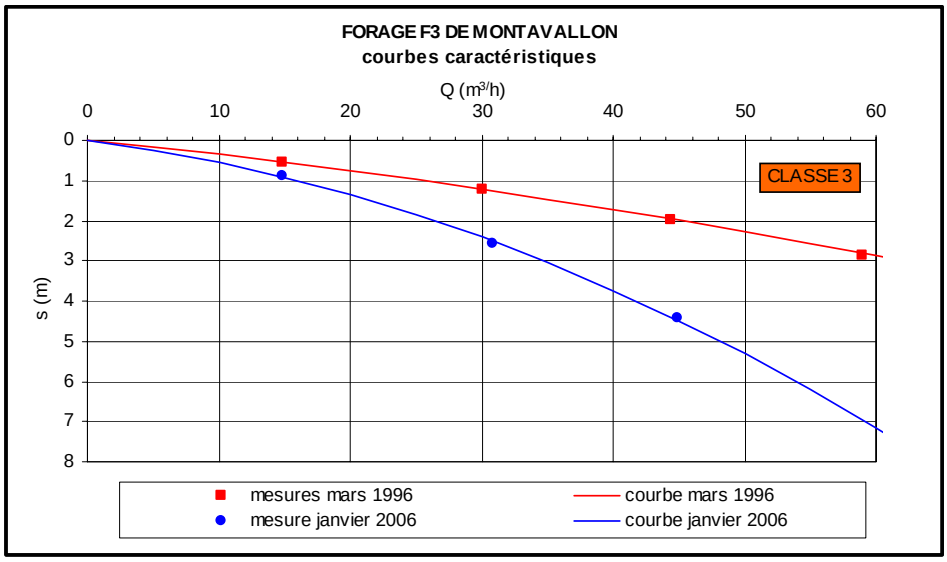


***Figure 6** : Courbes caractéristiques*

➢ Le forage des Chaintres

Ce forage de 62 mètres de profondeur a été réalisé en 1989 dans des alternances schisto-gréseuses du briovérien. Il est équipé d'un tube en inox de 400 mm de diamètre crépiné entre -8 et -62 mètres. La nappe captée présente une dénitrification naturelle totale (très fortes teneurs en fer). Le débit d'exploitation est de 15 à 20 m³/h pour une production moyenne de 250 à 300 m³/j. Ce forage concerne clairement un premier niveau aquifère superficiel et un second niveau plus profond, semi-captif.

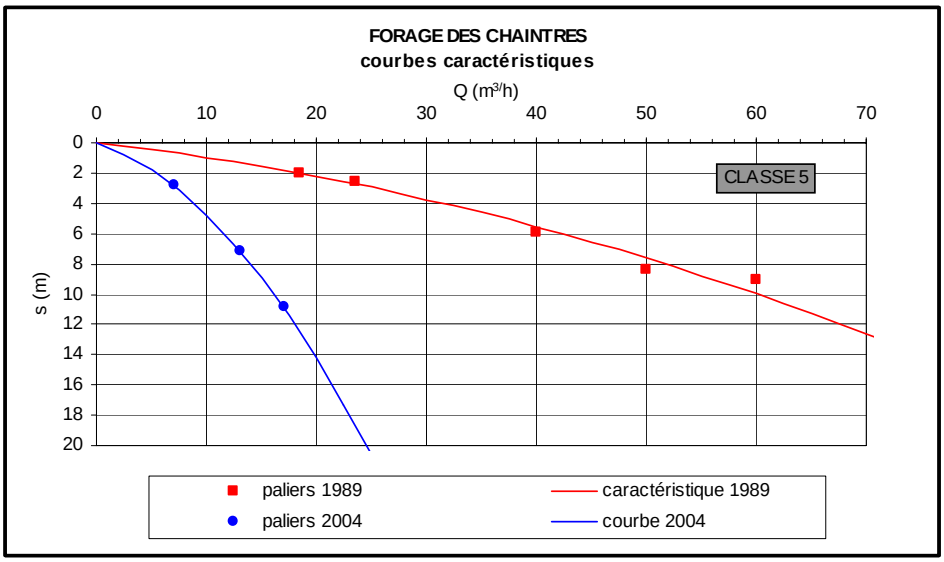


***Figure 6** : Courbes caractéristiques*

L'essai de contrôle réalisé en 2004 et les mesures réalisées en 2007 mettent en évidence une très forte dégradation des caractéristiques hydrauliques du forage et un niveau statique particulièrement bas (-26 m). Les diagraphies réalisées par la collectivité ont mis en évidence de très importants dépôts colmatant les crépines. Les arrivées d'eau principales initiales (-58 m) sont totalement obstruées (aucune venue mesurée d'eau au micromoulinet à cette profondeur).

De plus, les très fortes pertes de charge induisent un fonctionnement saccadé du pompage, dépendant du marnage entre les électrodes haute et basse : ces conditions sont préjudiciables pour la pompe et ne peuvent que favoriser une aggravation du colmatage de l'ouvrage.

Compte tenu de ces observations et de la conception défavorable de l'ouvrage, ce forage a été intégré à la classe 5. Il a été conseillé à la collectivité de réduire de façon significative ses prélèvements et de refaire un nouveau forage à proximité bénéficiant d'une tête cimentée d'une vingtaine de mètres de profondeur.

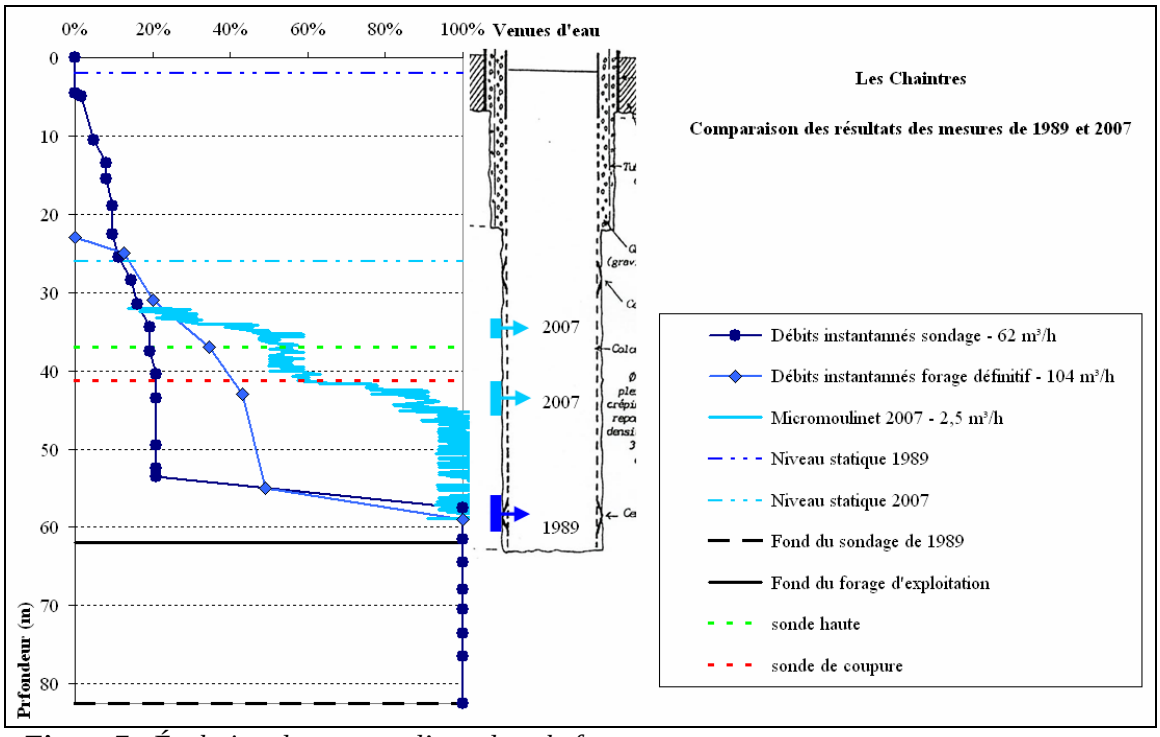


***Figure 7** : Évolution des venues d'eau dans le forage*

Compte tenu de la demande de l'hydrogéologue agréé d'isoler la nappe superficielle afin faciliter la mise en place du périmètre de protection, la collectivité a décidé de réaliser un sondage de reconnaissance dans l'optique de remplacer cet ouvrage de production stratégique pour son fonctionnement interne (dilution des nitrates d'une autre ressource exploitée).

IV. Difficultés rencontrées

Des difficultés sont rencontrées à différents stades : lors du diagnostic, pour la réalisation de l'essai de puits ou l'interprétation des mesures et lors de la mise en place du suivi par la collectivité.

IV.1. Pour la réalisation du diagnostic

La première étape est d'obtenir l'accord de la collectivité. Bien qu'aucune participation financière ne soit demandée aux collectivités, certaines ne veulent pas arrêter leur ouvrage et importer de l'eau depuis un syndicat voisin et ne souhaitent pas réaliser le diagnostic. Ceci traduit bien la fragilité de ces collectivités en cas de problème technique sur leur ouvrage. Dans certains cas les exploitants acceptent difficilement qu'un organisme extérieur s'intéresse à leurs forages, éléments pivots de leur fonctionnement ou considèrent connaître parfaitement leur forage ou être capable de réaliser ces mesures en interne (faut-il encore le faire).

Dans la grande majorité des cas, les difficultés éventuelles ne surviennent qu'à partir de l'essai de puits. Sa réalisation peut être difficile ou imprécise lorsque les débits ou les niveaux ne peuvent pas être mesurés facilement :

- Les problèmes sur la mesure du niveau sont exceptionnels et correspondent à des forages artésiens en permanence, où l'on mesure donc une pression avec un capteur qu'il faudrait vérifier au préalable.
- Les difficultés viennent plutôt du débit : difficulté de réglage des différents débits de pompage pour l'essai ou impossibilité de mesure volumétrique (pas de compteur ou de débitmètre). Quelques situations ont nécessité la mise en place d'un compteur d'exhaure dédié au forage ou la pose d'un débitmètre à ultrason portable dont la précision est parfois douteuse. Certains essais n'ont pas permis de dresser la courbe caractéristique du forage, les débits étant très instables ou tout simplement le seul débit possible était le débit d'exploitation (dans ce dernier cas, seul un pompage de 2 heures à débit constant a été réalisé).

D'autre part, les données enregistrées issues des systèmes numériques de suivi des captages (débit et niveau) transmises par l'exploitant ne sont pas toujours exploitables sur un tableur type Excel, ce qui rend difficile et fastidieuse l'interprétation de l'essai.

La comparaison simple et directe des courbes caractéristiques initiale et actuelle peut s'avérer hasardeuse lorsque les conditions hydrologiques de deux essais sont différentes. Dans ce cas, l'interprétation est réalisée avec précaution ; il est conseillé de refaire des mesures dans des conditions hydrologiques précises et de réaliser un bilan d'exploitation. Cette situation est parfois rencontrée dans le cas de forages surexploités

Lorsqu'aucun pompage d'essai n'a été réalisé par le passé, le diagnostic permettra simplement de dresser la courbe caractéristique actuelle. Éventuellement une comparaison avec quelques mesures ponctuelles antérieure sera réalisée. Cette situation se rencontre lorsque les essais de pompage ont été réalisés sur un forage d'essai, le forage d'exploitation ayant ensuite été mis en service directement après les pompages de nettoyage qui constituent alors les seules mesures de référence (urgence de raccordement lors de sécheresse par exemple).

IV.2. Pour la mise en place d'un suivi

Comme indiqué plus haut, le diagnostic est suivi de mesures d'entretien par la collectivité dans les situations critiques où les débits d'exploitation peuvent être remis en cause. Ces mesures correctives visant à rétablir les capacités des ouvrages sont relativement coûteuses et entraînent des arrêts d'exploitation de plusieurs jours.

Par contre, la mise en place d'un suivi par la réalisation régulière d'un palier de débit n'est pas ou peu faite. Ce type de mesure est pourtant très simple et n'engendre aucune perturbation du service d'eau et aucune dépense. Il est régulièrement conseillé aux collectivités de profiter de l'arrêt d'un forage lié au fonctionnement de la collectivité (lavage de réservoir, entretien de la pompe, …) pour faire les mesures de rabattement et de débit lors de la reprise de l'exploitation.

Ces mesures de routine sont pourtant la base du suivi d'un ouvrage permettant, si nécessaire, le déclenchement d'une opération de décolmatage qui se résume alors à un nettoyage ayant de fortes chances de succès.

Un des objectifs principaux de ce programme n'est pas atteint actuellement après 3 années : la sensibilisation des exploitants ne s'effectue pas, le suivi régulier n'est pas ou peu mis en place. La majorité des collectivités n'a pas encore adopté, sur cet aspect, un comportement préventif.

V. Perspectives

Aujourd'hui, face à ce constat d'absence de suivi régulier des ouvrages, il est donc nécessaire de trouver d'autres outils permettant la mise en place de cette démarche préventive. Deux axes principaux sont à développer : la sensibilisation par l'appui technique et le conditionnement des aides financières.

V.1. L'appui technique

La transmission des comptes rendus par courrier doit s'accompagner d'une information orale des techniciens et des élus. Des réunions techniques, rassemblant les élus et techniciens des collectivités ainsi que les sociétés fermières, devront être organisées régulièrement. Concernant les forages classés en 3, 4 et 5, une réunion de présentation devrait être proposée systématiquement à la collectivité. L'édition d'une plaquette sur l'exploitation des forages peut aussi être un outil de rappel des mesures de suivi à réaliser.

Le programme actuel a pour objet la réalisation d'un état initial et n'a pas pour but d'être pérennisé. Mais compte tenu de la difficulté de prise en charge de ces suivis par les collectivités, un suivi régulier des forages assuré par le conseil général, dans le cadre d'une cellule d'appui, peut trouver son intérêt pour maintenir le potentiel d'exploitation des eaux souterraines. Restent bien sûr de nombreuses interrogations sur ce type de fonctionnement : quelles missions sont confiées à cette cellule d'appui, s'arrêtent-elles au suivi des forages ou s'étendent-elles au suivi de la ressource et de la protection ? Comment assurer le fonctionnement de ce service dans un contexte réglementaire en évolution ? Cette solution n'est qu'à l'état de réflexion dans le département de la Mayenne.

D'autre part, pour les collectivités ayant délégué leur service d'eau à une société privée, les contrats devraient préciser les suivis à assurer sur les ouvrages et la transmission des mesures effectuées au maître d'ouvrage dans son rapport annuel par exemple.

V.2. Le conditionnement des aides financières

Le conseil général de la Mayenne finance actuellement les investissements liés aux ouvrages structurants de l'alimentation en eau potable à hauteur de 40 %. L'entretien des ouvrages (diagraphies, décolmatage) n'est pas financé car il correspond à du fonctionnement. Par contre la réalisation d'un nouvel ouvrage de production en raison du colmatage du précédent est prise en charge. A l'occasion d'une révision du programme d'aide pour l'AEP, les conditions suivantes pourraient être proposées à la validation des élus du conseil général :

- lors du financement de forages d'exploitation, la collectivité devra s'engager à réaliser les mesures de suivi (débit d'exploitation, mesure du débit spécifique, niveaux) et à les transmettre au conseil général ;
- les ouvrages colmatés par un non respect des conditions d'exploitation fixées lors du diagnostic, ou lors de la réalisation de l'ouvrage, ou résultant de l'absence de suivi et d'anticipation du colmatage ne seront pas ou moins financés.

Conclusion

Le programme de diagnostic de forages actuellement en cours dans le département de la Mayenne permet une bonne connaissance de l'état de vieillissement des forages et des ouvrages sensibles au colmatage. Par contre cette démarche n'est pas suffisante pour initier la réalisation du suivi régulier des ouvrages permettant de détecter un colmatage progressif et devrait être complétée par des démarches d'information et des incitations financières.

Il est étonnant que le suivi technique de l'état des ouvrages de captage (et de l'état quantitatif de la ressource en eau) n'ait pas été autant développé que le suivi sanitaire de la qualité de l'eau brute alors que de ces paramètres découlent la pérennité de l'ouvrage et le fonctionnement des collectivités productrices d'eau potable.

Bibliographie

- BARDY Philippe (janvier 2007), Station de pompage de Montavallon, Forage F3 ou FE.1, Inspection télévisée et diagraphie, Géo Hydro Investigation, Rapport R/06-07/0081/PB

- BARDY Philippe (mars 2007), Station de pompage du Fay, Forage d'exploitation, Inspection télévisée et diagraphie, Géo Hydro Investigation, Rapport R/06-07/0106/PB

- BRGM (2003) – Carte géologique de la France à 1/1 000 000, sixième édition

- Conseil général de la Mayenne (octobre 2007), Schéma départemental d'alimentation en eau potable, Diagnostic et propositions

- LAGRAVE Jean-Louis (octobre 2007), Compte-rendu de télé-inspection micromoulinet, Forage AEP des Chaintres, SADE, Rapport 701390

- PIVETTE Bernard (juin 2006), Programme de suivi des forages 2005, Forage de la Morinière, PIVETTE Consultant 412/05/Ra.257-B

- PIVETTE Bernard (juin 2006), Programme de suivi des forages 2005, Forage de Montavallon F3, PIVETTE Consultant, Rapport 412/05/Ra.257-B

- PIVETTE Bernard (avril 2007), Programme de suivi des forages 2006, Forage du Grand Rousson, PIVETTE Consultant, Rapport 457/06/Ra.287-B

- PIVETTE Bernard (novembre 2007), Programme de suivi des forages 2007, Forage des Chaintres, PIVETTE Consultant, Rapport 457/06/Ra.293

- PIVETTE Bernard (novembre 2007), Programme de suivi des forages 2007, Note de synthèse, PIVETTE Consultant, Rapport 457/06/Ra.293

- Schéma d'Aménagement et des Gestion des Eaux du bassin versant de la Mayenne (juillet 2007), Plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource – Document de référence approuvé le 27 juin 2007

Sonde de mesure de corrosion par procédé électromagnétique

Ce texte est une retranscription partielle, illustrée par des extraits du diaporama, de la communication orale faite en séance.
Le comité de rédaction des actes

D'après la communication orale de Michel SEGUIN

HYDROINVEST, 60 route d'Agris, 16430 Champniers, hydro.invest@wanadoo.fr

Aujourd'hui les sondes de mesure de corrosion par procédé électromagnétique ne sont pas une nouveauté technologique. La société Schlumberger les utilisait déjà il y a 35 ans. La nouveauté vient de la façon et du contexte dans lesquels sont utilisées ces sondes.

L'origine de la corrosion dans les tubes de forage est souvent d'origine soit électro-galvanique, soit chimique ou encore biologique. Les principaux paramètres intervenants dans ces phénomènes sont la qualité des métaux et des eaux, les concentrations en oxygène ou en dioxyde de carbone dissous, les courants telluriques et les contraintes mécaniques. Les différents phénomènes peuvent ainsi soit seul soit en combinaison corroder les tubes de manière plus ou moins importante.
En général une corrosion généralisée sur une face de tube (intrados) évolue selon 6 phases distinctes dans l'ordre chronologique (figure 1) :

- apparition de pustules en surface,
- évolution des pustules vers la profondeur,
- décalotage des pustules et formation d'un cratère,
- dé-feuilletage des bords supérieurs du cratère,
- évolution du dé-feuilletage vers la profondeur,
- formation de lames de décollement saillantes.

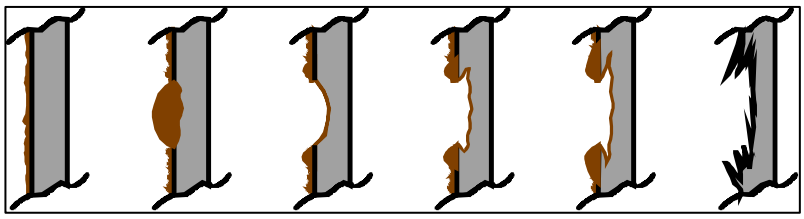


Figure 1 : Phases d'évolution de la corrosion

En forage, après la formation d'une corrosion généralisée, l'étape de la formation des pustules génère également une phase de croissance de concrétions sur l'extrados des pustules. Visuellement on observe ensuite une phase d'écaillage suivi du dé-feuilletage. Il arrive également que le concrétionnement masque par recouvrement la partie corrodée du tube.

Un examen vidéo du tubage ne permet donc pas de connaître l'état du tubage surtout si le concrétionnement est avancé. L'expérience montre que des tubes diagnostiqués en très mauvais état par examen vidéo soit une fois sur forés et sortis dans un relativement bon état. A contrario, des micros perforations invisibles à l'examen vidéo laissent croire à un tube parfaitement lisse et donc fonctionnel, alors que la réalité est toute autre.
Ainsi, sauf cas extrême, l'examen vidéo d'un tube ne eut être considéré comme représentatif de l'état réel du tubage.

Trois questions restent posées à l'issue d'un examen vidéo :

- quel est l'état général du tubage ?
- peut-on nettoyer ou brosser sans risques ?
- doit-on envisager un chemisage ?

A ce stade, l'expertise « traditionnelle » se fait en s'appuyant sur une procédure d'aide à la décision illustrée par le tableau suivant :

AIDE A LA DECISION			
ETATS		ACTION DIRECTE	CONSEQUENCE
Très bon		Néant	Le maître d'ouvrage est satisfait … !
Moyen	Bon	Intervention possible	Nettoyage Brossage Réparation
	Mauvais	Avec précaution	
Très mauvais		Aucune	Chemisage ou surforage ou abandon

Tableau 1 : Table d'aide à la décision pour le diagnostic des tubages corrodés.

Dans notre cas nous allons faire en sorte d'obtenir une réponse ou une indication supplémentaire capable de nous aider dans la réalisation du diagnostic. Du point général, un tube corrodé peut présenter plusieurs symptômes dont une perte de résistance mécanique avec pour effet induit la modification les propriétés et paramètres électromagnétiques de l'acier.
Si un outil idéal nous permettait de connaître l'état du tubage, son cahier des charges serait le suivant :

- un outil qui délivre une mesure plus ou moins représentative de l'état mécanique du tubage,
- un outil pas trop complexe et d'un coût raisonnable,
- un outil ne nécessitant pas de centrage précis,
- un outil utilisable avec des câbles standards de diagraphie,
- un outil de mise en œuvre facile et rapide.

De nombreux outils de diagraphie modernes répondent à ces critères (Sonic, Gamma-Gamma, …) mais ils nécessitent un état de parois relativement propre pour obtenir une réponse correcte onc dans le cas d'ouvrages corrodés une intervention supplémentaire.

Notre recherche s'est donc orientée vers un outil pouvant s'affranchir de l'état surfacique du tubage (concrétions, pustules, etc.).

Le procédé de mesure électromagnétique par courant de Foucault se fait en fonction de 4 paramètres interdépendants du tubage qui sont le diamètre, l'épaisseur, la résistivité et la perméabilité magnétique.
L'outil (sonde SME) que nous avons créé utilise donc la mesure électromagnétique par courant de Foucault. Le principe de fonctionnement est basé sur une stimulation magnétique (champ stimulé) qui engendre un courant induit et un champ magnétique induit. Le récepteur de la sonde mesure la différence entre les 2 champs magnétiques. La mesure est globalisée et s'applique sur une portion verticale du tubage d'environ 30 cm au droit de la sonde. Elle est directement fonction de la quantité d'acier sain vu par la sonde.

Bien qu'il soit aisé de calibrer la sonde SME avec des tubes d'épaisseur connue, toutefois en l'absence de connaissances sur les paramètres du tube en place, plusieurs paramètres peuvent expliquer une même variation de réponses.

Le principe de mesure fait que la sensibilité de la sonde augmente lorsque la quantité d'acier diminue, la mesure est volumétrique. La précision est d'autant plus importante qu'il reste moins d'acier sain dans le tube (figure 2).

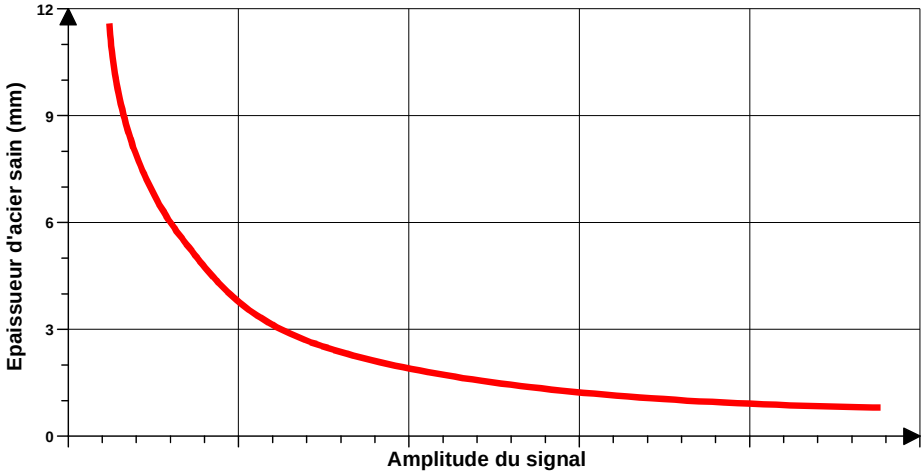


Figure 2 : Sensibilité de la sonde SME

La sonde SME délivre à diamètre constant 2 types de signaux différents et qui sont encore fonction de 3 des paramètres initiaux : épaisseur, résistivité (ou conductivité électrique) et perméabilité magnétique. L'interprétation ne peut donc être réalisée que par référence à un état initial ou à des courbes étalons.

La mesure des fréquences de réponse et des amplitudes permet de s'approcher d'une combinaison des paramètres mais ne permets par de les différencier.
Les logs obtenus sont parfaitement reproductibles, quelque soit le centrage de la sonde dans le tube (Figure 3).

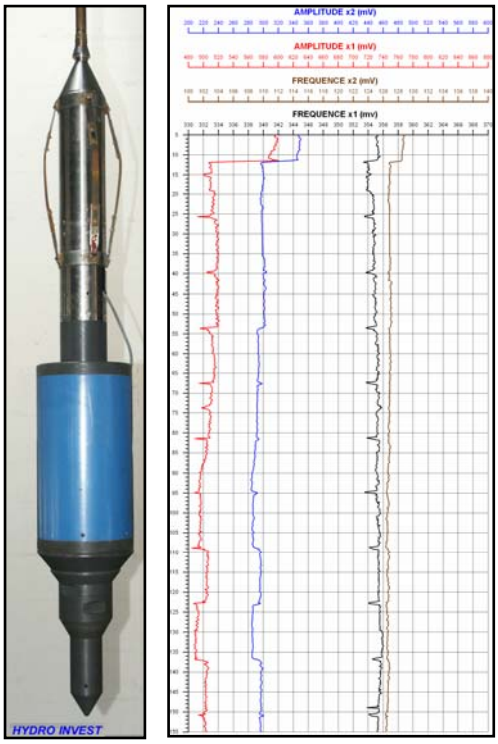


Figure 3 : Sonde SME et logs obtenus

Du point de vue interprétatif, l'épaisseur ou la qualité de l'acier ne peuvent pas être obtenus directement. D'autre part, la résistance mécanique de l'acier d'un tubage et la résistance mécanique sont liées : lorsqu'un tubage se corrode, sa signature électromagnétique change. Une base de données de connaissance sur la signature électromagnétique et l'état de multiples tubages a donc été synthétisée dans des abaques. L'interprétation d'une diagraphie de tube par sonde électromagnétique ne peut donc pas se faire visuellement. Elle nécessite l'utilisation d'un logiciel de calcul et de traitement sur les abaques élaborés sur données expérimentales acquises sur de multiples tubes de qualités et de diamètres différents.

Un seuil qualitatif des tubages arbitrairement fixé à 40% de son épaisseur nominale a été choisit comme limite de qualité. Pour l'interprétation qualitative, on fait le postulat que les paramètres magnétiques se détériorent de manière similaire à la résistance mécanique. La sonde ayant une vue radiale des différents paramètres, on ne peut pas connaître ou le tube est le plus corrodé au droit de la sonde. La mesure indique seulement la proportion d'acier sain restant par rapport à la valeur nominale d'où le choix d'une valeur seuil de sécurité fixée à 40 % des paramètres nominaux. L'interprétation des résultats de cette sonde en termes d'épaisseur n'est pas possible sans avoir à disposition un échantillon connu comme référence.

D'autre part, plusieurs configurations sont délicates à interpréter comme :

- La superposition de tubages qui ne peut pas être encore discriminée (la mesure étant globale),
- Les perforations sont « invisibles »,
- L'amincissement ou la corrosion localisée sont indétectables,
- Tubes d'épaisseur et de qualités inconnues (mesure relative uniquement).

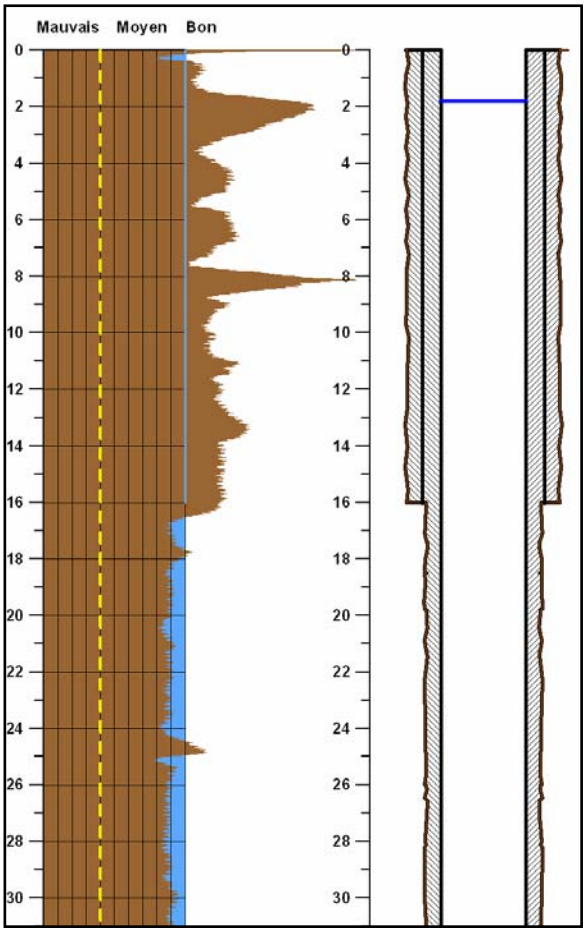


Figure 4 : Résultats et interprétations

Dans les conditions d'utilisation standard, il n'est pas possible de donner une valeur d'épaisseur de tube : seule une indication qualitative est permise.

Ces limitations étant données, les principales applications du procédé et de la sonde SME peuvent être résumées par la liste suivante :

- Evaluation quantitative de l'acier sain en présence,
- Mesures au travers de tubages PVC ou Inox,
- Détection d'un pied de tubage masqué par un autre tube.

En conclusion, les principaux avantages de ce procédé sont premièrement l'obtention d'une mesure physique de l'état d'un tubage à un instant donné, deuxièmement un suivi précis du vieillissement d'un tubage acier grâce à la reproductibilité absolue du procédé et de la mesure. De plus la mesure est relativement simple, rapide et d'un coût modéré et la mesure s'effectue dans un puits en l'état.

Technologies d'investigation avancées pour une gestion active des aquifères Exemples d'applications

KNEPPERS Angeline[1], DELHOMME Jean-Pierre[1], ETCHECOPAR Arnaud[2], LE NIR Isabelle[2], LEVANNIER Arnaud[3], ROULET Claude[4]

[1]Schlumberger Water Services, 76 route de la Demi-Lune, 92057 Paris La Défense Cedex, France, akneppers@slb.com
[1]Schlumberger Water Services, 76 route de la Demi-Lune, 92057 Paris La Défense Cedex, France, delhomme1@slb.com
[2]Schlumberger-Riboud Product Center, 1 rue Becquerel, 92142 Clamart Cedex, France, etchecopar@slb.com
[2]Schlumberger-Riboud Product Center, 1 rue Becquerel, 92142 Clamart Cedex, France, lenir@slb.com
[3]Schlumberger Water Services, Convention Tower, P.O 9261 Dubai, Emirats Arabes Unis, ALevannier@slb.com
[4]Schlumberger Water Services, 16676 North Chase, Houston, Texas, 77060, Etats-Unis, roulet1@slb.com

Résumé

Au XXIème siècle, des interventions réussies sont réalisées par combinaison de diagraphies, de méthodes de tests hydrodynamiques et de contrôles aux puits pour une meilleure compréhension de la circulation des fluides, des propriétés des roches et la quantification des fluides.

En effet, ces technologies jouent un rôle fondamental dans la détermination de la structure géologique, les corrélations stratigraphiques, la pétrologie et donc dans la connaissance des propriétés de l'aquifère ainsi que dans l'inspection des forages, l'identification des fluides et l'état de saturation.

Parmi les technologies d'investigation les plus avancées, sont illustrées -

La spectrométrie par rayonnement gamma induit qui permet une analyse des milieux lithologiques complexes et une meilleure corrélation stratigraphique.

La diagraphie par résonance magnétique nucléaire qui fournit la perméabilité calculée à partir de la mesure de distribution des pores aidant à l'estimation de la productivité de l'ouvrage.

L'imagerie par micro-résistivité électrique qui est utile pour la classification des structures et des faciès, et donne l'orientation et la taille des fractures.

Et finalement, l'utilisation des ondes acoustiques ultrasonique pour scanner la circonférence des forages, utile à l'inspection des ouvrages.

Applications et problèmes résolus -

Pour l'étude de carbonates fracturés et karstifiés, les chemins préférentiels d'écoulement sont localisés par la micro-résistivité électrique. Ces images permettent la caractérisation de la densité et de l'orientation des réseaux de fractures ainsi que la reconnaissance des différentes zones du karst, aidant au dimensionnement des ouvrages. Des mesures de pression in-situ assurent une meilleure compréhension des variations spatiales et temporelles liées aux hétérogénéités. Il est ainsi possible de mieux mesurer le rôle joué par la matrice, les fractures et les conduits. Une fois intégrées, ces données améliorent la modélisation des zones phréatiques.

Dans l'étude de formations détritiques où la complexité géologique des aquifères peut influencer le processus d'intrusion d'eau saline, l'interprétation des successions de faciès lithologiques permet de modéliser les milieux de dépôt pour la prédiction et la conception des ouvrages de mitigation. L'intégration de mesures de pression et de conductivité électrique, ou la répétition périodique de diagraphies, permet de détecter des changements des propriétés pétrophysiques. Ainsi l'intégration des techniques combinant l'investigation pour l'optimisation des ouvrages avec la mesure en continue des flux et de la salinité dans les forages permet de caractériser et atténuer en temps opportun le processus d'intrusion saline.

En conclusion, l'intégration des technologies permet une détermination plus précise des caractéristiques et de l'état des forages, des aquifères et des aquitards pour des modélisations plus réalistes et ainsi plus de certitude lors de la prise de décisions opérationnelles.

Introduction

Les estimations actuelles des coûts relatifs à la mise en place de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau d'ici l'an 2015, risquent fort d'être répercutées sur le prix unitaire de l'eau. Il sera donc d'autant plus important d'améliorer la gestion intégrée de la ressource en eau et des ouvrages au travers d'une caractérisation détaillée des aquifères et des aquitards par les techniques de diagraphies permettant aussi une bonne corrélation de puits à puits pour la construction de modèles intégrant de multiples données, représentatives des hétérogénéités, des anisotropies et des écoulements dans les milieux.

Les investissements pour l'optimisation de la qualité du forage se répercutent sur le rendement de l'ouvrage mais aussi sur les estimations de rendement du champ captant et sur la réduction des incertitudes dans les prévisions des ressources à l'échelle de l'aquifère ou du bassin versant. L'ouvrage doit donc s'inscrire dans une logique de gestion globale de la ressource avec un rapport coût-bénéfice amorti à moyen ou long terme.

Au XXIème siècle, des interventions réussies sont réalisées par combinaison de diagraphies, de méthodes de tests hydrodynamiques et de contrôles aux puits pour une meilleure compréhension de la circulation des fluides, des propriétés des roches et la quantification des fluides.

En effet, ces technologies jouent un rôle fondamental dans la détermination de la structure géologique, les corrélations stratigraphiques, la pétrologie et donc dans la connaissance des propriétés de l'aquifère ainsi que dans l'inspection des forages, l'identification des fluides et l'état de saturation.

Ces méthodes seront brièvement présentées puis illustrées par quelques cas d'applications pour notamment démonter le rôle de ces diagraphies pour la caractérisation des différents milieux mais aussi pour leur aide lors de la mise en place de ressources alternatives comme la recharge active ou le stockage d'eau en aquifère.

Matériels & Méthodes

Problèmes de dimension ou d'échelle de la mesure d'observation

L'hétérogénéité et les incertitudes à diverses échelles affectent l'étude des formations géologiques et peuvent rendre les prévisions des conductivités hydrauliques et des écoulements particulièrement difficiles. Par conséquent la réalisation et l'exploitation durable des forages mais aussi des champs captant ou la gestion globale de la ressource au niveau de l'aquifère ou du bassin versant dépend d'une bonne caractérisation.

Selon les formations géologiques, les processus physiques, chimiques et biologiques ont pu créer de larges variations dans la composition minéralogique et texturale qui modifient ou perturbent les relations entre les attributs, la porosité et la perméabilité par rapport aux conditions de dépôts. Ainsi il est possible de considérer que des modèles réalistes dépendront de la compréhension des processus qui ont créé ou modifié les formations, et de la mesure des propriétés des roches à des échelles de résolutions adéquates (Lucia 1995 & 2000).

Par conséquent, une seule technique d'investigation peut ne pas convenir à la réalisation d'un projet mais une combinaison de techniques peut se révéler plus appropriée pour couvrir l'étendue des dimensions à étudier.

A l'échelle du forage, de quelques millimètres à quelques dizaines de mètres, les technologies de puits - comprenant les diagraphies - apportent des données sur la minéralogie, la porosité, la saturation en fluides, la conductivité hydraulique, la continuité des formations aquifères ou aquitards et sur les processus de diagenèse. Les éléments géologiques tels que le litage, les stylolites, les fractures ou les figures de dissolution karstiques sont aisément observables à cette échelle (Ahr et al. 2005).

A l'échelle du système, de quelques centaines de mètres aux kilomètres, c'est-à-dire à l'échelle du champ captant, de l'aquifère ou du bassin versant, l'investigation offre des informations sur la géométrie et les conditions aux limites des aquifères en utilisant des données de la géophysique de surface mais aussi les corrélations de puits à puits qui permettent des reconstructions des faciès, des structures et des champs de contraintes (Etchecopar & Bonnetain 1992). Les calages et les corrélations des mesures permettent de construire et contraindre des modèles dans le temps et par conséquent d'aider dans les prévisions (Wang 2005).

A l'échelle de la gestion intégrée de la ressource, un modèle réaliste demande donc l'intégration des données géologiques, géophysiques, pétrophysiques et hydrauliques pour la caractérisation des formations géologiques et les prévisions de conductivités hydrauliques et d'écoulements dans le but d'optimiser l'exploitation, la protection et la gestion active des ressources en eau et des ouvrages d'exploitation.

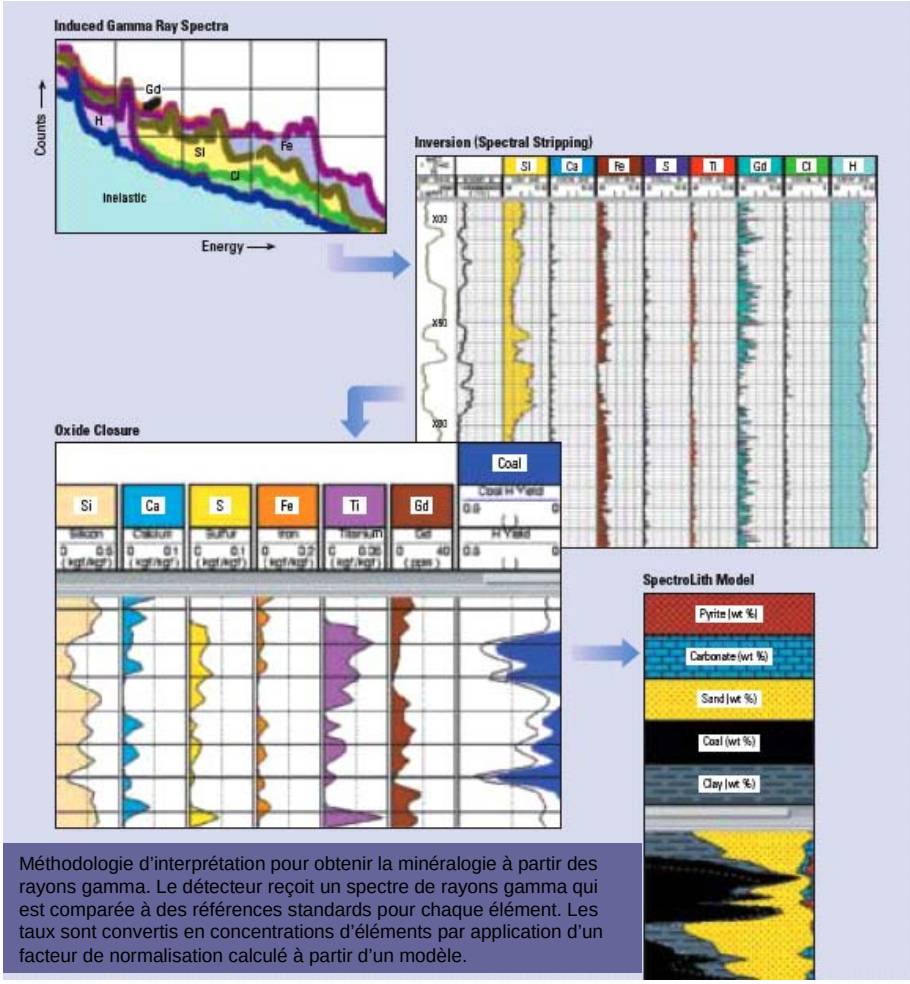
Diagraphies

Les diagraphies de puits sont utilisées depuis longtemps pour des estimations qualitatives, comme par exemple les mesures de changements chimiques de l'eau (Turcan 1962) par des méthodes électriques, puis des méthodes d'évaluation par induction, densité ou rayonnement gamma (Alger & Harrison 1989).

Aussi sont illustrées ici quelques unes des technologies avancées (Depavia et al. 2003, Freedman 2006, Marfice et al. 2001) qui permettent des évaluations quantitatives des propriétés et hétérogénéités des aquifères pour une meilleure caractérisation et modélisation des ouvrages et des eaux souterraines notamment -

La spectrométrie par rayonnement gamma induit (Herron 1996), qui permet une analyse avancée des milieux lithologiques complexes ainsi qu'une meilleure corrélation stratigraphique de puits à puits. Cet outil de mesure géochimique emploi les signaux naturels des rayons gamma pour des mesures de concentrations en éléments (silicium, calcium, fer, soufre, titane et gadolinium en pourcentage de poids) qui rendent possible l'estimation des contenus argileux et carbonatés (Figure 1).

Figure 1 : *Illustre la méthodologie d'interprétation pour obtenir la minéralogie à partir des rayons gamma. Le détecteur reçoit un spectre de rayons gamma qui est comparée à des références standards pour chaque élément. Les taux sont convertis en concentrations d'éléments par application d'un facteur de normalisation calculé à partir d'un modèle. La description détaillée des faciès permet de recréer des modèles des milieux de dépôt. L'interprétation devient alors une aide à la prédiction.*



Méthodologie d'interprétation pour obtenir la minéralogie à partir des rayons gamma. Le détecteur reçoit un spectre de rayons gamma qui est comparée à des références standards pour chaque élément. Les taux sont convertis en concentrations d'éléments par application d'un facteur de normalisation calculé à partir d'un modèle.

La diagraphie par résonance magnétique nucléaire fournit la perméabilité calculée à partir de la mesure de distribution des pores. Pour l'hydrogéologue, cette distribution de taille des pores se prête à la détermination des faciès. Cette mesure est utile pour l'identification des fluides et l'estimation de la saturation. Elle permet donc la prévision de la productibilité (Allen et al. 1997), donc de dimensionner l'ouvrage par rapport aux débits estimés et de déterminer la position optimale des crépines des puits. La résonance magnétique nucléaire permet aussi de mieux connaître la zone non saturée, sa teneur en eau et les pressions capillaires (Singer et al. 1997). Cette technique de mesure des paramètres peut s'appliquer in situ à des matériaux non consolidés ou vacuolaires, là où des carottes sont difficiles à prélever (Figure 2).

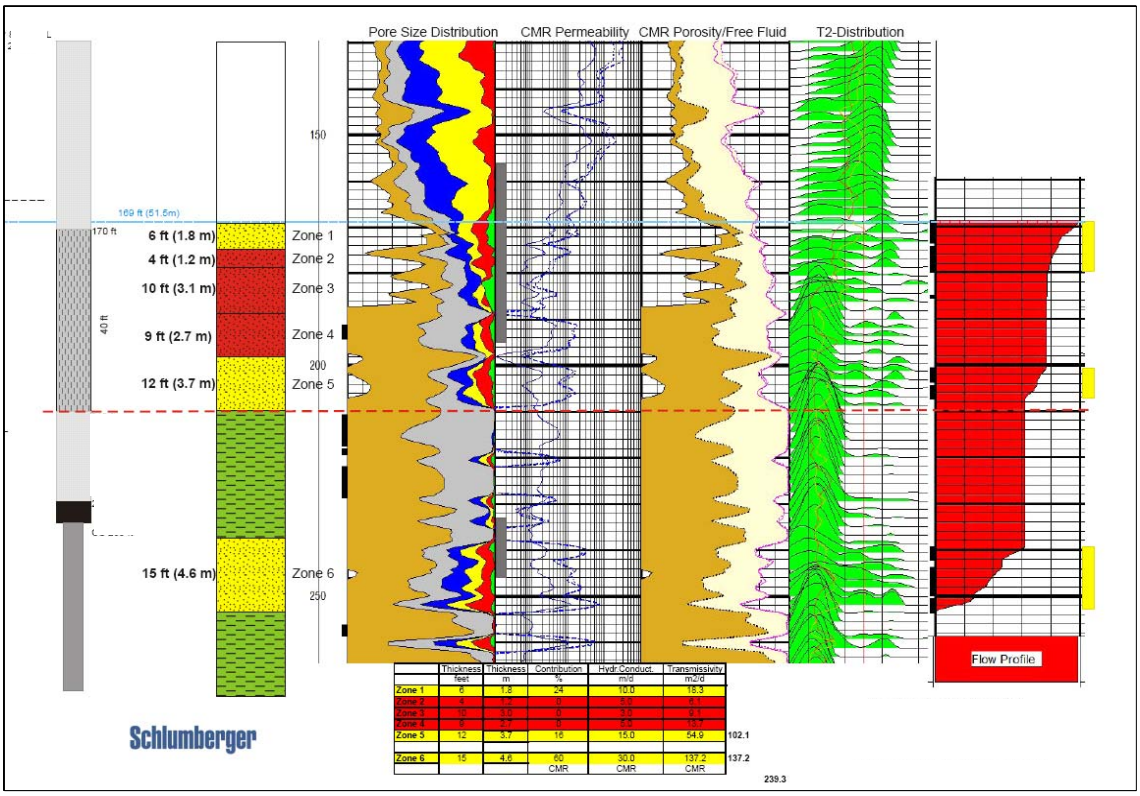


Figure 2 : *Illustration de la taille de distribution des pores, de la porosité & des fluides libres et liés, et de la perméabilité estimée permettant l'optimisation des intervalles crépinés.*

L'imagerie électrique haute résolution (2,5 mm) des parois du forage (Figure 3) est utile pour la détection des textures et des fractures en taille et orientation. En plus de l'aspect imagerie, les mesures de conductivité électrique servent à quantifier l'ouverture des fractures (Luthi & Souhaite, 1990), la taille des vacuoles, ou à identifier les zones cimentées (Delhomme 1992, 1996). Combinées aux diagraphies conventionnelles, ces textures quantifiées permettent une détermination de faciès géologiques ou « réservoir ». Par exemple, une méthodologie de caractérisation des différentes zones d'un système karstique a été établie (Akbar et al.2000) (Figure 5).

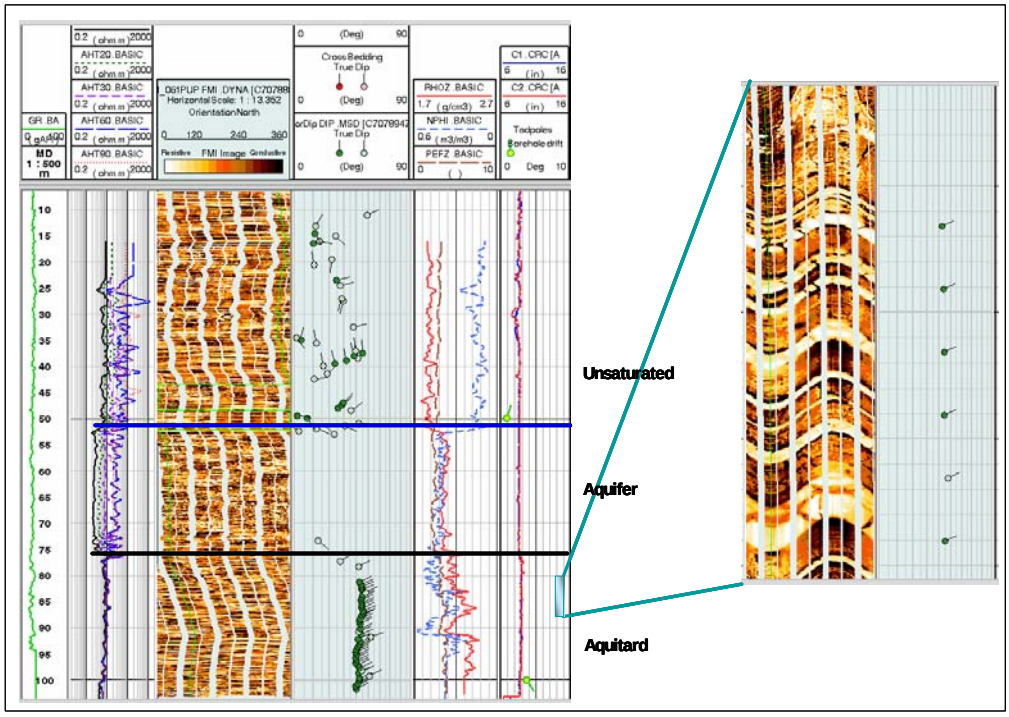


Figure 3 :L'imagerie par micro-résistivité électrique des parois du forage permet de distinguer une zone non saturée, une zone aquifère et une zone aquitard.

Ces technologies peuvent être validées par des mesures directes de pression et des essais hydrodynamiques pour complémenter les données de conductivité hydraulique aidant à la modélisation des écoulements.

Intégration et interprétation des données - reconstructions & prédictions

L'analyse intégrée (inversions multi-log ELAN, Quierein et al. 1986) permet d'extraire des profils continus des propriétés des formations, y compris les porosités totales et efficaces, les teneurs en eau de la zone vadose, la saturation en eau, la perméabilité, l'identification et l'ouverture des fractures, le litage et l'orientation des fractures ainsi que les textures, taille des grains, la nature de la matrice et la minéralogie (Marfice et al. 2001).

Dans un cas d'étude au Nouveau Mexique, les 40 puits existants avec et sans complétions, ont fait l'objet non seulement d'une caractérisation géologique et hydrogéologique par diagraphies mais aussi d'une évaluation de l'état des forages tels que leur diamètre et déviation en fonction de la profondeur, et d'une quantification de l'invasion par les fluides de forage (Clayton 2008). Ces mesures ont permis la conception et la complétion de ces forages pour l'eau atteignant les 300m de profondeur pour certains.

Les diagraphies et images en continu dans ces forages ont mesuré:

- la distribution de la porosité totale et efficace, ainsi que la taille des pores pour l'évaluation de la conductivité hydraulique
- la densité globale
- la résistivité électrique globale à des profondeurs d'investigations multiples
- la spectroscopie des rayons gamma induite par neutron, qui fournit les concentrations en hydrogène et en un certain nombre d'autres d'éléments
- le rayonnement gamma spectral naturel fournissant les concentrations en potassium, thorium et en uranium (indicateur de faciès/milieu de dépôt)
- le pendage, l'orientation des fractures, leur ouverture, et la texture géologique
- la vitesse des ondes acoustiques
- l'inclination et l'azimut du forage
- le diamètre du forage.

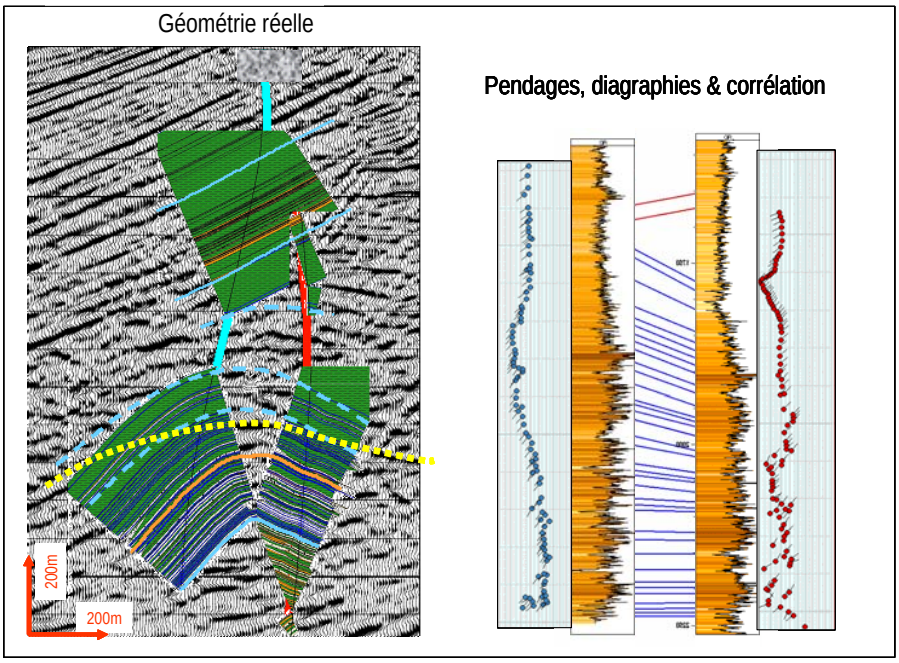


Figure 4 : Les pendages et corrélations de puits à puits tirés des images et diagraphies permettent une reconstruction très précise de la géométrie des structures, ici un anticlinal pincé, même là où leur complexité rend la coupe sismique ininterprétable.

Les données acquises sont visualisées et analysées grâce à des outils type SIG et des bases de données.

Les propriétés structurales, de faciès et pétrophysiques sont obtenues à partir de l'interprétation des diagraphies et des méthodes de géophysique de surface telles que la sismique réflexion ou les méthodes électriques, qui permettent de distribuer les propriétés dans les modèles, i.e. failles, fractures et propriétés des attributs, grâce aux méthodes géostatistiques liant les propriétés pétrophysiques au faciès géologique par la physique des roches et prenant en compte les incertitudes liées aux conversions des mesures et interprétations. Des analyses d'incertitude permettent d'obtenir des estimations plus réalistes de la géométrie des volumes et des propriétés d'écoulement.

Exemples d'applications et résultats

En milieu carbonaté

Dans l'étude de carbonates karstifiés et fracturés, les chemins préférentiels d'écoulement sont localisés et caractérisés dans le forage en employant l'imagerie par micro-résistivité électrique. Ces images permettent la caractérisation de la densité et de l'orientation des réseaux de fractures, ainsi que la reconnaissance des différentes zones du karst.

Dans ces images il est possible d'identifier les fractures dans la zone de surface (epikarst) partiellement remplis d'argile, les conduits verticaux dans la zone de vadose qui montre une zone de percolation où de grandes fractures sont verticalement agrandies par la dissolution, et de larges conduits horizontaux dans la zone phréatique, formés le long du réseau de fracture lié au gradient paleohydrodynamique.

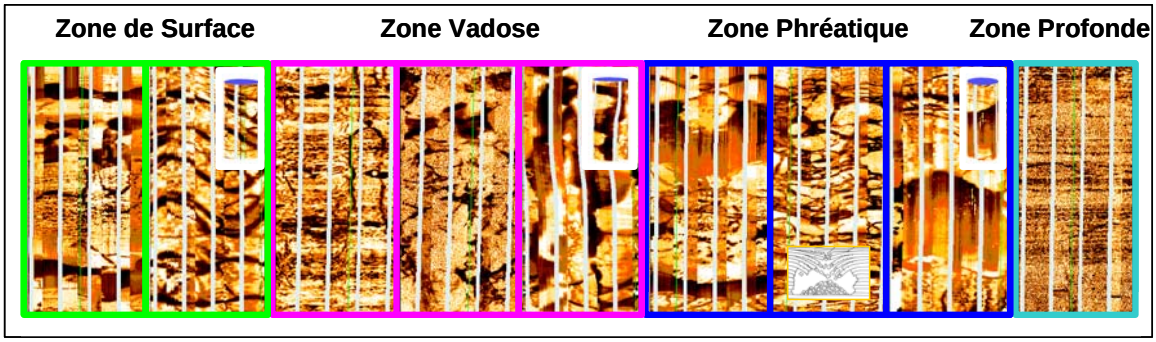


Figure 5 : à l'échelle du forage, l'intégration des données de diagraphies a permis de quantifier le pourcentage des vides des roches carbonatés et d'identifier les différentes zones d'un système karstique où de roches hétérogènes en général. a) un epikarst b) zone de percolation c) zone phréatique d) une zone profonde de roche relativement saine où la dissolution est limitée à des pores non connectés. Un modèle stochastique a pu être reconstitué à partir des données de géophysique de surface et des données de puits.

En complément, la mesure des variations verticales de la charge hydraulique, des gradients régionaux et verticaux, de la conductivité hydraulique, ainsi que des prélèvements d'échantillons sont effectuées par la prise de mesures en continu assurant une meilleure compréhension des variations spatiales et temporelles liées aux hétérogénéités. Il est ainsi possible de mieux apprécier le rôle joué par la matrice, les fractures et les conduits. Une fois intégrées dans les modèles, ces données améliorent la modélisation de la circulation des eaux souterraines dans la zone phréatique.

En milieu détritique

Dans l'étude de formations détritiques, la complexité géologique influence le processus d'intrusion d'eau saline en milieu côtier ou la recharge d'aquifère par injection d'eau pour la mise en place de ressources alternatives.

Aux Emirats Arabes Unis (Figure 6), lors d'un projet de stockage d'eau en aquifère, l'enregistrement des diagraphies a permis de prendre des décisions en temps réel vis-à-vis de la complétion des forages. La combinaison des données obtenues par la prospection électromagnétique de surface, les diagraphies et des tests hydrauliques a permis de caractériser d'anciens paleo-chenaux et d'identifier une barrière hydraulique qui aurait pu affecter la qualité du projet.

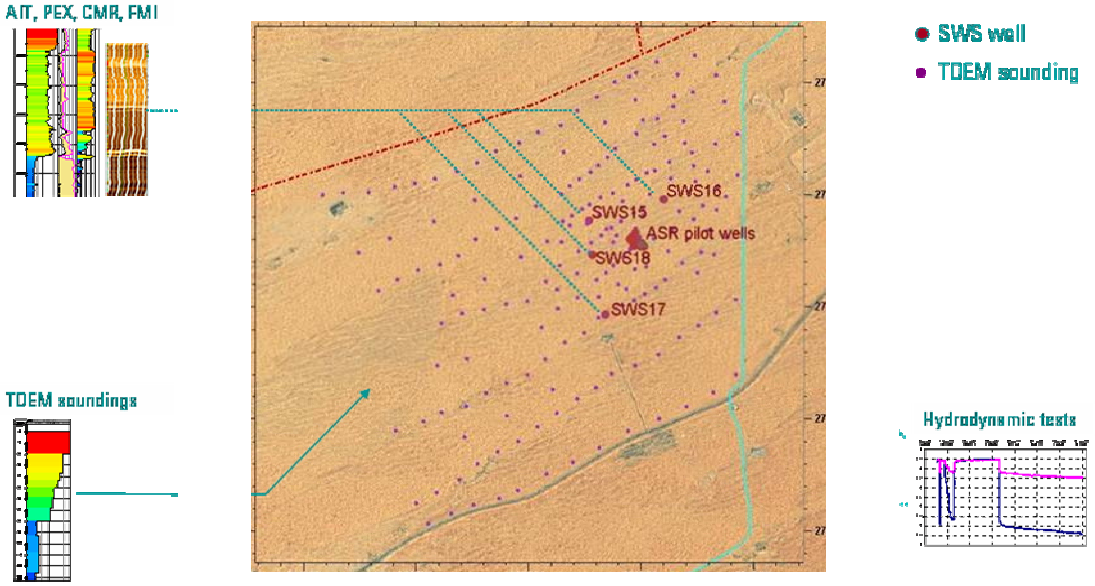


Figure 6 : Mise en place d'un projet de recharge dans un aquifère libre par injection d'eau provenant d'une usine de dessalement d'eau de mer.

Conclusion

L'exactitude croissante des données de forage permet une détermination plus précise des caractéristiques des formations géologiques et de l'état des forages, des aquifère et des aquitards, permettant une modélisation et des simulations plus réalistes et ainsi plus de certitude lors de la prise de décisions opérationnelles.

Les diagraphies de forages peuvent avoir des applications et des objectifs divers comme la gestion active des aquifères, l'optimisation des ouvrages ou des profils d'écoulement des flux. Des diagraphies d'investigation et d'auscultation dans ces puits permettent d'obtenir les principaux paramètres pour l'optimisation de la production, fournissant les données qui alimentent les outils de gestion et les scénarios de prédiction ou simulation de l'offre et de la demande.

Références bibliographiques

Ahr WM, Allen D, Boyd A, Bachman HN, Smithson T, Clerke EA, Gzara KBM, Hassall JK, Murty CRK, Zubari H, Ramamoorthy R (2005) Confronting the Carbonate Conundrum. Oilfield Review, Vol. 17, No. 1, pp.18-29

Akbar M, Alghamdi AH, Allen D, Herron M, Carnegie A, Dutta D, Olesen JR, Chourasiya RD, Logan D, Stief D, Netherwood R, Russel SD, Saxena K (2000) A Snapshot of Carbonate Reservoir Evaluation. Oilfield Review, Vol.12, No.4, pp.20-41

Alger RP, Harrison CW (1989) Improved Fresh Water Assessment in Sand Aquifers Utilizing Geophysical Well Logs. The Log Analyst No 30, p.31-44

Allen D, Crary S, Freedman R, Andreani M, Klopf W, Badry R, Flaum C, Kenyon B, Kleinberg R, Gossenberg P, Horkowitz J, Logan D, Singer J, White J (1997) How to Use Borehole Nuclear Magnetic Resonance. Oilfield Review, Vol. 9, No. 2, pp. 34-57

Clayton N (2008) Characterization of complex hydrogeology and geology at a large environmental site in New Mexico using advanced borehole geophysical data. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), Proceedings 2008

Delhomme JP (1992) A Quantitative Characterization of Formation Heterogeneities Based on Borehole Image Analysis, Society of Professional Well Log Analysts (SPWLA) 33rd Annual Logging Symposium Transactions, vol. 1, Paper T, 25 p.

Delhomme JP, Bedford J, Colley NM, Kennedy MC (1996) Permeability and Porosity Upscaling in the Near-Wellbore Domain: The Contribution of Borehole Electrical Images, Proceedings of the 1996 SPE European Petroleum Conference, vol. 1, paper SPE 36822, pp. 89-101

DePavia L, Heaton N, Ayers D, Freedman R, Harris R, Jorion B, Kovats J, Luong B, Rajan N, Taherian R, Walter K, Willis D, Scheibal J, Garcia S (2003) Next-Generation Wireline NMR Logging Tool. Paper No. 84482-MS, Society of Petroleum Engineers (SPE) Annual Technical Conference and Exhibition, 5-8 October 2003, Denver, Colorado

Etchecopar A, Bonnetain (1992) Cross sections from dipmeter data. American Association of Petroleum Geologists (AAPG) bull, V. 76, N0.5, pp. 621-637

Freedman R, (2006) Advances in NMR Logging. Paper No. 89177-MS SPE Distinguished Author Series in Journal of Petroleum Technology (JPT), Vol. 58, No.1. pp 60-66

Herron SL, Herron MM (1996) Quantitative lithology: An application for Open and Cased Hole Spectroscopy. Transactions of the Society of Professional Well Log Analysts (SPWLA) 37th Annual Logging Symposium, New Orleans, Paper E

Lucia FJ (2000/2001) Linking Petrophysical and Geologic Information: A Task for Petrophysics. Oilfield Review, Vol.12, No. 4, i

Lucia FJ (1995) Rock-Fabric/Petrophysical Classification of Carbonate Pore Space for Reservoir Characterization. American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Vol. 79, Issue 9, pp. 1275-1300

Luthi SM, Souhaité P (1990) Fracture apertures from electrical borehole scans. Geophysics, 55, 7, 821-833

Marfice JP, Snyder G, Schiltz A, Dwyer J (2001) Using Nuclear Magnetic Resonance and Geophysical Logs to Assess Water Quality and Hydraulic Properties of Tertiary Gulf Coast Aquifers: Case Studies, American Water Works Association (AWWA), Annual Technical Conference

Quirein J, Kimminau S, LaVigne J, Singer J , Wendel F (1986) A Coherent Framework for Developing and Applying Multiple Formation Evaluation Models." Paper 1986 DD, transaction of the SPWLA 27th Annual Logging Symposium, Houston

Singer JM, Johnson L, Kleinberg RL, Flaum C (1997) Fast NMR Logging for Bound-Fluid and Permeability Transactions of the SPWLA 38th Annual Logging Symposium, Houston

Turcan AN Jr (1962) Estimating water quality from electrical logs: United States Geological Survey (USGS) Professional Paper 450C, Article 116

Wang D (2005) Karst-Related Water-Control Solutions from Microresistivity Images, Lower Ordovician Reservoirs, China. Society of Professional Well Log Analysts (SPWLA), Spring 2005, Topical Conference

Techniques de forages particulières et réhabilitation

Le diagnostic et la mise en conformité des forages privés en Charente Maritime
par Jacques LEPINE (Syndicat des eaux de la Charente-Maritime)
et Hélène NADAUD (GEOAQUITAINE) 117

L'extraction des crépines par surforage et fishing
par Bernard LAFARGUE (FORADOUR) 135

Chemisage de forage par sertissage interne
par Michel SEGUIN (HYDROINVEST) 139

Gestion d'un champ captant (ville de Tours)
par Philippe MEVELEC (Ville de Tours) 143

Réalisation des sondes géothermiques
par Bruno SEGUIN (VENTILONE) 153

Géothermie à Orly un forage de type pétrolier en centre ville
par Jean-Michel JOUBERT (ANTEA) 159

Le diagnostic et la mise en conformité des forages privés en Charente-Maritime

Jacques Lépine [1], Arnaud Bernard [1], Anthony Martin [1], Hélène Nadaud [2], Gilles Martin [2],

[1] Syndicat des Eaux de la Charente Maritime, BP 517, 17119 Saintes Cedex.
[2] Bureau d'études Géoaquitaine, 19, rigole, 33 133 Galgon.

Résumé

En Charente Maritime, 35 M^3/an d'eau souterraine sont prélevés pour l'eau potable. Les nappes captives, privilégiées pour l'eau potable, sont également exploitées pour l'irrigation. Lors des procédures de périmètre de protection, la mise en conformité des forages privés est la principale mesure de préservation de ces nappes captives. Au cours des cinq prochaines années, 120 ouvrages privés répartis autour de 26 captages d'eau potable devront bénéficier successivement d'un diagnostic et de travaux de mise en conformité.

L'opération a été lancée sous maitrise d'ouvrage du Syndicat, dans le cadre d'une Déclaration d'Intérêt Général (DIG). Le coût du diagnostic est intégralement assuré par le Syndicat. Pour les travaux de mise en conformité éventuels, le propriétaire devra participer à hauteur de 20 %. La phase diagnostic des 120 forages est estimée à 0.9 M€ H.T. et les travaux de mise en conformité (hypothèse haute), à 3 M € H.T. L'opération bénéficie d'aides financières du Conseil Général et de l'Agence de l'Eau Adour Garonne.

Application au domaine Crétacé du Nord-Est de Saintes- Depuis Février 2008**,** le Syndicat a confié à GEOAQUITAINE le suivi et l'interprétation des diagnostics de 22 forages privés situés autour de 8 forages d'eau potable exploitant la nappe captive du Cénomanien. Cette nappe est isolée de la nappe libre du Turonien moyen, touché par les nitrates et pesticides, grâce aux marnes du Turonien inférieur et aux calcaires marneux et argiles du Cénomanien supérieur.

Sur les 22 forages privés (14 agricoles, 1 pisciculture, 1 domestique, 6 inexploités), 1 seul est conforme. Le bilan est le suivant :

- 4 forages exploitant principalement le réservoir du Turonien libre devront être mis en conformité pour ne capter que le Turonien pour un montant de travaux estimé à 39 000 € ;
- 5 forages prélevant à part égale dans le Turonien libre et le Cénomanien captif conduiront à la réalisation de 5 ouvrages complémentaires pour un montant de travaux estimé à 213 000 € ;
- 10 forages s'adressant presque exclusivement au réservoir captif du Cénomanien seraient mis en conformité pour ne capter que le Cénomanien pour un montant de travaux estimé à 336 000 € ;
- 1 forage a été rebouché et un 1 autre est à reboucher (19 000 €) ;
- 1 forage conforme sans travaux.

Le coût total des travaux de mise en conformité est estimé à 607 000 €. La solution proposée doit être comparée à une substitution partielle ou totale des prélèvements en nappe captive qui s'élève à 600 000 m^3/an.

I- INTRODUCTION

L'alimentation en eau potable du Département de la Charente Maritime (50 Mm^3/an) est assurée à 70% par des prélèvements en eau souterraine.

Environ 35 Mm^3/an sont produits à partir d'une centaine de puits ou de forages d'eau potable provenant des nappes contenues dans les formations sédimentaires d'âge secondaire du Nord du bassin aquitain.

Le complément provient des eaux de surface (15 Mm^3/an) prélevées dans le fleuve Charente et les barrages vendéens.

Sur l'ensemble du département (cf. fig. n°1), les eaux souterraines sont également exploitées pour l'irrigation avec des prélèvements de l'ordre de 100 Mm^3/an à partir d'environ 3500 forages privés (1,2).

45 % des captages d'eau potable exploitent des nappes libres à semi-captives (de 10 à 50 m de profondeur).

La dégradation qualitative (nitrates, produits phytosanitaires) des nappes libres a conduit à substituer progressivement ces prélèvements par des forages en nappes captives.

55 % des captages d'eau potable sollicitent les nappes captives d'excellente qualité bénéficiant d'une protection naturelle efficace.

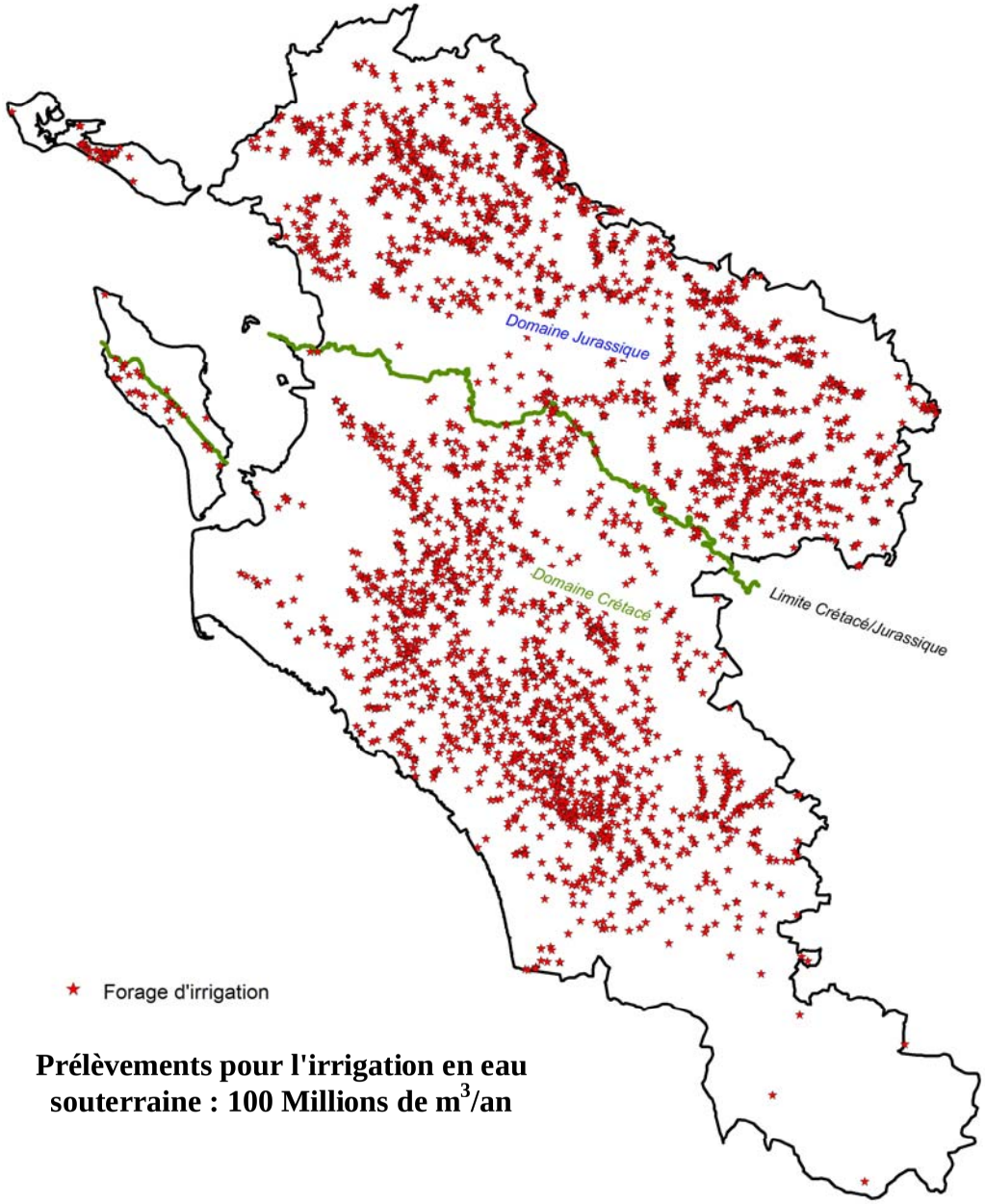
Ces nappes, principalement développées dans le domaine crétacé (de 50 à 500 m de profondeur), sont de plus en plus sollicitées pour l'alimentation en eau potable. Le principal risque de pollution est la présence de forages privés n'assurant pas l'isolation entre la nappe libre vulnérable aux pollutions de surface et la nappe captive d'excellente qualité. Le maintien de la qualité de ces nappes captives passe par le diagnostic et la mise en conformité de ces forages privés.

II- HISTORIQUE DE LA DEMARCHE ET CONTEXTE REGLEMENTAIRE-

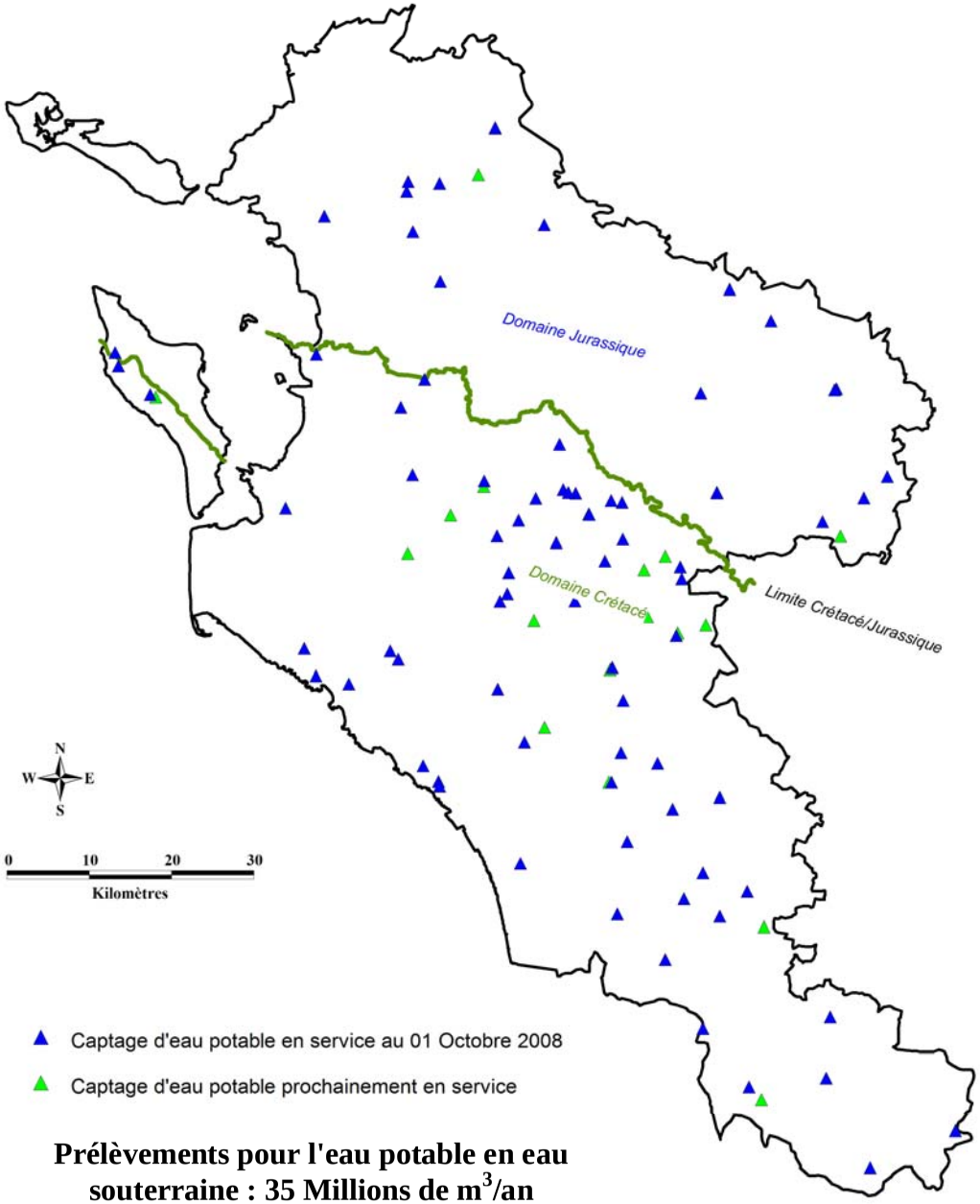
En 1995/1996, les premiers dossiers de périmètres de protection sont soumis à l'avis de la Commission Spécialisée Captages mise en place par le Préfet. Il s'agit de forages profonds qui exploitent des nappes captives bénéficiant d'une protection naturelle efficace. Les hydrogéologues agréées signalent que le seul risque de pollution réside en la présence de plus de 20 forages privés (irrigation, pisciculture, usage domestique,..) qui ne bénéficient pas d'équipements satisfaisants pour assurer l'isolation entre la nappe captive utilisée pour l'eau potable et les eaux superficielles sus-jacentes.

Ces dossiers sont soumis à enquête publique et le commissaire enquêteur pose la problématique de la prise en charge technique, administrative et financière pour la mise en conformité de ces forages privés. Les agriculteurs irrigants font savoir que leur forage est déclaré (récépissé DDAF 17, redevance acquittée auprès de l'Agence de l'Eau Adour Garonne) et qu'il est réalisé « aux normes de l'époque ».

Figure n°1 : Répartition des forages d'eau potable et des forages d'irrigation en Charente-Maritime



Prélèvements pour l'irrigation en eau souterraine : 100 Millions de m^3/an



Prélèvements pour l'eau potable en eau souterraine : 35 Millions de m^3/an

La mesure B26 du récent SDAGE Adour Garonne (3) précise que les forages doivent respecter l'isolation internappes et qu'un diagnostic et un programme de mise en conformité adapté par département sont recommandés. En Charente Maritime, des régularisations de plusieurs centaines de forages d'irrigation ont lieu et un document d'incidence au titre de la Loi sur l'Eau (décret 93-742) aurait pu être demandé, exigeant que l'isolation entre les nappes soit respectée.

Malgré l'avis favorable du commissaire enquêteur, les arrêtés préfectoraux instituant les périmètres de protection n'ont pas été signés, faute de règles bien établies.

En mai 1999, le Ministre du Territoire et de l'Environnement est saisi par écrit sur la réhabilitation des forages privés. Les principaux éléments de la réponse sont les suivants :

- la conformité de l'ouvrage privé est appréciée grâce au document d'incidence disponible ;
- le diagnostic est à la charge de l'eau potable et la mise en conformité à la charge du propriétaire.

En 2000, devant l'absence de solutions identifiées et le blocage des procédures de mise en place des périmètres de protection, la *"Commission Spécialisée Captages"* mise en place par le Préfet a établi le constat suivant :

- la préservation de la qualité des nappes captives profondes dépasse largement le cadre des périmètres de protection et s'intègre dans une gestion globale de la ressource;
- la mise en conformité des forages privés est la principale mesure à mettre en place pour préserver ce type de nappe.

Le recensement des secteurs prioritaires où la qualité des nappes captives du Crétacé est à préserver est engagé et les priorités pour les travaux de mise en conformité des forages privés sont définies. Ainsi, sur les 3500 forages d'irrigation du département, 2000 forages sont recensés dans le domaine crétacé et 600 sont susceptibles d'exploiter une nappe captive sans toutefois être équipés d'un tubage et d'une cimentation efficaces pour assurer l'isolation entre les nappes [1].

En Mai 2003, sont signés par les différents acteurs de l'Eau (Préfecture, Conseil Général, Chambre d'Agriculture, Agence de l'Eau Adour Garonne, Syndicat des Eaux) les deux protocoles suivants :

- *"protocole pour la préservation qualitative des nappes du Crétacé en Charente-Maritime"* (4,5) qui délimite les secteurs où les nappes captives doivent être prioritairement réservées pour l'eau potable ;
- *"protocole pour la mise en conformité des forages privés dans le département de la Charente Maritime"* (6) qui découle du protocole précédent en conduisant à restaurer l''isolation internappes des forages privés recoupant les nappes captives à préserver.

III - MISE EN OEUVRE DES PROTOCOLES

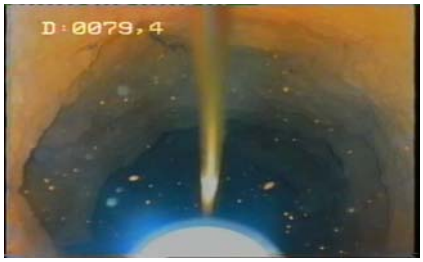
La mise en conformité des forages privés qui comporte les deux phases suivantes :

- **Le diagnostic** qui débute par l'identification des formations géologiques imperméables assurant l'isolation entre les nappes et le contrôle de la qualité de l'eau pompée par le forage. Les venues d'eau provenant des différents aquifères traversés (libre et captif) ainsi que les éventuels échanges sont quantifiés.

  Une réflexion devra alors être engagée vis à vis de la nappe à utiliser pour l'irrigation (nappe libre ou nappe captive, réalisation d'un ouvrage complémentaire captant uniquement la première nappe, retenue de substitution,..).

Passage caméra vidéo dans un forage d'irrigation

- **Les travaux de mise en conformité** devront être discutés et validés par une instance afin de vérifier la cohérence de la solution proposée vis-à-vis des objectifs de préservation et de gestion de la ressource ou bien des possibilités de réalisation de retenues de substitution.



Identification des venues d'eau dans le réservoir carbonaté à -79.4 m/sol

En conséquence, ces dispositions vont conduire à des règles de gestion et des mesures de compensation pour satisfaire les besoins des usagers. Notamment, il est envisagé :

- de créer, si nécessaire, des retenues de substitution aux prélèvements existants;
- d'établir un programme annuel de mise en conformité des forages privés;
- d'implanter des piézomètres de contrôle pour le suivi de qualité et prévenir le dénoyage des nappes.

Les règles administratives et financières devaient intégrer la contrainte suivante : l'intervention en domaine privé avec un financement public sur des ouvrages privés présentant des situations administratives très variées.

A la demande des financeurs, la maitrise d'ouvrage pour le diagnostic et la mise en conformité des forages privés est attribuée au maître d'ouvrage de l'eau potable. La possibilité de pouvoir intervenir en domaine privé avec des fonds publics ne peut être possible qu'après avoir réalisé une **D**éclaration d'**I**ntérêt **G**énéral (**DIG**) (7).

Les règles de financement sont les suivantes : le diagnostic est intégralement assuré par le maître d'ouvrage de l'eau potable alors que pour les travaux de mise en conformité éventuels, le propriétaire devra participer à hauteur de 20 % du montant des travaux. L'intervention se fait dans le cadre d'une convention avec le propriétaire du forage.

Après enquête publique, l'arrêté préfectoral en date du 26 février 2007 autorise le Syndicat à lancer l'opération. Répartis autour de 26 captages d'eau potable, 120 ouvrages privés devraient bénéficier prioritairement d'un diagnostic préalable à une éventuelle mise en conformité.

Le coût de l'opération- L'opération est programmée sur cinq années. Le diagnostic des 120 forages est estimé à 900 000 € H.T, échelonné sur 5 ans. Si l'ensemble de ces forages devait être mis en conformité (hypothèse haute), le coût des travaux de mise en conformité pourrait avoisiner les 3 M € H.T. L'opération bénéficie d'aides financières du Conseil Général et de l'Agence de l'Eau Adour Garonne.

IV– APPLICATION AU DOMAINE CRETACE : LE NORD-EST DE SAINTES-

Située au Nord-Est de l'agglomération de Saintes, la première année de cette opération pluriannuelle diagnostics concernait 22 forages privés situés autour de 8 forages d'eau potable exploitant la nappe captive du Cénomanien.

4.1- Contexte hydrogéologique

Le secteur concerné se situe dans la partie nord du bassin aquitain, en domaine Crétacé. Le Cénomanien carbonaté traduit la transgression marine amorcée depuis l'Infra-Cénomanien sur des formations du Jurassique Supérieur. Le secteur d'étude se situe dans le Synclinal de Saintes impliquant des formations allant de l'Infra-Cénomanien au Campanien final**.**

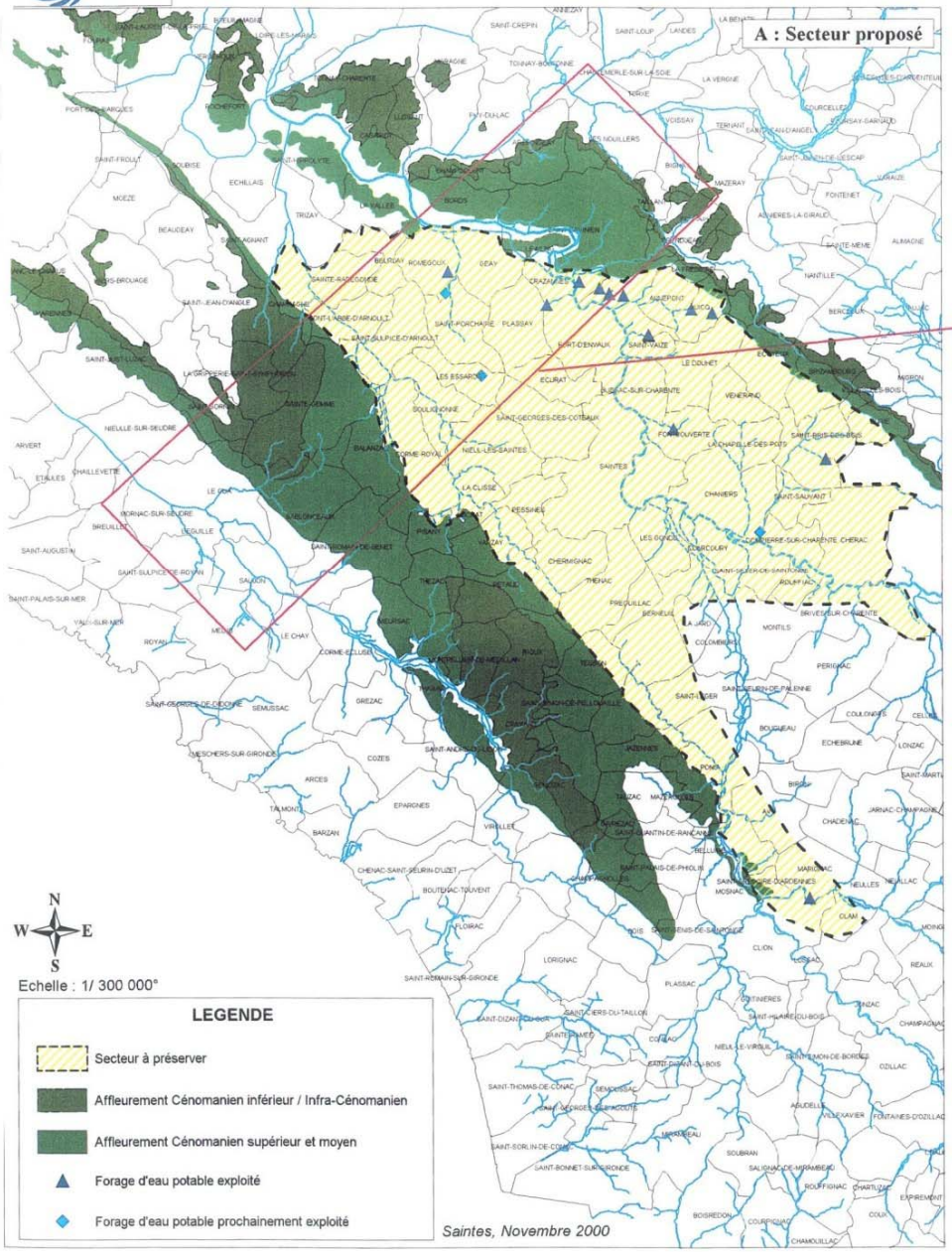
Affleurements et aire d'alimentation- Les carbonates du Cénomanien (Fig. n° 2) d'épaisseur variable, affleurent sur les flancs nord-est (de l'île Madame à Burie) et sud-ouest (de Port des Barques jusqu'à Marignac) du synclinal de Saintes et sur le flanc sud-ouest de l'anticlinal de Jonzac (de l'île d'Oléron à Bois) (5,8,9).

Figure n°2 : Délimitation géographique de l'aquifère du Cénomanien

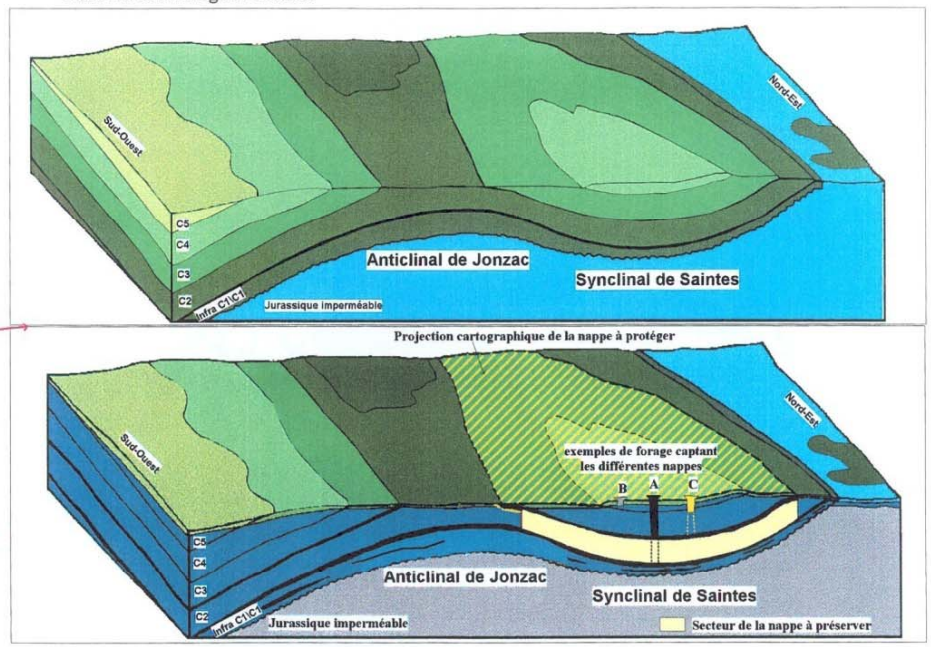
SYNDICAT DES EAUX CHARENTE-MARITIME

Planche n°5 : Délimitation proposée pour la préservation qualitative du Cénomanien carbonaté C2

A : Secteur proposé



B : Bloc diagramme schématique matérialisant les formations géologiques du Crétacé supérieur dans les deux mégastructures



C : Bloc diagramme schématique illustrant la nappe captive du Cénomanien carbonaté et la projection cartographique (Ouvrages captant la nappe : A:à préserver / B:libre / C:captive autre, cf planche suivante)

Turonien C3	*Imperméable :*	*Inférieur ("Ligérien", épaisseur de 5 à 15 m): marnes et calcaires marneux*
(-90 M.A.) *Cénomanien C1 et C2*		*Supérieur C2 (environ 20 m) : calcaire marneux, calcaire gréseux, argile gréseuse à glauconie*
	Nappe du Cénomanien carbonaté C1 et C2	*Moyen C2 (environ 25 m) : calcaire* *Inférieur C1 (30 à 40 m) : alternances de calcaire, grès, sables et argiles*
Infra-Cénomanien Infra C1 *(-95 M.A.)*	*Imperméable :*	*Inférieur basal : Prédominance de faciès gréso-argilo-sableux (épaisseur extrêmement variable)*
		Argile de la partie sommitale (épaisseur de 10 à 20 m. environ)

D : La nappe captive du Cénomanien carbonaté et les imperméables responsables de sa mise en pression

Figure n°3 : PIEZOMETRIE DE LA NAPPE DU CENOMANIEN DANS LE SYNCLINAL DE SAINTES
avril 2003 avec ajout nouveaux forages - ECHELLE 1/150 000

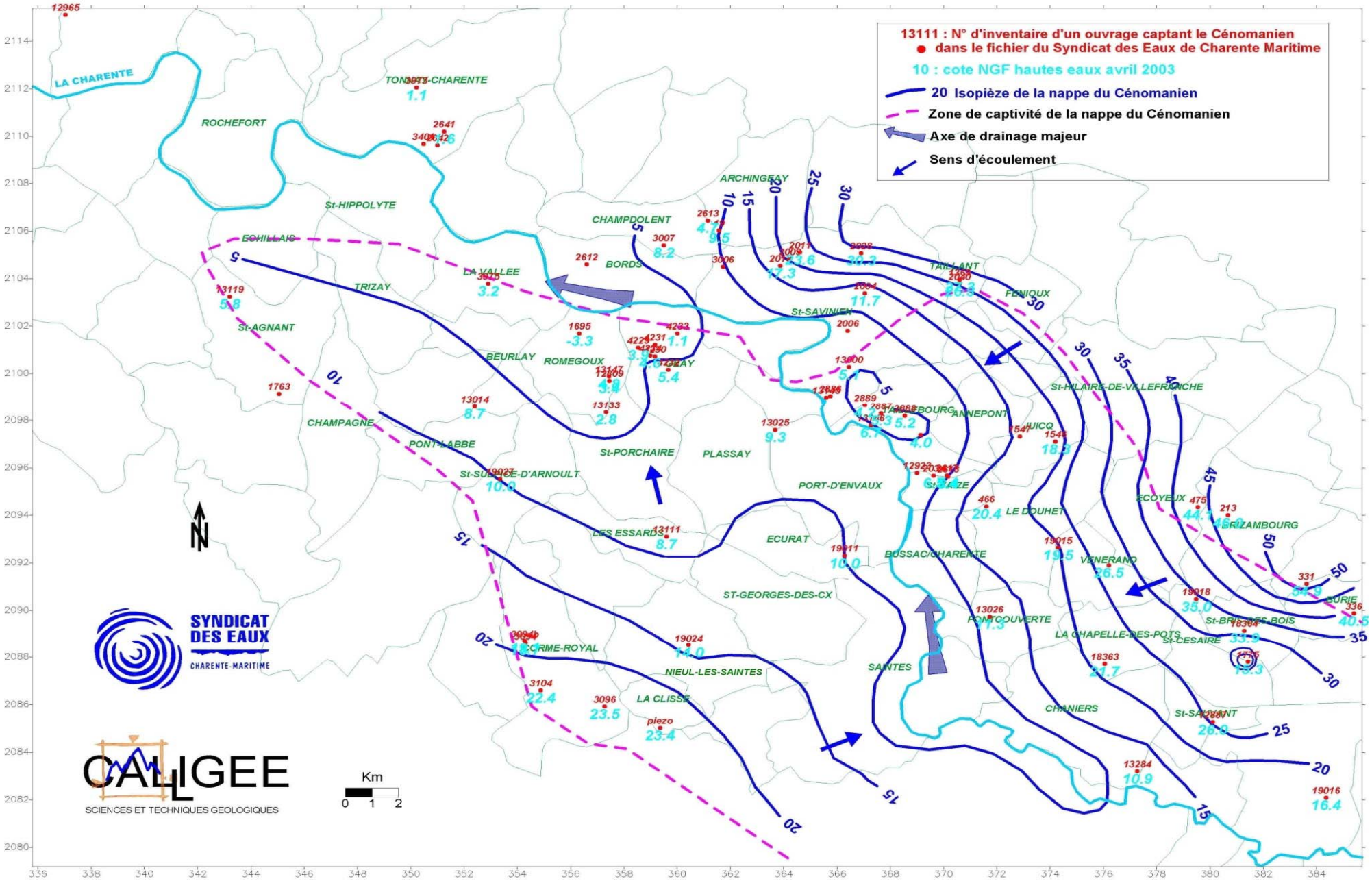
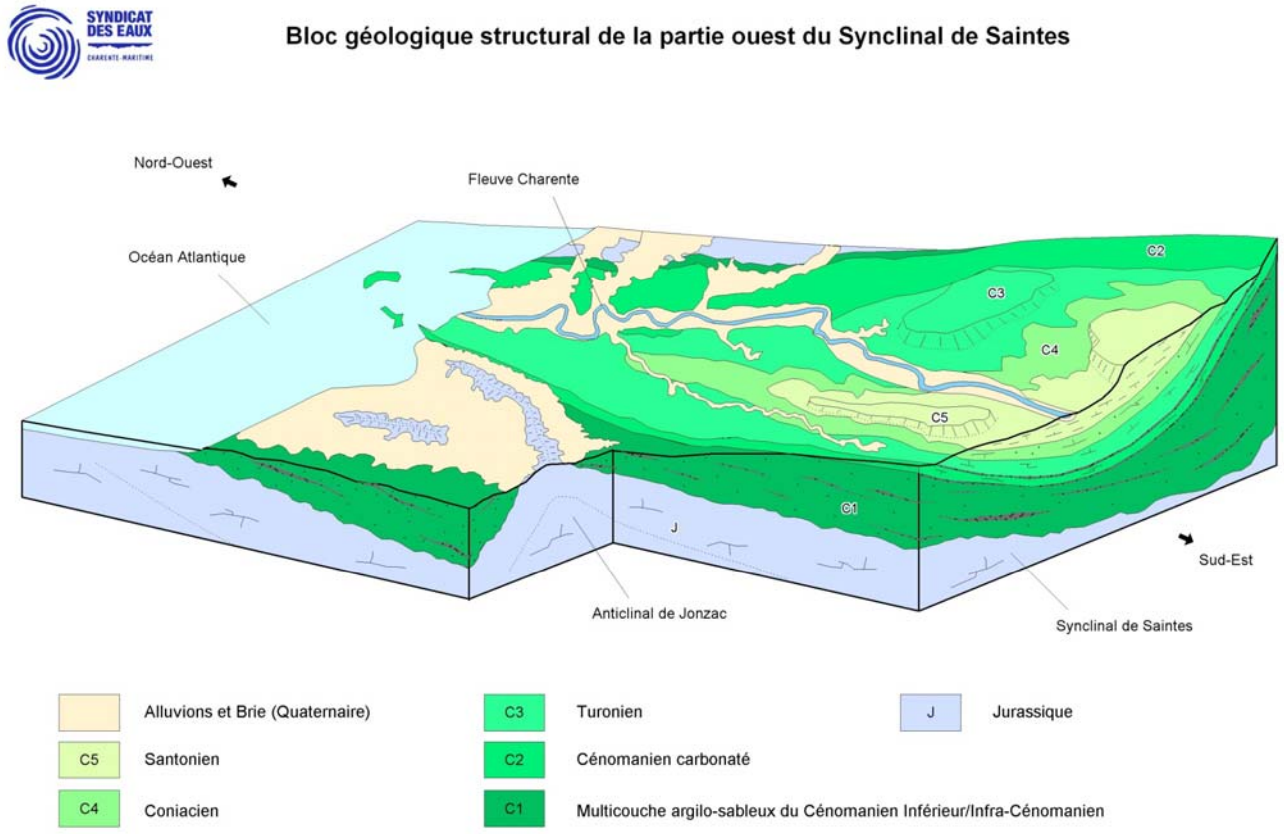
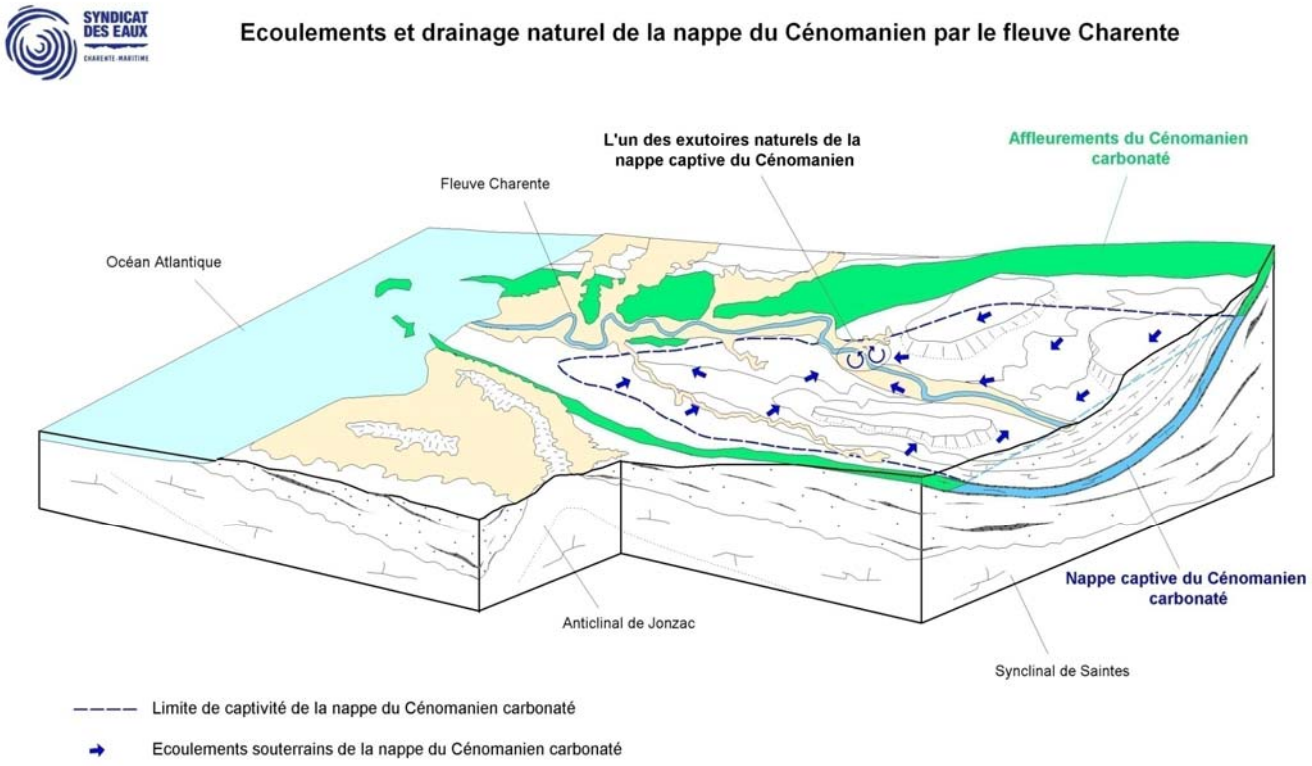


Figure n°4 : Esquisses structurale et piézométrique dans le Synclinal de Saintes





Sommet et base de la nappe captive du Cénomanien carbonaté - Ils sont définis dans le schéma ci-dessous :

Turonien moyen C3 moyen	***Nappe du Turono-coniacien C3 & C4***	Moyen C3 (≈ 40 à 100 m) : calcaire bioclastique
Turonien C3inf	***Imperméable :***	Inférieur *("Ligérien"*, ép.: 5 à 15 m) : marnes et calcaire marneux
Cénomanien C1 & C2		Supérieur C2 (≈ 20 m) : calcaire marneux nodulaire, calcaire gréseux et argile gréseuse à glauconie
	Nappe du Cénomanien carbonaté C1 & C2	Moyen C2 (≈ 25 m) : calcaire bioclastique à rudistes et alvéolines Inférieur C1 (30 à 40 m) : alternances de calcaire bioclastique, de grès et sables argileux
	Imperméable :	Inférieur basal : prédominance de faciès gréso-argilo-sableux (Épaisseur extrêmement variable)
Infra-Cénomanien Infra C1		Argile de la partie sommitale (ép.: ≈10 à ≈20 m)

Ecoulement et exutoires de la nappe captive du Cénomanien carbonaté (Fig. n° 3 & 4) - Plusieurs campagnes piézométriques sur la nappe libre du Turonien et la nappe captive du Cénomanien carbonaté ont été réalisées (Mars et Septembre 1998, Octobre 1999, Avril 2003). L'alimentation de la nappe captive du Cénomanien est assurée grâce aux affleurements du flanc nord-ouest, en rive droite de la Charente (secteur de Grandjean, Burie-Ecoyeux) ainsi que très probablement ceux du flanc sud-ouest développés le long de la vallée de l'Arnoult (secteur Pont l'Abbé, Soulignonne, La Clisse) (1,9,10,11).

L'un des exutoires de la nappe captive du Cénomanien se localise entre Taillebourg et St Savinien, lorsque les formations imperméables du Turonien et du Cénomanien Supérieur sont naturellement entaillées par la vallée alluviale de la Charente.

Qualité de l'eau brute – Lorsque la nappe est captive, la ressource est d'excellente qualité. Les teneurs en nitrates sont inférieures à 15 mg/l sauf pour un champ captant situé en limite de captivité (15 $\leq NO_3^- \leq$ 27 mg/l).

4.2 – Résultats des diagnostics

La campagne de diagnostic s'est déroulée de février à juin 2008, avec une coordination entre le Syndicat des Eaux, l'entreprise de forage chargée des travaux sur les ouvrages (Entreprise MASSE), les sociétés de diagraphies (Géo Hydro Investigation et Hydro Assistance) et le bureau de contrôle et d'interprétation (Géoaquitaine).

Sur les 22 forages privés, 14 sont utilisés pour l'irrigation, 1 pour une pisciculture, 1 pour un usage domestique, 6 ne sont plus exploités. L'étude de ces forages s'est appuyée sur trois axes différents mais complémentaires :

- analyse des eaux prélevées (campagne d'analyses d'août 2007 complétée en 2008),
- examen visuel des têtes de forages,
- diagnostic classique avec : dépose des équipements, caméra vidéo, diagraphies gamma-ray, résistivité, température/conductivité, micro-moulinet, pompages puis repose des équipements avant la saison d'irrigation 2008.

• **Les analyses d'eau -** Les analyses d'eau ont été effectuées sur différents points d'eau afin de comparer les caractéristiques de chaque groupe :

- les analyses des sources alimentées par la nappe libre du Turonien confirment notamment une importante pollution par les nitrates (30 à 50 mg/l) et les pesticides,
- les eaux des forages AEP exploitant exclusivement la nappe captive du Cénomanien moyen sont pauvres en nitrates (5 à 10 mg/l). De plus, elles indiquent des différences sensibles pour certains paramètres par rapport à la nappe libre (calcium, chlorures, sulfates plus faibles, magnésium plus élevé…).

Les analyses d'eau des ouvrages à diagnostiquer permettent par comparaison de calculer le pourcentage du mélange entre les eaux de la nappe libre et de la nappe captive. Le tableau ci-dessous rassemble trois exemples représentatifs de ces mélanges.

Composés en mg/l	**Moyennes Cénomanien**	**Moyennes Turonien**	**Teneurs mesurées au forage n° 465**	**% C - T**	**Teneurs mesurées au forage n° 469**	**% C - T**	**Teneurs mesurées au forage n° 473**	**% C - T**
Cl	**24**	**36**	24	**100-0**	27	**60-40**	36	**0-100**
SO4	**7**	**15**	7	**100-0**	9	**70-30**	10	**50-50**
NO3	**8**	**40**	9	**90-10**	23	**50-50**	40	**0-100**
Ca	**122**	**135**	124	**85-15**	123	**80-20**	132	**25-75**
Mg	**10**	**3**	8	**75-25**	3	**0-100**	4	**20-80**
K	**1**	**1,6**	1	**100-0**	1,6	**0-100**	1,6	**0-100**
Moyenne des %				**85-15**		**60-40**		**20-80**

Pour une majorité de forages, ces analyses ont mis en évidence des mélanges plus ou moins importants entre ces deux nappes.

• L'examen direct des forages

Les observations visuelles directes, effectuées lors des diagnostics, ont permis de relever de nombreuses anomalies vis-à-vis des forages étudiés :

- absence totale de protection vis-à-vis des écoulements de surface (aucune dalle cimentée, tubage à ras du sol..) avec parfois une déclivité vers la tête de forage,
- activités à risque à proximité du forage (ferme, circulation de camions…)
- caisson bétonné autour de la tête mais intrusions d'eau toujours possibles…

Un des ouvrages, implanté en bordure d'un ruisseau temporaire, est notamment remarquable par la présence d'un trou de ragondins qui met directement en relation le lit du ruisseau et le forage. Dès que des eaux s'écoulent dans ce cours d'eau, elles alimentent le forage.

Forage 4071

Forage 1550

Forage 469

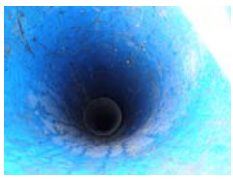
Forage 2035

Forage 1987

Les manutentions des pompes et des colonnes d'exhaure, nécessaires à la réalisation des diagnostics, ont permis également de constater que de nombreux forages avaient des équipements fortement dégradés, avec un vieillissement important des aciers : corrosion des colonnes d'exhaure avec parfois des tubes percés, brides détériorées avec risques de rupture…

L'examen visuel des tubages en tête de forage met également en évidence une dégradation des tubages acier. Les tubes PVC sont nettement en meilleur état

Forage 474



Forage 473

• La caméra vidéo- Le passage caméra dans les forages permet de contrôler de nombreux paramètres :

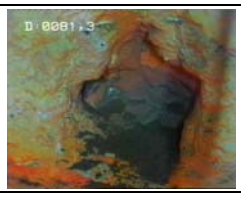
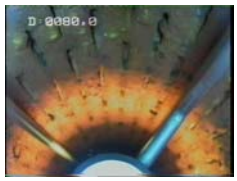
- nature et état des tubages,
- position des raccords entre tubages,
- présence et nature des crépines,
- anomalies sur l'équipement (trous de manutention…),
- profondeur des forages,
- présence d'objets divers (crépine de pompe, morceaux de tubage, attaches type Colson…),

Lors de nos investigations, la vidéo a permis de confirmer pour de nombreux forages des chutes d'eau en partie haute des tubages (écoulements par les trous de manutention ou par les crépines).

Ces chutes étaient parfois audibles en tête d'ouvrage. Dans certains forages, des flux majoritairement descendants ont pu également être observés dans la partie immergée (déplacements rapides de particules depuis le haut vers le fond sans pompage dans l'ouvrage).

Pour quelques ouvrages partiellement en trou nu, la vidéo a permis de faire des observations géologique : présence de fissures, fractures et cavités karstiques dans les calcaires, fossiles plus ou moins identifiables, niveaux marneux avec parfois des zones d'éboulements…

Quelques photographies sont extraites pour exemple :

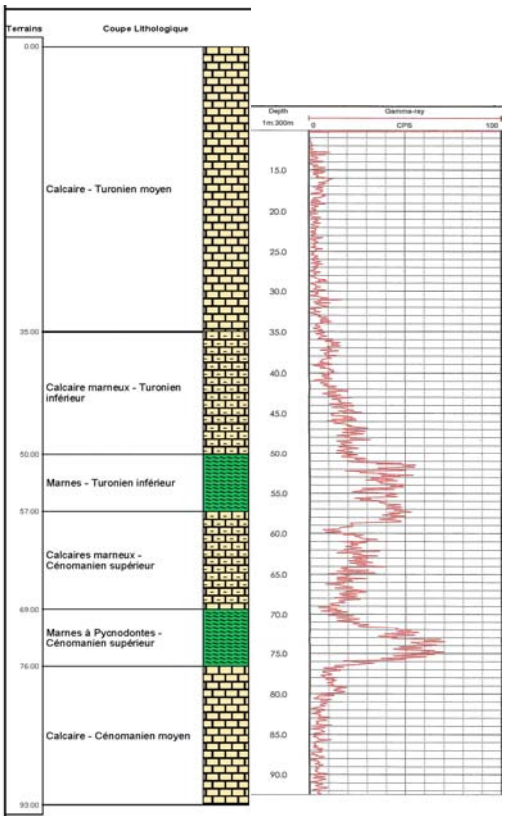
Dégradations des tubages acier		*Trou de manutention*	*Végétation à 2,80 m*	*Crépine colmatée par floc bactérien*
				
Marnes à Pycnodontes	*Morceaux de tubage dans une cavité*	*Petites cavités dans le calcaire et dépôts divers*		*Crépine corrodée et en partie colmatée*

• **Les diagraphies gamma-ray**- La quasi-totalité des forages diagnostiqués ont été réalisés il y a plus de 15 ou 20 ans, sans suivi géologique.

Les données sur la nature des formations géologiques recoupées sont donc très rares et plus ou moins fiables. Des diagraphies gamma-ray ont donc été réalisées sur tous les forages.

Dans le contexte géologique local, plusieurs marqueurs très nets sont visibles : les marnes du Turonien inférieur et celles du Cénomanien supérieur (marnes à pycnodontes). Les enregistrements gamma-ray ont ainsi permis de reconstituer la coupe géologique pour tous les forages.

Ces coupes sont parfois incomplètes du fait d'éboulements, notamment au droit des marnes à Pycnodontes ou de remblais en fond de forage (remplissage par des sédiments meubles).

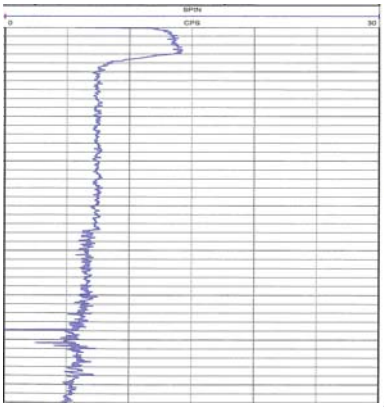


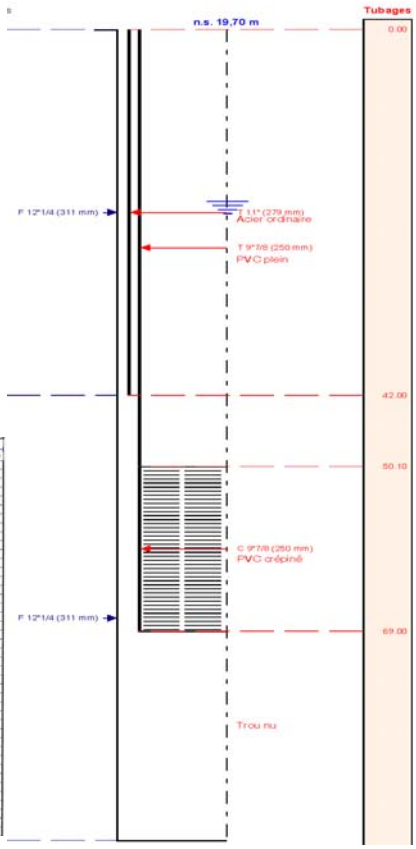
• **Les diagraphies de flux ou micro-moulinet-** Sur de nombreux forages, les micro-moulinets en mode statique ont confirmé l'existence de flux descendants entre la nappe libre du Turonien et la nappe captive du Cénomanien.

Pour les micro-moulinets en mode dynamique (pompage), les rabattements parfois importants ont parfois limité les mesures. Une estimation de la répartition globale des flux entre les deux aquifères a toutefois pu être réalisée pour chaque forage. Ces valeurs sont tout à fait comparables avec les répartitions obtenues par l'examen des analyses d'eau. Le graphique ci-contre en exemple permet d'identifier la répartition suivante :

- 45 % du débit provient de la nappe libre du Turonien, avec probablement des apports notables à l'arrière du tubage plein, non cimenté,
- 10 à 15 % du débit est obtenu au droit des calcaires du Cénomanien entre 80 et 85 m,
- 40 % transite par le fond du forage en partie remblayé par des sédiments meubles.

Pour ce forage, l'analyse d'eau avait permis d'identifier une répartition avec 40 % au Turonien et 60 % au Cénomanien.

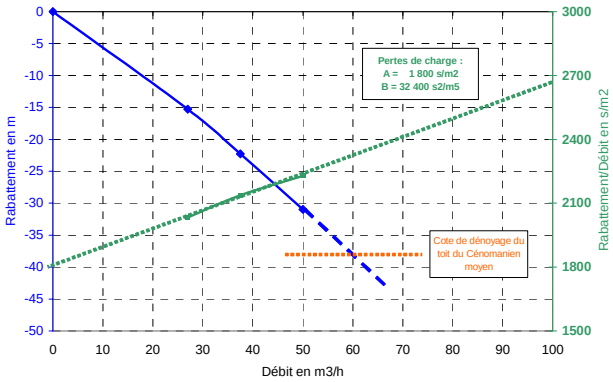




• Les autres diagraphies

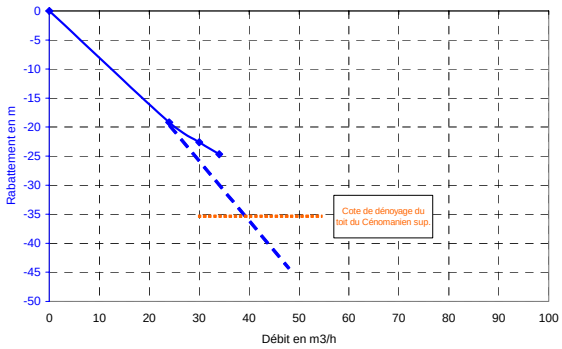
Des mesures de résistivité, de température et de conductivité des eaux ont été également réalisées. Dans le contexte de l'étude, elles n'ont pas apporté d'éléments pertinents pour la réhabilitation des forages.

• Les pompages



Pour chacun des forages, des tests de pompage ont été réalisés avec un essai de puits (3 paliers enchaînés), et un essai de nappe (pompage de 12 à 24 heures). Ces données ont permis de constater des risques de dénoyage de l'aquifère captif pour de nombreux forages, confirmant les observations de terrain (pompes de certains irrigants en fond de forage).

Des réalimentations induites par les rejets en cours de pompage ont pu également confirmer la participation de la nappe libre du Turonien à l'alimentation. L'absence de cimentation est bien confirmée par ces observations.



Les débits spécifiques sur ces ouvrages sont moyens (1 à 5 m^3/h/m). 2 à 3 forages sortent du lot avec des valeurs de 10 à 25 m^3/h/m. Les pertes de charge sont souvent importantes, en liaison avec une dégradation des équipements (crépines colmatées, productivité par les fonds de forage en partie remblayées…)

Sur les 22 forages étudiés, 16 sont exploités dont une dizaine présentent des risques forts de dénoyage de l'aquifère captif en pompage.

4.3 – Synthèse des diagnostics et propositions de réhabilitation

Les examens réalisés sur 22 forages privés ont permis :

- de constater que la plupart d'entre eux présente des équipements fortement dégradés, avec peu ou pas de protection vis-à-vis des infiltrations des eaux de surface (têtes de forage non étanches), et des tubages corrodés,
- de mettre en évidence une absence de cimentation au droit de la nappe libre du Turonien, avec une communication entre les nappes (flux descendant Turonien vers Cénomanien)
- d'évaluer pour chacun des ouvrages la répartition des apports entre la nappe libre du Turonien et la nappe captive du Cénomanien en croisant les données de chimie des eaux et les diagraphies de flux. Le tableau ci-dessous synthétise les résultats obtenus :

Part du Turonien (en %)	Part du Cénomanien (en %)	Nombre de forage
100	0	4
75-80	20-25	3
50	50	2
20-25	75-80	7
0	100	6
	Total	22

Pour une douzaine d'ouvrages, les apports du Turonien sont sensibles à très importants. Pour 6 forages les apports du Cénomanien sont prépondérants (voisins de 100 %), sans pour autant être totalement protégés des apports de surface (pas de cimentation au droit du Turonien souvent improductif sur ces ouvrages).

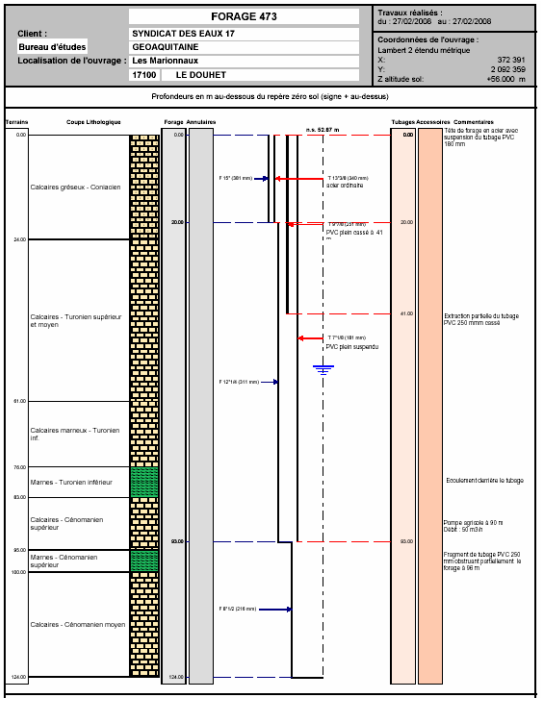
Un seul forage a été diagnostiqué comme conforme aux règles de l'art, sans travaux de mise en conformité à prévoir. Pour tous les autres, des travaux de réhabilitation ont été préconisés en tenant compte de différents paramètres :

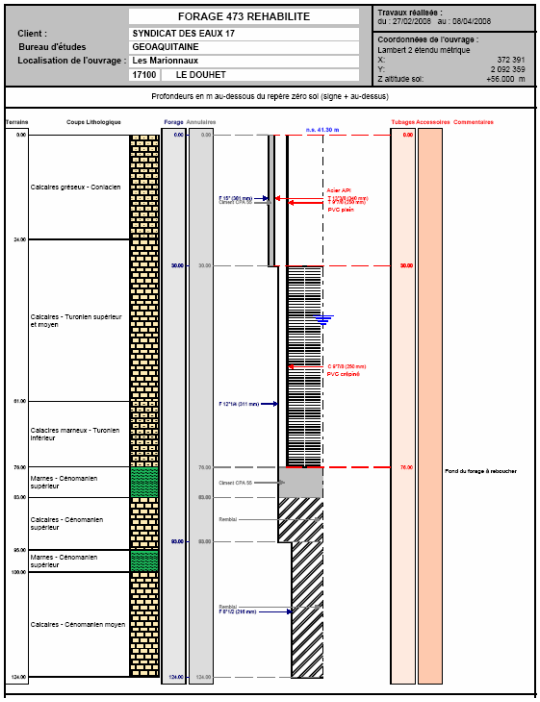
- coupes géologiques obtenues par les diagraphies gamma-ray,
- choix de l'aquifère le plus productif à conserver,
- nécessité de réaliser un deuxième forage pour compenser la perte de débit.

Selon les cas, la mise en conformité privilégie l'aquifère du Turonien ou celui du Cénomanien moyen. Les travaux conduiraient probablement à réduire les pertes de charge et ainsi d'améliorer la productivité des forages. Pour le Cénomanien moyen, les travaux permettront souvent le nettoyage du fond de l'ouvrage (venues d'eau actuellement en partie masquées). Cette formation carbonatée ne présente pas risque d'éboulements ou d'apport de fines. Elle sera donc équipée sans tubage crépiné.

Les exemples de réhabilitation ci-après permettent de visualiser les différentes possibilités.

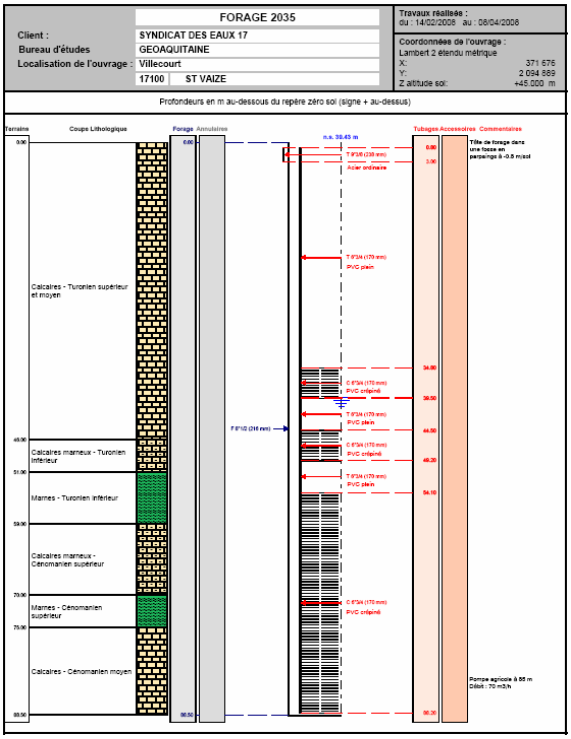
• **Forage mis en conformité au Turonien** (productivité actuelle : Turonien > 75 à 80 %)

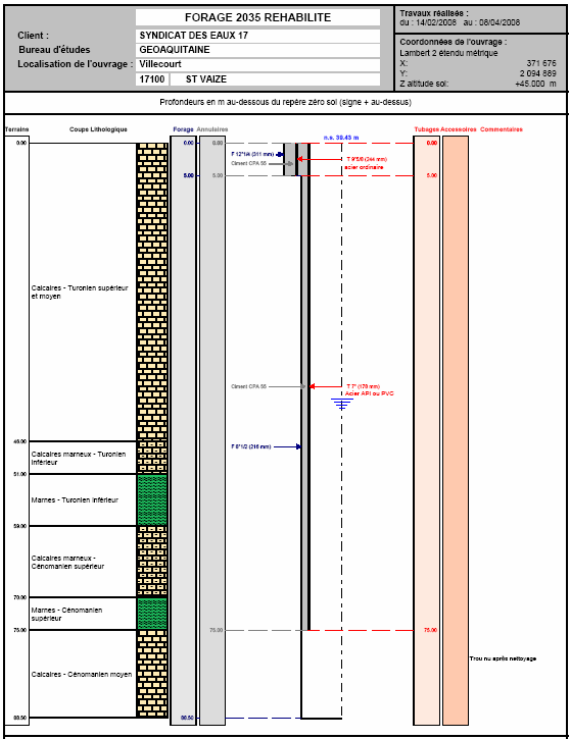




Note : des venues de sables provenant du Coniacien sont possibles. Une crépine est donc préconisée.

• **Forage mis en conformité au Cénomanien** (productivité actuelle : Cénomanien > 75 à 80 %)





•

Autres cas (productivité répartie entre Turonien et Cénomanien)
Pour ces sites, le forage actuel sera réhabilité en conservant le Cénomanien et un deuxième forage sera réalisé pour exploiter le Turonien productif.

• **La synthèse des travaux à réaliser et leur coût estimatif** est présentée dans le tableau ci-dessous :

	Nombre de forages	Coût en Euros
Pas de travaux	1	-
Rebouchage	1*+2	19 000
Cénomanien à réhabiliter avec Turonien à créer	5+5	213 000
Cénomanien à réhabiliter	9	296 000
Cénomanien à créer	1	40 000
Turonien à réhabiliter	4	39 000
Total	28	**607 000 €**

* : 1 ouvrage a déjà été rebouché par le Syndicat avant cette campagne de diagnostics

Le coût moyen des réhabilitations par forage s'établit à 21 500 euros.

4.4 – Incidences des mises en conformité

L'objectif premier de cette campagne de diagnostics était d'évaluer les risques encourus par la nappe captive du Cénomanien moyen, exploitée par 8 forages de production d'eau potable.

Les mesures réalisées ont montré que de nombreux forages privés permettaient des apports importants de la nappe libre, polluée par les nitrates et les pesticides, vers la nappe captive (flux descendants permanents sur de nombreux forages). Les volumes transférés ne sont pas quantifiables mais ne semblent pas être négligeables en terme de détérioration de la qualité de l'eau. La mise en conformité de ces forages privés devrait permettre de supprimer ce risque, avec une amélioration de la sécurisation pour la desserte en eau potable.

Des incidences indirectes peuvent également être envisagées pour les deux nappes :

• **La nappe du Turonien-** La suppression des pertes de la nappe du Turonien au profit du Cénomanien est un élément positif pour la pérennité de cette nappe qui a actuellement, sur certains secteurs, tendance à s'épuiser en période d'étiage. Par contre, il est encore trop tôt pour savoir si les ouvrages réhabilités au Turonien bénéficieront de ce gain et pourront assurer sans défaillir les campagnes d'irrigation futures.

Une amélioration des équipements de ces forages devrait toutefois aboutir à une meilleure productivité des ouvrages. Les débits d'exploitation seront fixés après de nouveaux tests de pompages, à l'issue des travaux de réhabilitation.

• **La nappe du Cénomanien-** A contrario, si une amélioration de la qualité de la nappe du Cénomanien est attendue, une perte d'alimentation est à prendre en compte dans des proportions difficiles à évaluer (apports du Turonien supprimés).

Pour de nombreux ouvrages, le respect des consignes règlementaires de non-dénoyage de l'aquifère captif pourrait également se traduire par une diminution des rabattements admissibles et donc une baisse de la productivité des ouvrages. Cette contrainte pourrait toutefois être en grande partie compensée par l'amélioration des équipements des forages qui réduiront les pertes de charges (nettoyage des fonds remblayés, zone productive en trou nu…).

Comme pour le Turonien, seuls des pompages de contrôle pourront lever ce doute. Au regard des différents scénarii de mise en conformité proposés, sur certains sites les apports de 10 à 25 % du Turonien seront supprimés et parfois non compensés par un nouveau forage. Dans ces conditions, il faudrait une légère augmentation des prélèvements sur le Cénomanien moyen pour obtenir des volumes prélevés identiques. Toutefois, au regard de l'évolution du contexte règlementaire visant l'irrigation, avec une baisse progressive des volumes autorisés pour chaque irrigant, il est fort possible que ces baisses de volumes compensent les pertes liées au Turonien, évaluées à environ 4 % des volumes totaux prélevés.

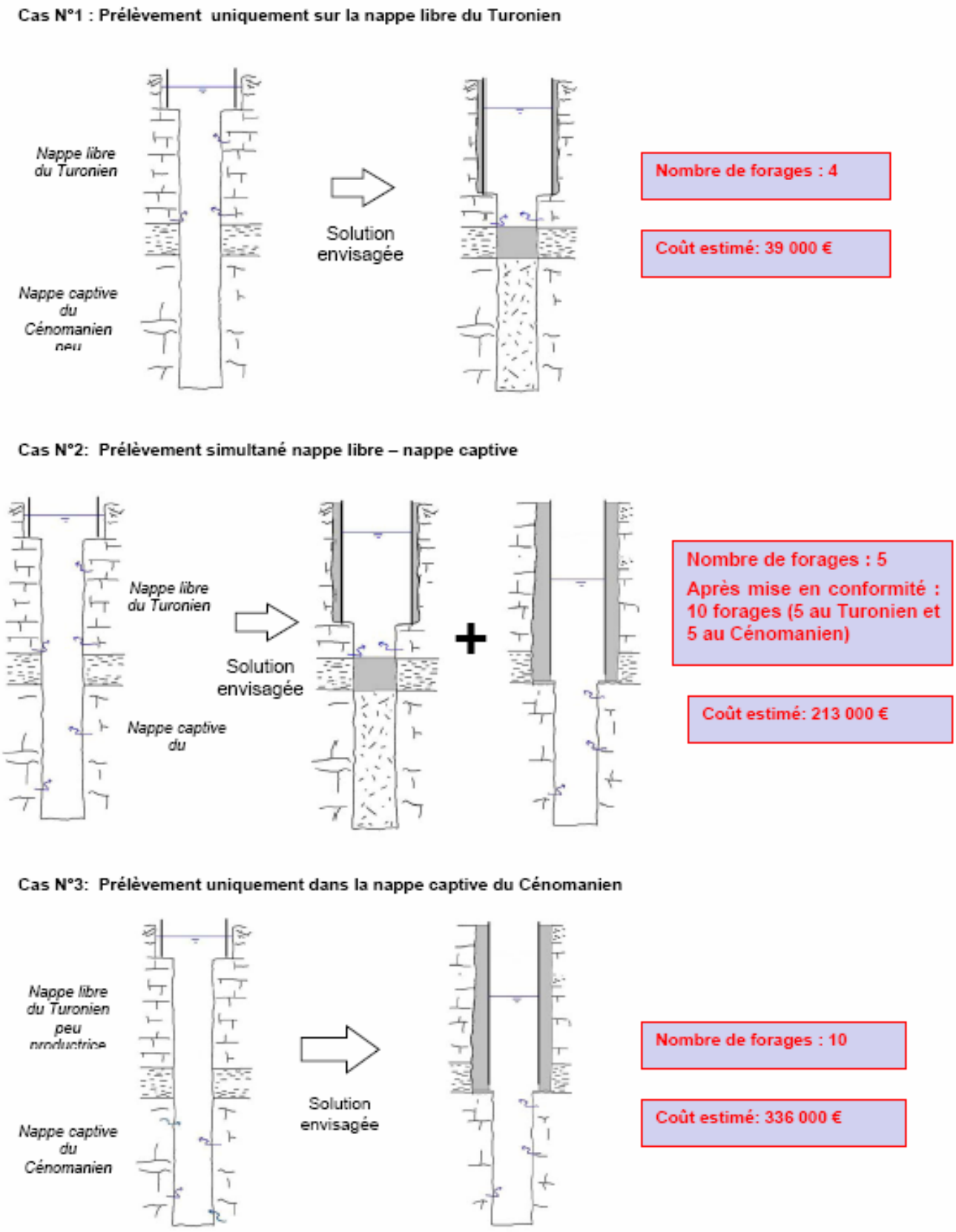


Figure n°5 : Possibilités de mise en conformité des ouvrages privés

V- CONCLUSIONS

A la suite du diagnostic de 22 ouvrages réalisés sur la nappe captive du Cénomanien carbonaté, les différentes possibilités concernant les travaux de mise en conformité sont les suivantes :

- 4 forages exploitant principalement le réservoir du Turonien libre devront être mis en conformité pour ne capter que le Turonien pour un montant de travaux estimé à 39 000 € ;
- 5 forages prélevant à part égale dans le Turonien libre et le Cénomanien captif conduiront à la réalisation de 5 ouvrages complémentaires pour un montant de travaux estimé à 213 000 € ;
- 10 forages s'adressant presque exclusivement au réservoir captif du Cénomanien seraient mis en conformité pour ne capter que le Cénomanien pour un montant de travaux estimé à 336 000 € ;
- 1 forage a été rebouché et un 1 autre est à reboucher (19 000 €) ;
- 1 forage conforme sans travaux.

Le coût total des travaux de mise en conformité est estimé à 607 000 €.

La substitution intégrale des prélèvements pour l'irrigation provenant de la nappe captive du Cénomanien nécessiterait de stocker environ 600 000 m^3/an.

La solution retenue pour les travaux de mise en conformité devra être confrontée avec les objectifs de préservation et de gestion de la ressource en concertation avec les différents partenaires locaux (propriétaire du forage, services de l'Etat, Conseil Général, Chambre d'Agriculture, Agences de l'Eau,..). Ces partenaires seront réunis dans un groupe de travail assuré par les services de la DDAF.

Ces dispositions devront permettre d'assurer la pérennité des nappes captives d'excellente qualité privilégiées pour l'alimentation en eau potable de la population sédentaire et touristique de la Charente Maritime.

Références bibliographiques

Mouragues N. (2000)- Caractérisation et vulnérabilité d'un hydrosystème complexe sub-profond associé à la structure anticlinale de Jonzac (Charente Maritime). Thèse, Université de Bordeaux I, 2 Tomes, avril 2000.

Sogreah (2005)- Conseil Général de la Charente maritime. – Révision du schéma Départemental d'Alimentation en eau potable.

Agence de l'Eau Adour Garonne (1996)- Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

(DDASS de la Charente maritime (2001)- Protocole pour la préservation qualitative des nappes du Crétacé en Charente Maritime.

Syndicat des Eaux de la Charente Maritime (2000)- Proposition d'un protocole pour la préservation qualitative des nappes du Crétacé en Charente Maritime - Volet technique.

DDASS de la Charente maritime (2001)- Protocole pour la mise en conformité des forages privés dans le département de la Charente maritime.

Syndicat des Eaux de la Charente Maritime (2006)- Dossier de Déclaration d'Intérêt Général pour la protection des nappes souterraines par la mise en conformité des forages privés- 3 tomes.

Université de Bordeaux I/Conseil Général de la Charente Maritime (1980)- Synthèse des recherches hydrogéologiques en Charente-Maritime.

Syndicat des Eaux de la Charente Maritime (2007)- Les nappes du Cénomanien /infra- Cénomanien utilisées pour l'alimentation en eau potable –Bilan et perspectives- Mai 2007.

Calligée (1999)- Syndicat des Eaux de la Charente Maritime : Piézomètrie de la nappe du Cénomanien dans le Synclinal de Saintes - Octobre 1999 - Rapport Calligée 9 17166 (Novembre 1999).

Calligée (2003)- Piézométrie de la nappe du Cénomanien dans le Synclinal de Saintes Avril 2003 (Charente Maritime)- Rapport Calligée 03 17 112 (mai 2003).

L'extraction des crépines par surforage et fishing

Ce texte est une retranscription partielle, illustrée par des extraits du diaporama, de la communication orale faite en séance.
Le comité de rédaction des actes

D'après la communication orale de Bernard LAFARGUE

FORADOUR SA, Zone artisanale de Laouranne, 40250 Mugron, France, b.lafargue@foradour.com

En matière de réhabilitation des forages, et avant d'aborder l'extraction des crépines, il convient d'évoquer les opérations de nettoyage qui peuvent permettre dans certains cas de régler un certains nombres de problèmes avant qu'il ne soit trop tard et que l'extraction ne s'impose.

1. Réhabilitation simple (entretien d'un forage)

Une réhabilitation dite simple peut être assimilée à une opération d'entretien. Elle consiste à :

- contrôler le massif filtrant et éventuellement faire un appoint de gravier ;
- brosser les tubages à la brosse nylon ou acier suivant les cas ;
- nettoyer le fond de l'ouvrage par aspiration à l'air lift ;
- selon les résultats obtenus, ces opérations peuvent être complétées par des traitements mécaniques ou chimiques.

2. Réhabilitation moyenne

Par réhabilitation moyenne, il faut entendre une réhabilitation simple décrite ci-dessus complétée par un chemisage de la chambre de pompage par un tube en inox et cimenté sous pression entre les deux tubes soit par tubings, soit avec vanne de cimentation entre double packers (suivant la longueur de la chambre de pompage à cimenter).

3. Réhabilitation lourde (extraction des crépines par surforage)

La réhabilitation lourde est une opération plus sérieuse qui nécessite la mise en œuvre :

- d'un atelier de forage complet comme pour la réalisation d'un forage neuf : appareil de forage, pompe à boue, bac à boue avec vibrateurs, garniture de forage, etc.,
- de matériels complémentaires pour l'extraction des crépines :
    - une colonne de surforage adapté au Ø des crépines et au Ø du tubage de la chambre de pompage. Les tubes doivent être lisses (sans manchons) et les éléments raccordés par filetages à double étage (filetage hydrill) pour une meilleure résistance mécanique et une parfaite étanchéité ;
    - un coupe tube ;
    - un overshot adapté au Ø intérieur du tube d'extension des crépines ;
    - un packer gonflable.

Bien entendu, ces matériels doivent être adaptés aux caractéristiques de l'ouvrage. Ainsi, pour un forage équipé d'une chambre de pompage de diamètre 13''$^{3/8}$ et les crépines de 6''$^{5/8}$ dans un forage de 12''$^{1/4}$, la colonne de sur-forage doit être d'un diamètre extérieur de 273 mm et d'un diamètre intérieur de243 mm environ.

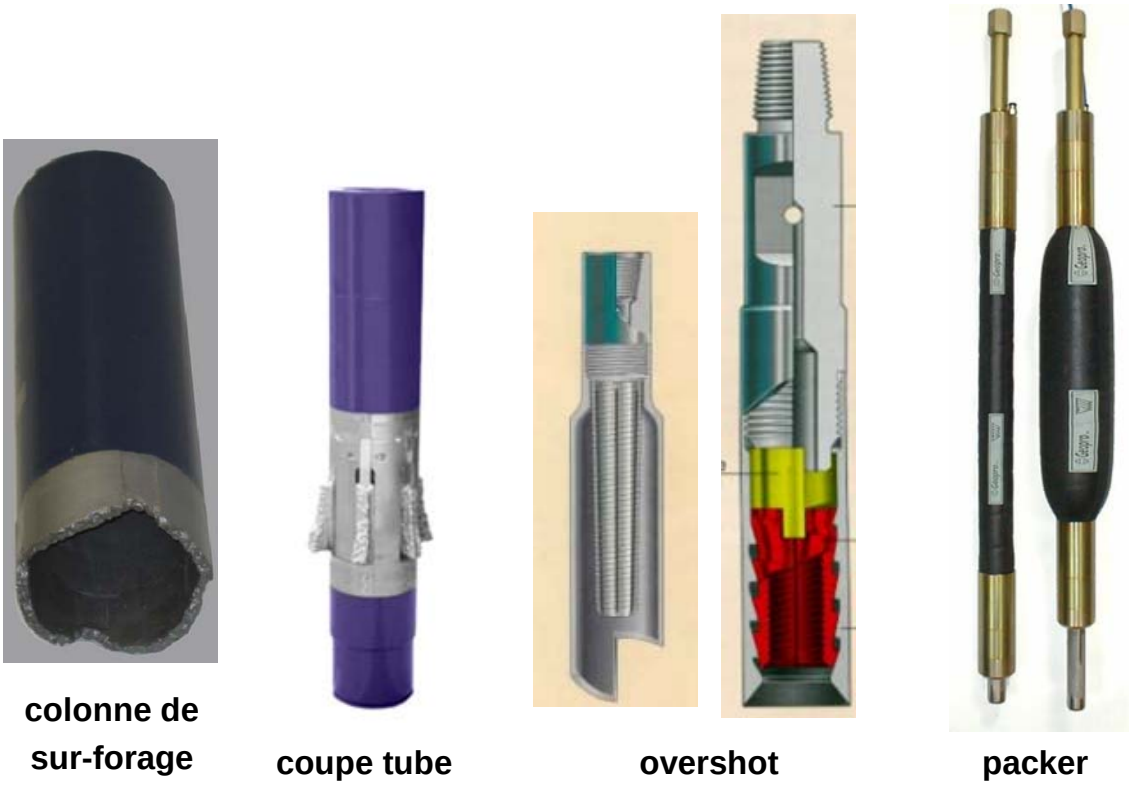


Figure 1 Matériels nécessaires pour un sur-forage et l'extraction des crépines

Le sur-forage et l'extraction des crépines se déroulent en trois temps principaux :

La première opération consiste à :

- descendre le coupe tube dans le tube d'extension des crépines, à environ 10 m sous le raccord gauche. En effet le raccord gauche à un diamètre supérieur à celui des crépines ou du tube d'extension. Il est donc indispensable de l'extraire pour permettre la descente de la colonne de sur-forage ;
- découper le tube en rotation ce qui nécessite un débit de boue de 800 à 1000 litres par minutes avec une pression de 40 à 50 bars. La découpe dure moins d'une dizaine de minutes et la fin de la coupe est indiquée par la chute de pression de la pompe à boue ;
- remonter le coupe tube au jour ;
- descendre soit un overshot soit un packer à l'intérieur du tube découpé pour s'ancrer et remonter le tube au jour.

Pour la deuxième opération, il convient de :

- descendre la colonne de sur-forage sur la tête du poisson. L'entrée de la couronne de sur-forage sur le poisson doit se faire délicatement en rotation lente et sans poids ;
- mettre en boue le forage une fois la colonne engagée ;
- descendre en rotation et circulation. Lors du sur-forage proprement dit, il est nécessaire de contrôler les débit et pression de la boue, le couple de rotation de la colonne ainsi que le volume de gravier évacué. Dans certains cas, les crépines sont déviées mais grâce à leur souplesse une fois le gravier enlevé, elles glissent bien à l'intérieur de la colonne. ;
- bien faire circuler la boue à la fin du sur-forage pour s'assurer que tout le volume du gravier est bien remonté ;
- remonter de la colonne de sur-forage au jour.

La troisième opération consiste à :

- descende soit un overshot ou un packer à l'intérieur de la tête du poisson ;
- ancrer l'outil
- remonter les crépines au jour.

4. Technique alternative pour les faibles profondeurs et les terrains consolidés

Pour éviter l'utilisation d'une colonne de sur-forage dont le coût est très important, une technique alternative peut être mise en œuvre pour les forages peu profonds dans des terrains consolidés qui ne risquent pas de s'effondrer sur la crépine après retrait du massif de gravier.

La méthode comprend là aussi trois temps :

Première opération :

Elle consiste à détruire le fond de la colonne de captage avec une fraise à environ un mètre en dessous des crépines pour libérer le massif de gravier.

Deuxième opération :

Il s'agit d'évacuer tout le gravier du massif filtrant par la base des crépines par aspiration à l'air lift.

Troisième opération :

L'extraction des crépines se fait ensuite par la méthode décrite précédemment.

Chemisage de forage par sertissage interne

Ce texte est une retranscription partielle, illustrée par des extraits du diaporama, de la communication orale faite en séance.
Le comité de rédaction des actes

D'après la communication orale de Michel SEGUIN

HYDROINVEST, 60 route d'Agris, 16430 Champniers, hydro.invest@wanadoo.fr

La présentation porte sur un procédé de chemisage de forage in situ par sertissage interne. Le procédé présenté ici a été mis au point au cours d'une collaboration entre les sociétés Hydroinvest®, Geopro® et la Lyonnaise des Eaux de Bordeaux.

Principe méthodologique

Le principe du procédé de tubage ou de chemisage par sertissage se traduit par la descente d'une complétion métallique de diamètre réduit au sein d'un forage, puis à son élargissement au diamètre désiré par dilatation hydraulique interne de la complétion.
La justification d'une telle méthode se comprend aisément lorsque l'on doit chemiser un puits dont le diamètre des tubages en place est trop petit pour pouvoir être retubé par une technique conventionnelle. L'archétype en est un puits dont les équipements de pompage passent tout juste dans la chambre de pompage et pour lequel une réduction de diamètre par retubage n'est pas envisageable (perte moyenne de 50 à 60 mm de diamètre) sans une modification complète de l'ensemble des équipements de production.
Dans le cas d'un chemisage par sertissage interne, la perte de diamètre n'est que de l'ordre de 6 à 9 mm sur le diamètre en fonction de l'épaisseur.

Les avantages de cette technique peuvent être résumés dans les trois items suivants :

- Réduction minimale du diamètre du tubage du puits,
- Réparation partielle possible d'un tube,
- Consolidation d'une zone éboulée sans réduction de diamètre.

Choix du diamètre et de la qualité de la chemise

Cette étape préalable est essentielle au bon déroulement de la méthode. En effet plusieurs critères peuvent largement contraindre le choix des matériaux comme notamment :

- Selon le but recherché (chemisage totale ou partiel),
- Selon les pressions hydrostatiques et dynamiques potentielles (aquifères superposés),
- Selon la ductilité du métal utilisé,
- En fonction du coefficient de dilatation prévu,
- En fonction des techniques de soudures qui seront utilisées (la soudure doit également résister à l'étirement)

Les soudures et leur comportement représentent environs 80 % des aléas de la méthode. Ce sont des points de fragilité vis-à-vis de l'étirement ou de l'allongement du métal et donc ce sont des zones de faiblesse de la méthode. Outre les soudures transversales de raccordement de tubes, il faut également prêter une attention toute particulière aux soudures longitudinales d'usine afin que la technique puisse être réalisée. Le contrôle préalable systématique de toutes les soudures est une nécessité, tout comme la garantie d'une technique de soudure in situ parfaitement définie et maîtrisée.

Afin d'éviter les phénomènes de corrosion électro galvanique, un revêtement isolant externe doit systématiquement être utilisé sur l'extrados de la chemise afin de réduire au maximum les contacts directs entre deux métaux ou deux alliages différents. C'est d'autant plus important lorsque le chemisage est réalisé en acier inoxydable sur un tube acier type API. Le revêtement choisit doit satisfaire à deux contraintes : il doit être souple pour pouvoir subir un étirement mais également être un isolant électrique.

Paramètres de sertissage

Les paramètres de sertissage d'un tube sont fonction du coefficient de dilatation du métal utilisé mais également fonction du diamètre, de l'épaisseur et de la nature du métal.
Il existe une courbe caractéristique de dilatation type pour chaque diamètre, chaque épaisseur et chaque qualité d'alliage métallique (figure 1).

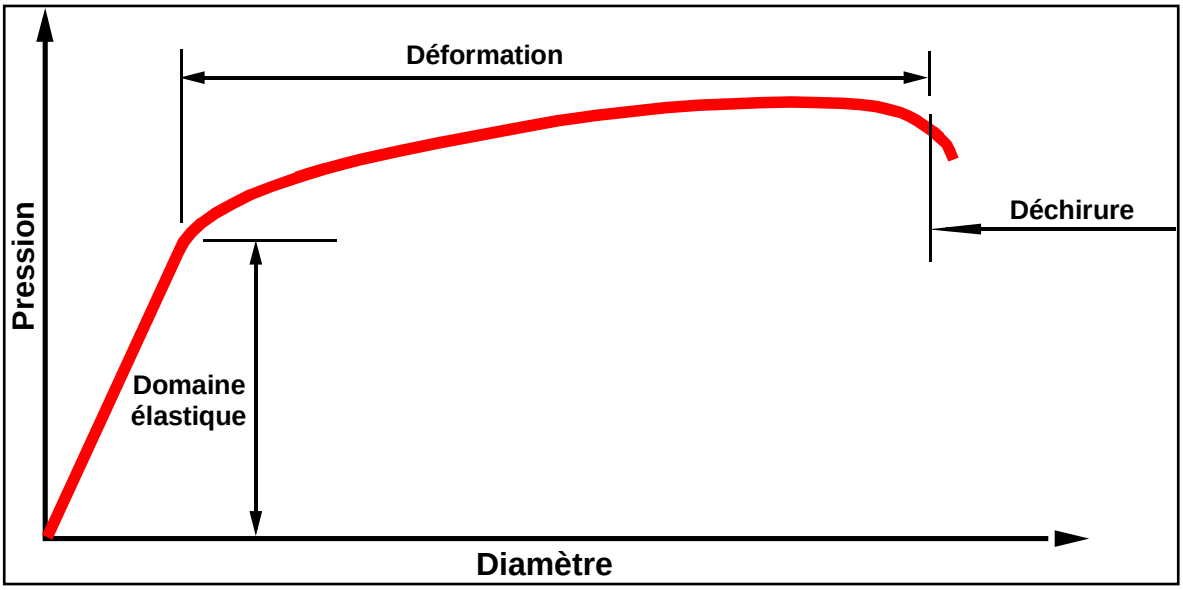


Figure 1 : courbe caractéristique de déformation d'un tubage métallique

De manière générale, le domaine d'élasticité est rencontré depuis le début de la mise ne pression jusqu'à la fin du comportement linéaire d'augmentation de diamètre. Ainsi pendant cette phase une chemise relâchée en pression doit revenir à son diamètre nominal. Le domaine du fluage métallique fait suite au domaine d'élasticité : c'est dans ce domaine que se produisent la déformation et l'augmentation du diamètre du tube.
Au delà du diamètre maximal, la déformation continue mais il y a apparition de déchirures.
La mise en place d'une chemise par sertissage interne oblige donc à travailler dans le domaine de la déformation, et donc dans les gammes de pression adaptées.

Figure 2 : Outil utilisé.

Pour générer la déformation de la chemise, l'outil utilisé est un packer gonflable haute pression instrumenté pouvant être utilisé au câble ou sur le train de tiges (figure 2). L'instrumentation située en tête du packer permet la mesure et le contrôle de la pression interne, le diamètre de l'outil, le diamètre de la chemise (figure 3). En outre on trouve également l'ensemble des télécommandes permettant l'utilisation de l'outil depuis la surface.

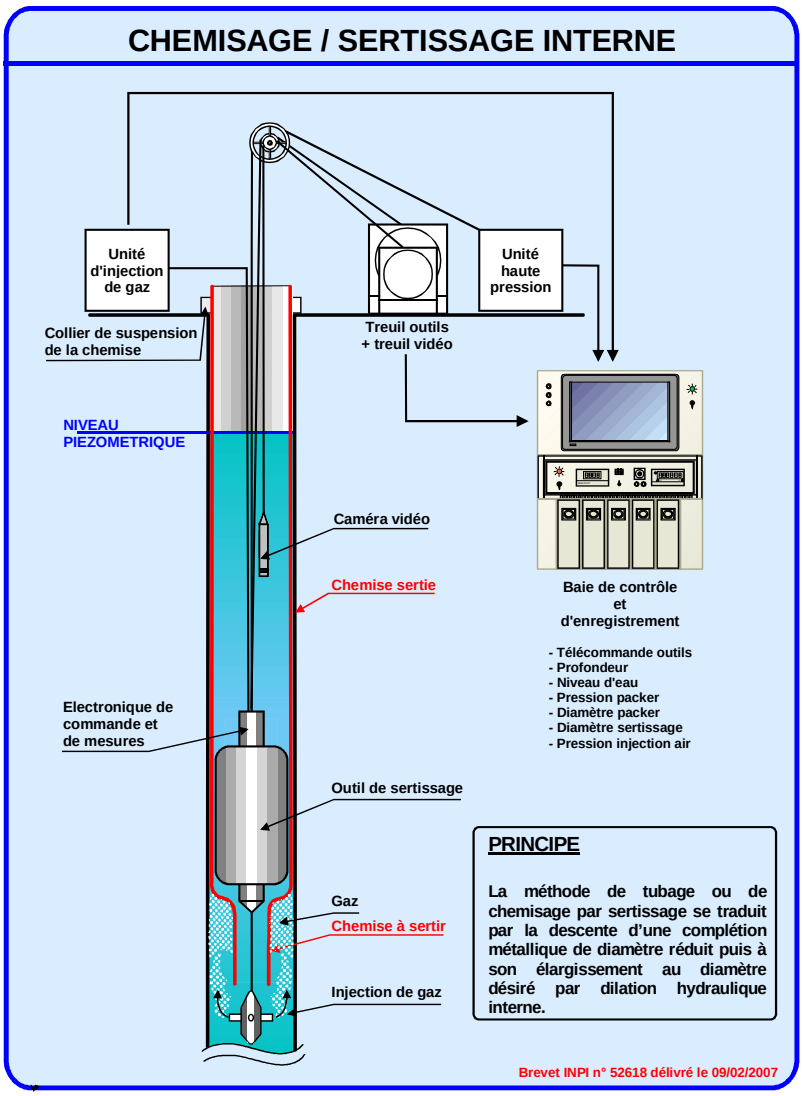


Figure 3 : Instrumentation de l'outil.

Réalisation

Deux techniques de mise en œuvre sont utilisées en fonction de la profondeur de travail. Jusqu'à environ 150 m de profondeur on utilise la technique au câble : l'outil est suspendu (Figure 3) à un treuil, et on associe une caméra vidéo afin de contrôler au fur et à mesure de l'avancement le bon fonctionnement de la méthode. Généralement le sertissage au câble se fait de la surface vers la profondeur, le sertissage se fait passe par passe. Le contrôle se fait en temps réel pour ne pas sortir du domaine de déformation et passer dans le domaine de la rupture.

Au delà de 150 m, l'outil est placé au bout d'un train de tiges de forage et manipulé grâce à la machine de forage.

Une méthodologie a été élaborée au fil du temps et des expériences pour aboutir à :

- Nettoyage du tubage ancien (afin de sertir au contact et d'éviter si possible d'obtenir une surface interne bosselée),
- Descente conventionnelle du tubage ou de la chemise avec contrôle des soudures,
- Suspension de la chemise en tête de puits,
- Sertissage interne par passes successives et déplacement de l'outil,
- Contrôle permanent et en temps réel des paramètres de sertissage, du diamètre de la chemise et de l'aspect final par vidéo.

De nombreuses applications de cette méthode sont ainsi possibles notamment un chemisage intégral ou partiel des tubages de soutènements, un chemisage mixte avec chambre de pompage sertie et partie inférieure cimentée (figure 4).

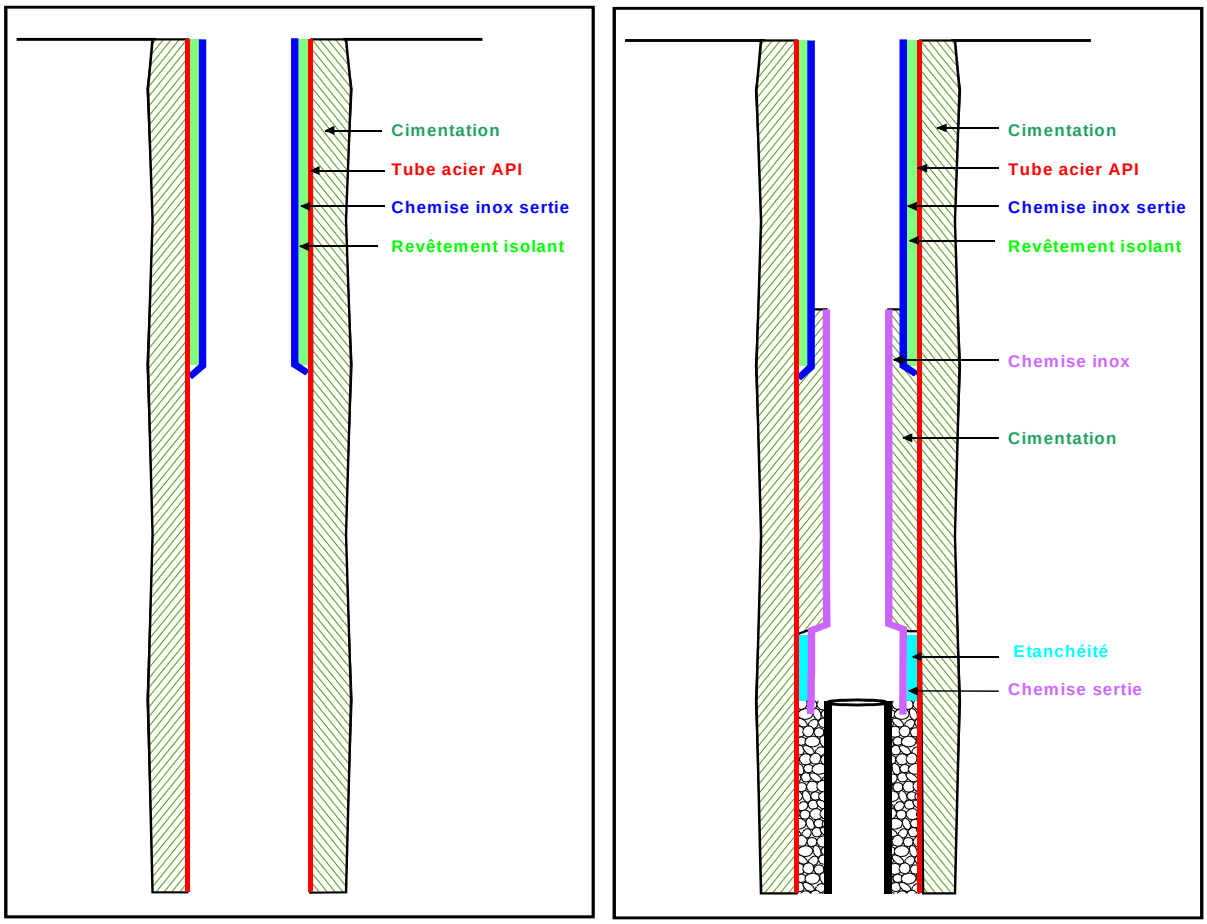


Figure 4 : Exemple de chemisage

Il est également possible d'obstruer des perforations par la pose d'un patch de quelques mètres au droit des perforations.
Cette technologie permet en outre de réaliser de nombreuses autres opérations comme :

- La possibilité de chemisages successifs (avec recouvrement)
- Le sertissage de pied de chemise pour cimentation avec ou sans soupape
- La pose de tube de rehausse de porte-crépine
- La pose de dispositif d'entonnement en sommet de porte-crépine
- Le chemisage ou remplacement de porte-crépine abîmé
- Et le traitement de tous tubages ou chemisages imposant une conservation de diamètre maximal

En conclusion cette technologie est moins simple que la technique conventionnelle, mais elle se justifie totalement dans les cas ou le diamètre du puits est un problème.

Gestion d'un champ captant – Ville de Tour

Philippe MEVELEC

Ville de Tours, service des eaux, mairie de Tours services techniques, 3 rue des Minimes, Tours, France

Résumé

La ville de Tours s'alimente en eau potable en puisant l'eau de la nappe alluviale de la Loire. L'article retrace l'histoire agitée de cette exploitation qui remonte au début du siècle dernier. Il montre comment les exploitants ont fait face aux crises répétées et ont développés de nouvelles stratégies pour contourner les difficultés. Les expériences accumulées depuis plusieurs décennies ont permis une meilleure compréhension des phénomènes qui aboutissent au colmatage des ouvrages, offrant ainsi en perspective des solutions plus efficaces.

Le contexte hydrogéologique de la ville de Tours

La ville de Tours se situe dans le bassin Parisien. Le sous-sol est constitué d'une superposition de couches sédimentaires calcaires, argileuses et sableuses. Ces couches sont entaillées par l'érosion des rivières en l'occurrence la Loire et le Cher. Les cours d'eau ont déposé des sédiments argilo sableux au fond de la vallée.

Plusieurs réseaux hydrographiques se superposent :

- en front de talweg de part et d'autre de la vallée apparaissent des sources qui résultent de l'écoulement et de l'infiltration des eaux des coteaux ;
- la nappe alluviale qui résulte de l'écoulement et de l'infiltration de l'eau des rivières dans les sédiments qu'elles ont déposés ;
- la nappe libre du Turonien qui résulte de l'infiltration des eaux de la surface dans les fissures du substratum calcaire ;
- la nappe du Cénomanien réalimentée à partir de zones éloignées (Vierzon, Le Mans, Bourgueuil) et maintenue captive entre deux couches imperméables constituées de marnes.

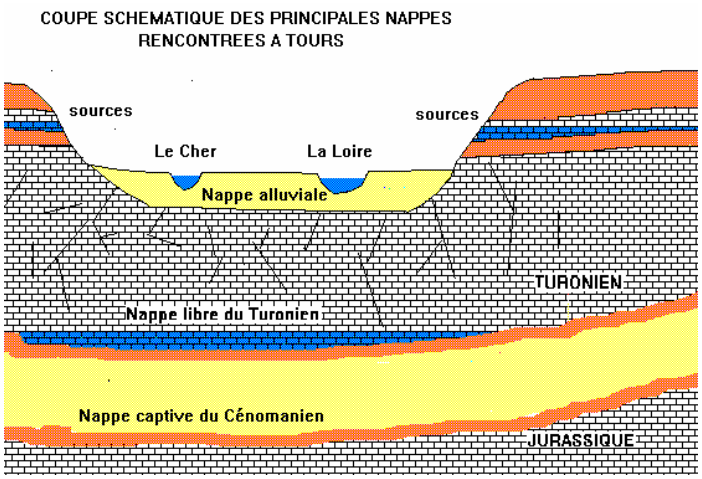


Figure 1 *Coupe schématique des terrains et nappes rencontrées*

Le contexte historique

A l 'époque romaine, l'eau prélevée des sources sur les coteaux du Cher était acheminée depuis Bléré par un aqueduc de 20 km.

Au 16ème siècle, un réseau de galeries est construit sur le coteau sud à Tours pour capter les sources de St Avertin.

Les techniques de forage qui se généralisent permettent au 19ème siècle d'exploiter l'aquifère du Cénomanien alors artésien.

L'ossature du réseau actuel de distribution d'eau potable se construit. Il est en grande partie alimenté par un prélèvement direct d'eau du Cher.

A la lumière des progrès scientifiques on prend conscience que de nombreuses maladies sont le résultat de la prolifération de microorganismes dans le corps humain. Bon nombre de ces maladies sont véhiculées par l'eau.

Il convient donc d'alimenter les populations avec de l'eau saine, exempte de germes pathogènes, afin de prévenir les pandémies. L'eau du Cher ne répond pas à cette exigence.

Deux puits d'essai sont construits à l'île Aucard entre 1902 et 1905. Ce sont des puits peu profonds qui captent la nappe alluviale. L'eau extraite de ces puits satisfait aux exigences sanitaires et les quantités paraissent suffisantes pour alimenter la ville.

Une décision municipale en 1909 lance l'exploitation du site. Le conseil supérieur d'hygiène de France confirmera le choix de la municipalité en 1916.

La période de 1911 à 1949

La construction des puits se succède afin de suivre l'évolution des besoins qui résulte de l'augmentation de la population urbaine: 6 puits bariostatiques et 4 puits Cuau sont construits. La présence du manganèse dans les réservoirs et dans les puits est détectée en 1934.

Elle est suivie dès 1936 d'une baisse progressive de la capacité de certains ouvrages. L'étiage sévère de 1949 provoque une baisse importante des capacités des ouvrages et de sévères difficultés de production.

Figure 2 *les puits construits à l'île Aucard entre 1911 et 1949, situation en 1956*

La période de 1950 à 1968

Cette période est marquée par la construction de nombreux puits et l'abandon progressif des plus anciens.

Figure 3 *la gestion des puits en 1950*

Figure 4 *la gestion des puits entre 1950 et 1968*

La période de 1968 à 1980

Les puits de l'île Aucard deviennent insuffisants pour subvenir aux besoins des habitants dont le nombre et les besoins par tête ne cessent d'augmenter. La réalisation de nouveaux puits à l'île Aucard devient difficile au regard du nombre d'ouvrages existants.

La municipalité lance une enquête hydrogéologique à la recherche d'une nouvelle ressource. Elle conduira à exploiter le site de l'île aux vaches. 21 puits exploitant la nappe alluviale seront construits. Les puits sont raccordés à un réseau de galeries creusées dans le substratum calcaire sous-jacent. Une galerie, en communication avec celle qui relie les puits traverse la Loire pour aboutir à un puits sur la rive gauche. L'ensemble de la nappe est sollicité par pompage dans ce dernier puits.

Figure 5 *Situation en 1968*

Figure 6 *la nouvelle zone de captage de l'île aux vaches*

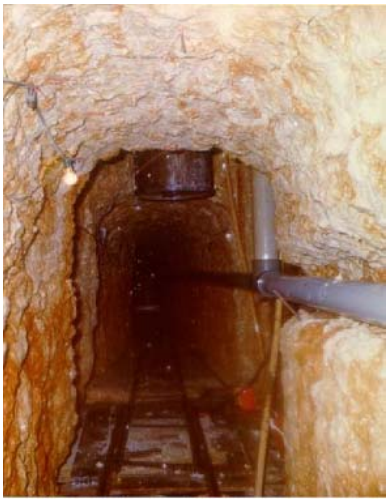


Figure 7 *Photos des travaux 1968-1975 : transbordement, puits diamètre 14m, galeries*

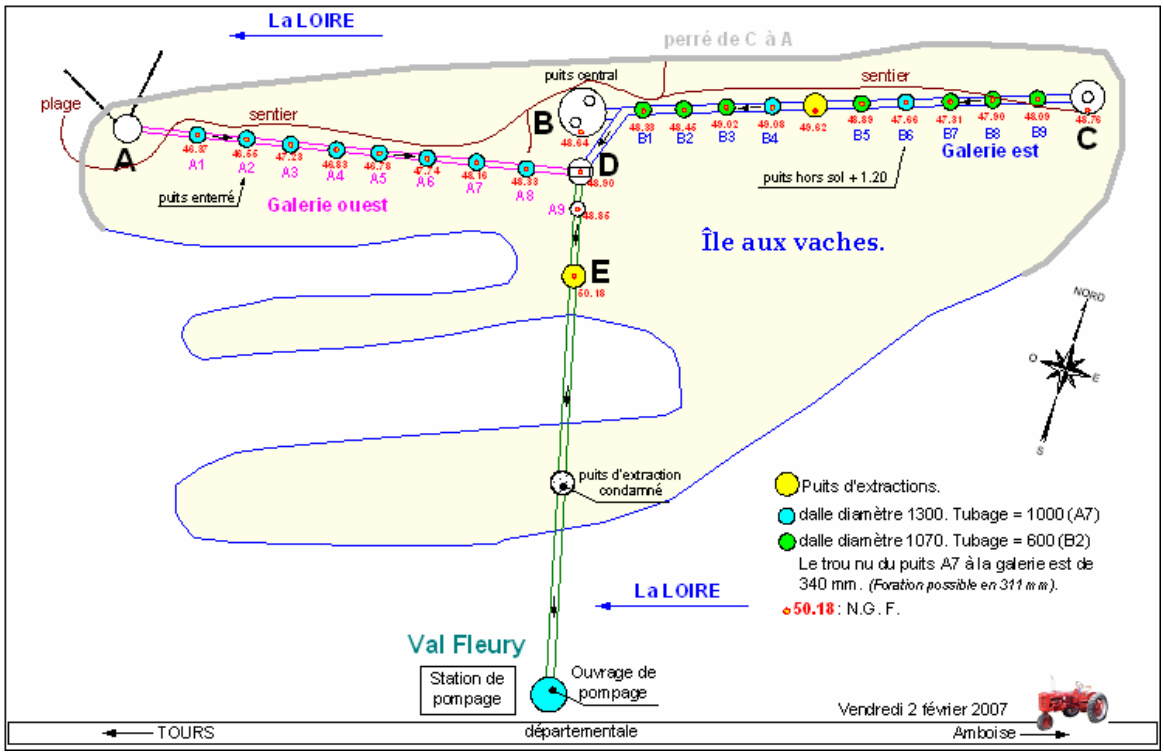


Figure 8 : *vue schématique en plan des puits de l'île aux vaches et du réseau de galeries*

La situation au début des années 1980

Problèmes qualitatifs : les eaux issues des deux champs captants (île Aucard, mais aussi île aux vaches) sont chargées en manganèse, occasionnant de sérieux problèmes sur la qualité des eaux distribuées

Solutions apportées : Construction d'une usine de traitement à l'île Aucard en 1983. Construction d'une usine de pour traiter les eaux de l'île aux vaches en 1988. Nettoyage du réseau de distribution (1990-2000).

Problèmes quantitatifs : La baisse de productivité des captages se poursuit à l'île Aucard. A l'île aux vaches la productivité réelle minimum des puits n'est plus que de 18 000 m3/j.

Solutions apportées : Elargissement du champ captant par l'utilisation de la technique des drains rayonnants. Premiers essais de décolmatage des puits à l'île Aucard en 1985. Etudes visant à préciser la nature, la localisation, l'importance du phénomène de colmatage.

Figure 9 *La position des puits à drains, la nature des drains et les années de réalisation*

Etudes et essais visant à comprendre les phénomènes de colmatage et à évaluer les capacités des champs captants

- •**1986**: Etude hydrogéologique cabinet Pierson à l'île Aucard et à l'île aux vaches

  Elle permettra :
  - de dimensionner la station destinée à traiter l'eau captée à l'île aux vaches ;
  - de préciser l'importance du colmatage des berges par la mesure des niveaux piézométriques entre la Loire et les puits ;
  - elle aboutira à la conclusion que le colmatage des puits est irréversible ;
  - elle mettra en évidence l'importance de la température sur les capacités de la nappe.
- •**1987**: le forage horizontaux des berges par la société Montavon apportera une confirmation visuelle du colmatage des berges ainsi que de l'effet bénéfique des crues.
- •**1987-1988**: Evaluation de la profondeur du colmatage des crépines (en régie). Des sondages horizontaux in-situ au niveau de la crépine des puits permettront de préciser la profondeur du colmatage des crépines.
- •**1988-1989**: Parallèlement aux études et essais, une recherche bibliographique est menée. Très peu d'articles abordent les phénomènes de colmatage. Un seul, paru en juillet 1981 dans TSM, relate de faits similaires à ceux observés à Tours et fourni des explications quant à l'origine du colmatage.(art TSM Burgéap, agence seine Normandié 7/81).
- •**1999** L'étude confiée à Antéa à île Aucard consiste à étudier et synthétiser les données d'archives du service, à préciser le profil du substratum, la nature, la granulométrie et perméabilité des alluvions.

  Une étude géophysique est menée autour de l'île dans le lit de la Loire. Elle abouti à la conclusion que l'île est sollicité au maximum de ses capacités. Seule la partie ouest (aval) n'est pas utilisée à son potentiel maximum.
- • **2001** Une étude identique est confiée à Antéa pour l'île aux vaches. Elle abouti à la conclusion que l'île est sollicité au maximum de ses capacités. Seule l'extrémité est (amont) n'est pas utilisée à son potentiel maximum.

La situation au début des années 1990

Problèmes qualitatifs : Ils ont été réglés à l'île Aucard par la construction d'une usine de traitement en 1983. Une autre usine construite en 1988 permet de traiter l'eau issue de l'île aux vaches. Toute l'eau produite est débarrassée du manganèse dès 1990. A partir de 1990 et jusqu'en 2000, la plus grande partie (environ 85% du linéaire) du réseau est nettoyé.

Problèmes quantitatifs : La baisse de productivité des captages se poursuit sur les deux sites. A l'île aux vaches la productivité réelle minimum des puits n'est plus que de 12 000 m3/j. La consommation dépasse parfois les capacités de production. Un puits est construit en 1992 qui prélève l'eau de la nappe du Cénomanien.

Les tentatives de régénération des captages1986-1988: Plusieurs tentatives de décolmatage des puits à drains par action mécanique sont réalisées sur les puits à drains par le personnel du service des eaux. Les résultats instantanés sont spectaculaires, les débits spécifiques pouvant être multiplié par 10. Cependant le colmatage des drains se reproduit de plus en plus rapidement lorsque les tentatives sont réitérées sur un même drain. Ainsi, la durée peut être de 10 mois après le premier passage, de 5 mois après le second, le 3 mois après le troisième etc. in fine le drain doit être abandonné. Une tentative de décolmatage mécanique et chimique (HCl et oxalate) est réalisée par la société Montavon sur les drains du puits n°15. Elle donnera d'excellents résultats pendant 3 ans, mais les tentatives ultérieures de décolmatage reproduiront le même effet d' « usure » que celui observé lors des essais effectué en régie.

- •**1988-1990**: Une série d'essais de décolmatage sont réalisés par le service des eaux sur le puits Cuau n°18, mettant en action des moyens mécaniques et chimiques (packers simple, double, acide chlorhydrique, eau de javel, etc.) Toutes les tentatives se solderont immédiatement ou à court terme par des échecs.
- •**1992-95** Reproduction du phénomène de colmatage sur pilote et essais décolmatage puits Cuau «méthode Clanet ». L'étude des phénomènes de colmatage est confié à un professeur de l'université de Tours. L'objet de l'étude consiste à reproduire le phénomène en laboratoire afin de mettre au point une méthode de traitement qui sera mise en œuvre sur l'un des puits.

En 1994, le protocole de traitement est prêt. L'opération consiste à installer 6 piézomètres à 2m à la périphérie de l'ouvrage afin d'injecter successivement ou simultanément selon une chronologie précise du gaz chlorhydrique et de la vapeur d'eau surchauffée fournie par une chaudière qui sera installée sur le site.

Le puits doit être en pompage à 60 m3/h lors des injections qui dureront 3 jours. Cette opération particulièrement dangereuse sera effectuée par le personnel municipal, aucune entreprise n'étant en mesure de satisfaire au cahier des charges. Les deux intervenants auront suivi une formation spéciale au maniement des appareils de respiration autonome et au port de combinaison étanche. Des pompes spéciales (pneumatiques, corps PTFE) seront utilisées. Une installation de neutralisation des effluents pompés sera installée. Le tout sera supervisé par les pompiers et la CRAM.

Cet essai se soldera par la destruction du puits après 24 heures de traitement.

- •**1997** Deux essais de décolmatage d'un puits à drains et d'un puits Cuau sont confiés à la société Herli France. Ils consistent à injecter entre packer une solution de produit Herli rapid à base d'acide ascorbique et d'acide phosphorique. L'effet sera négligeable sur le puits à drains. Pour ce qui est du puits Cuau (n°3), il se traduira par sa destruction.
- •**1998** Un essai de décolmatage d'un puits Cuau est confié à la société AQUAM. Il consiste à injecter entre packer du gaz carbonique liquéfié. L'essai est réalisé sur un ancien puits abandonné. Aucun effet significatif ne sera enregistré.

La situation en 1997-98 Problèmes qualitatifs : ils sont presque complètement résorbés.

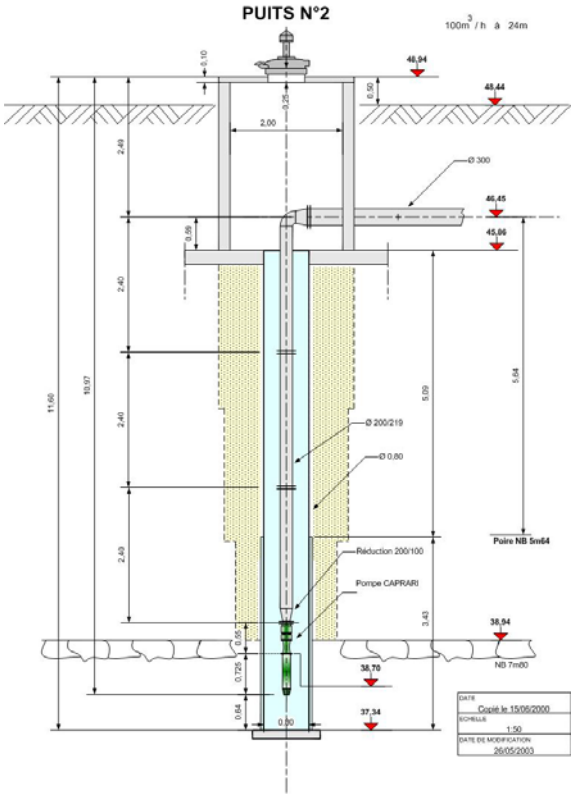
Problèmes quantitatifs : en 1997-1998 la situation des captages en nappe alluviale devient catastrophique, conduisant à mettre en service un puits au Cénomanien réalisé préventivement en 1992 à l'île Aucard.. Une enquête hydrogéologique est lancée sur les 2 sites (Antéa 1999 à 2001). Il est décidé de fonçer de nouveaux drains (P15) et de réaliser un puits à drains (P17).

Etat des connaissances en 1997-98 :•Le colmatage des berges est réversible. Les crues régénèrent les fronts de filtration.

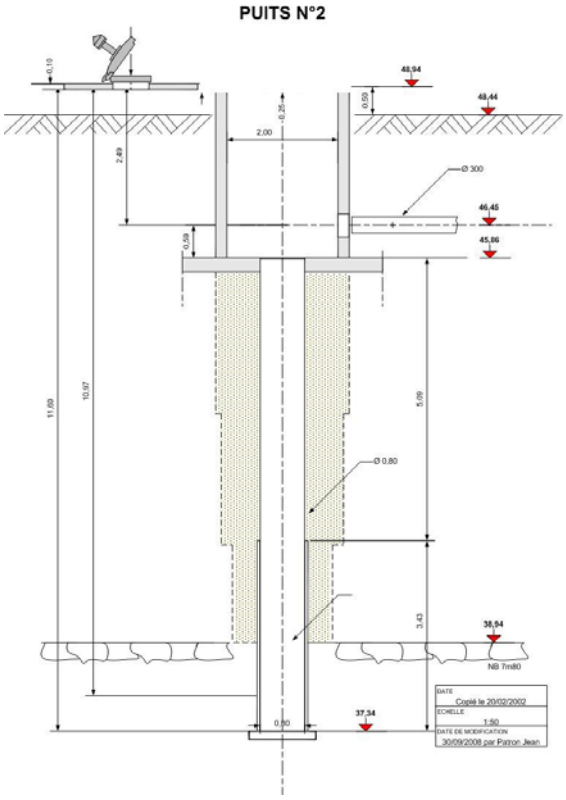
- •La température de l'eau est un facteur important qui amplifie les phénomènes de colmatage.
- •Le colmatage des puits est d'origine bactérienne.
- •Il se cantonne à la périphérie immédiate des crépines (drains ou filtre Cuau).
- •Pour être efficace, le décolmatage des puits doit se faire par l'extérieur de la crépine.
- •Les difficultés se produisent quand :
  - l'étiage de la Loire perdure (absence de crues) ;
  - la température de l'eau est basse ;
  - les puits sont colmatés.

La réhabilitation des puits « Cuau » 2000-2009 Face aux difficultés de production, aux échecs répétés des tentatives de décolmatage et à l'absence de nouvelle proposition d'entreprises, il est décidé de mettre en application une méthode mise au point en régie sur la base des connaissances acquises. Elle consiste à réhabiliter la crépine d'un puits « Cuau » n°3

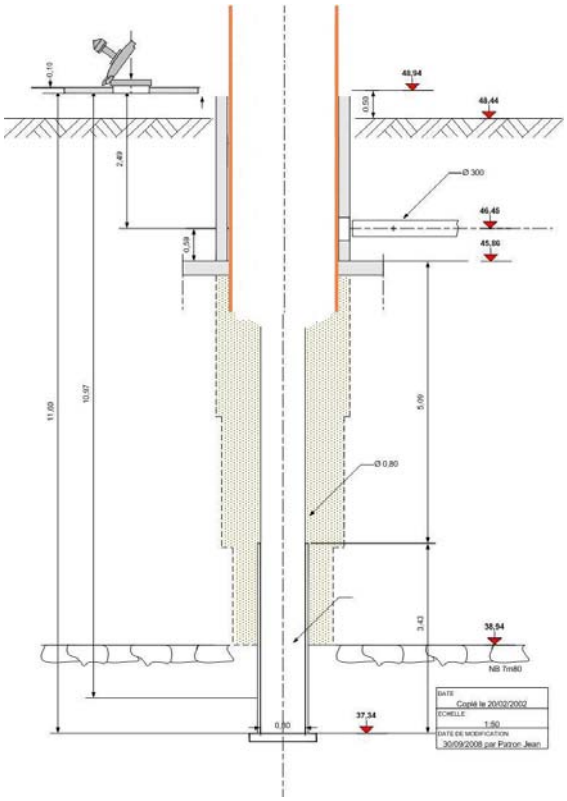
La réhabilitation des puits « Cuau » 2000-2009 Elle consiste à remplacer la crépine Cuau existante par une crépine en acier inoxydable à fil enroulé, ouverture 2 ou 3mm. Les équipements (pompes, conduites) sont enlevés. L'opération s'effectue par destruction du tubage amiante ciment existant à la benne preneuse. Un tube en acier de 2m de diamètre, guidé par la tête du puits est descendu par havage au fur et à mesure de l'enlèvement des matériaux.



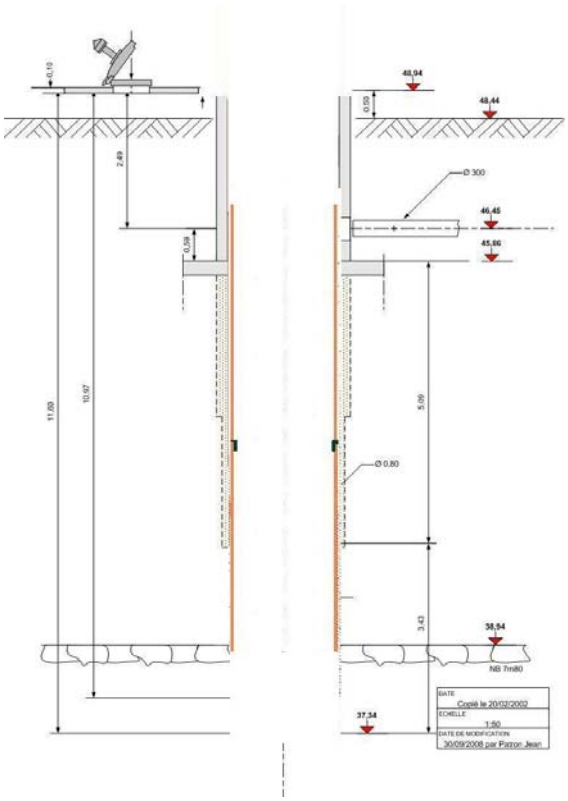
Etape 1



Etape 2

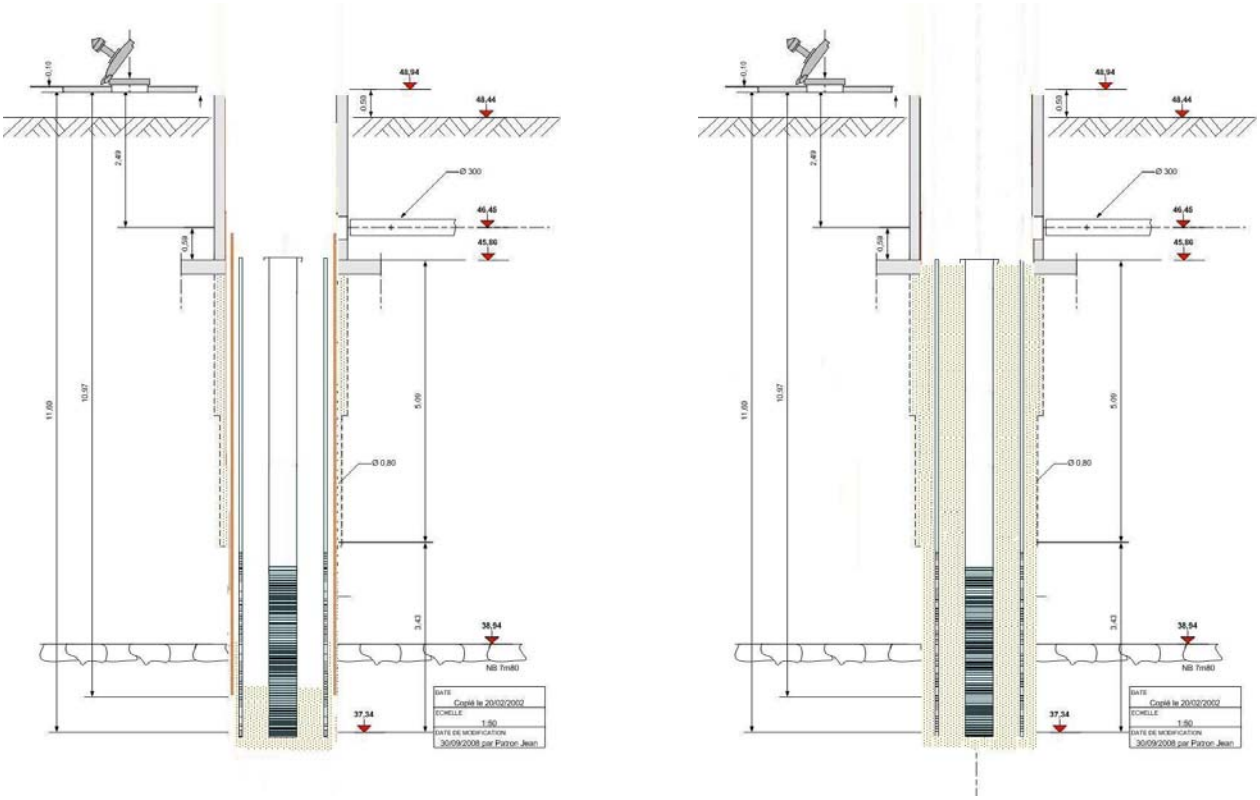


Etape 3



Etape 4

Une crépine à fil enroulé est mise en place, ainsi que 6 piézomètres à la périphérie (à 50cm de la crépine environ). Ces piézomètres seront utilisés pour suivre le colmatage de la crépine et éventuellement pour tenter ultérieurement de la décolmater. Du gravier calibré est mis en place autour de la crépine. La trousse est extraite au fur et à mesure du gravillonnage.

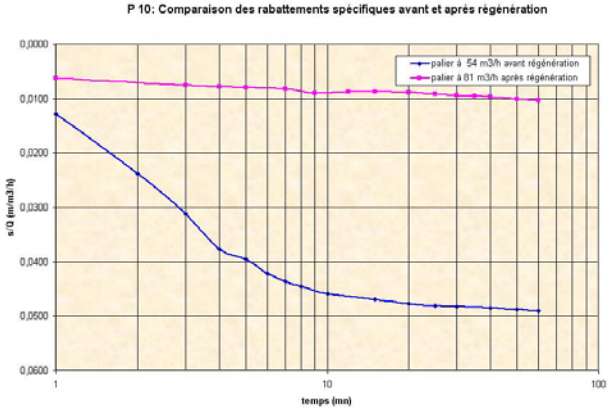


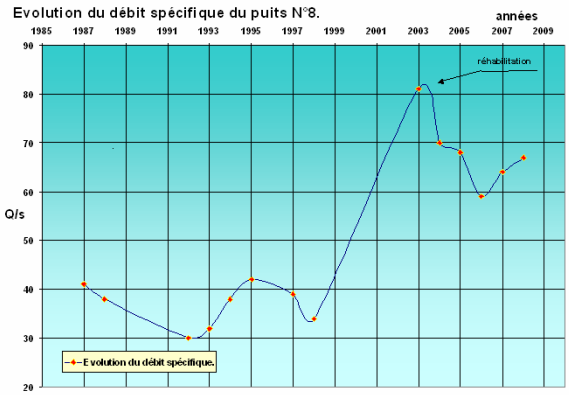
Etape 5

Figure 10 *Différentes étapes de la réhabilitation des filtres Cuau*

La réhabilitation des puits « Cuau » 2000-2009 Le programme de réhabilitation des puits depuis 2000 :

- 2000 puits n°3
- 2001 puits n°18 (remise en service d'un puits abandonné en 1982)
- 2002 puits n°10
- 2003 puits n°5 et n°8
- 2004 puits n°1 et n°19 (abandonné en 1983)
- 2005 puits n°2 et n°6
- 2006 puits n°21 (abandonné en 1973)
- 2008 puits n°12
- 2009-2011 réhabilitation de la zone de captage de l'île aux vaches (18 puits Cuau, 2 puits à drains).





Résultat immédiat Résultat à long terme

Figure 11 *Exemple de résultat immédiat sur la productivité d'un ouvrage*

Figure 12 *Les puits à l'île Aucard en 2008*

Bilan et perspectives Les points positifs :

- La nature et la localisation des phénomènes de colmatage sont aujourd'hui bien connues.
- Les conditions qui conduisent aux difficultés de production sont connues.
- La technique qui permet de venir à bout du colmatage des puits verticaux semble maîtrisée.
- Les puits à drains en acier inoxydable, à trous oblongs placés sous le lit du fleuve sont très productifs.
- Les drains sont naturellement décolmatés lors des épisodes de crues.
- La capacité de production des champs captants s'améliore tandis que la consommation est en baisse généralisée.

Les limites actuelles :

- Le traitement du problème du colmatage reste empirique.
- Les conditions physico-chimiques qui provoquent le développement des bactéries au niveau des crépines reste à préciser.
- La possibilité de traiter le colmatage des crépines en agissant de l'extérieur reste à démontrer.
- Le succès de la réhabilitation d'un ouvrage ayant déjà subit une première réhabilitation reste à démontrer.
- La technique utilisée pour venir à bout du colmatage des puits verticaux n'est pas transposable aux drains.
- Une solution doit être trouvée pour le colmatage des drains.

La gestion d'un champs captant

Il s'agit d'une gestion patrimoniale, sur le long et très long terme qui nécessite l'entretien d'une « mémoire » du service. Les changements profonds et brutaux dans l'exploitation sont nuisibles.

Les puits et forages ne sont pas des ouvrages qui une fois réalisés sont voués à l'oubli. Leur comportement doit être suivi

Le suivi est destiné à prévenir leur pathologie et agir avant qu'il ne soit trop tard.

Il doit permettre aussi la compréhension des phénomènes qui aboutissent à la dégradation de leur capacité et/ou de la qualité de l'eau

Les conseils de l'hydrogéologue sont précieux à l'exploitant pour diagnostiquer l'état général d'un puits, d'un forage ou d'un champ captant.

Cependant, son approche est limitée car essentiellement physique. Elle ne permet pas de prendre en compte les phénomènes biologiques (ou éventuellement chimiques)

Il en ressort que les capacités réelles observées sont parfois très éloignées des prévisions obtenues par le calcul.

L'exploitant tout comme l'hydrogéologue doivent faire preuve d'humilité en prenant conscience et en affichant les limites de leurs connaissances.

Réalisation de sondes géothermiques

SEGUIN Bruno 1, REISS Christophe 2

1 VENTILONE Ingénierie, 31 rue Gustave Eiffel, 38000 Grenoble,.seguin@ventilone.co m
2 VENTILONE, 2 chemin du Bois Noir, 38119 Pierre Chatel, reiss@ventilone.com

Résumé
Cet article décrit les différentes phases de réalisation d 'un champ de sondes géothermiques verticales : le procédé d'installation des sondes ; le principe et l'importance du test de réponse thermique permettant de caractériser les propriétés thermiques du sous-sol ; et en fin, la démarche à adopter pour concevoir et dimensionner un champ de sondes.

Les systèmes géothermiques verticaux

Une sonde géothermique est un échangeur thermique entre un fluide et le terrain, installé dans un forage vertical sur une profondeur comprise entre 20 et 300m. Cet échangeur est généralement constitué de une ou deux tuyauteries en U, en matériau polyéthylène haute densité (PEHD), de diamètre normalisé (DN25, DN32, DN40). La mise en place d'écarteurs de sonde (voir figure 2) à intervalles réguliers, compris entre 2 et 4m, permet d'améliorer la capacité d'échange de la sonde géothermique, et évite le transfert parasite de calories entre le tube aller et le tube retour de l'échangeur en U. Un matériau de remplissage est injecté dans l'espace entre les tubes et la paroi du forage pour assurer un bon contact thermique entre les tubes et le terrain. Selon que la température du fluide circulant dans les tubes est inférieure ou supérieure à la température du terrain, le transfert de calories a lieu du terrain vers le fluide (extraction de chaleur du sol) ou bien du fluide vers le terrain (injection de chaleur dans le sol). Raccordées à une pompe à chaleur, une ou plusieurs sondes géothermiques permettent ainsi de satisfaire les besoins de chauffage, et le cas échéant de production d'eau chaude sanitaire d'un bâtiment (mode extraction), ainsi que les besoins de rafraîchissement (mode injection).

La figure 1 ci-dessous représente le fonctionnement d'un tel système géothermique réversible.

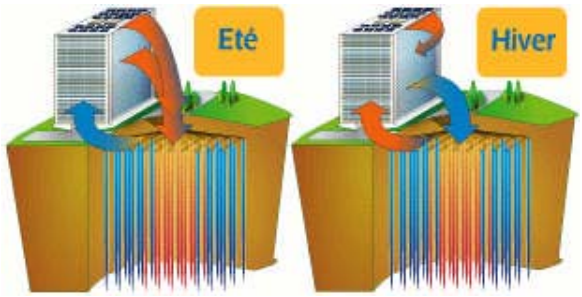


Figure 1. Système géothermique réversible.

Installation des sondes géothermiques

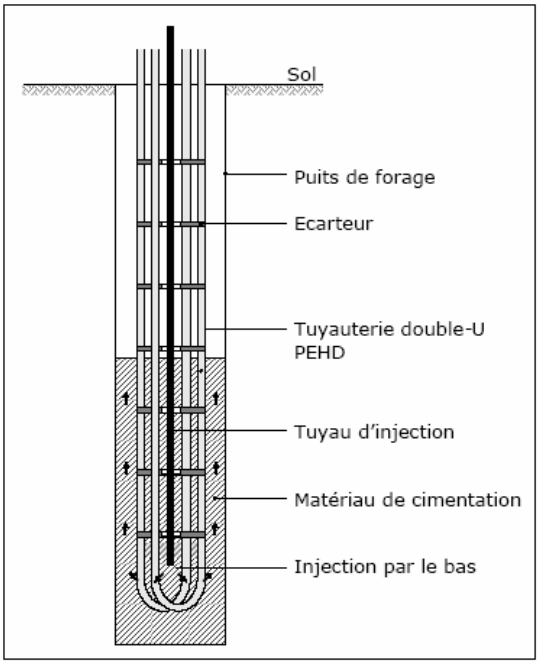
Le procédé d'installation des sondes géothermiques est décrit dans le document de référence actuel en matière de géothermie sur sonde verticale (BRGM 2005).

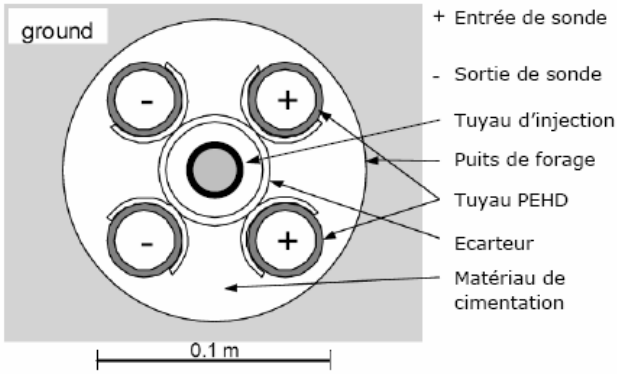
L'installation de l'échangeur géothermique nécessite une opération préalable de forage vertical, qui sera réalisé selon une technique de forage usuelle, adaptée à la géologie locale. Le diamètre de perforation doit être déterminé par le foreur en fonction de la nature du terrain, la profondeur à atteindre, et la nature de l'échangeur à installer : simple ou double U, diamètre des tuyaux, présence d'écarteurs de sonde, etc. Le diamètre choisi doit permettre une descente aisée des tubes dans le puits, tout en minimisant la quantité de cimentation à injecter. Le diamètre de forage est généralement compris entre 140 et 165mm.

La sonde géothermique et le tuyau d'injection du matériau de cimentation sont descendus ensemble dans le puits de forage, opération exécutée à l'aide d'un touret. En présence d'eau dans le puits, la sonde peut préalablement être remplie de fluide (fluide caloporteur ou eau) , et munie d'un lest, afin de faciliter la descente par gravité de la sonde géothermique. Le cas échéant, il est nécessaire de protéger le tubage provisoire en tête de forage afin qu'il n'endommage pas les tuyaux PEHD lors de la descente de la sonde dans le puits. A la suite de l'installation, et avant la cimentation du puits, un test en pression doit être réalisée pour chacune des deux tuyauteries en U (BRGM 2005).

Un scellement efficace du puits de forage est indispensable non seulement pour prévenir toute pollution accidentelle des eaux souterraines, mais également pour assurer un bon contact thermique entre la sonde géothermique et le terrain. Cette opération devra être réalisée avec un soin tout particulier ; elle sera notamment réalisée sous pression, de bas en haut, en maintenant continuellement l'extrémité du tuyau d'injection dans le coulis, de sorte que le coulis de remplissage bouche l'espace en remontant (voir figure 2.a).

Un coulis ciment/bentonite est usuellement employé pour le scellement du puits. Toutefois il existe sur le marché plusieurs matériaux de cimentation dédiés aux applications géothermiques, et présentant une conductivité thermique plus élevée (environ 2W/m.K contre 0.8W/m.K pour le coulis ciment/bentonite) : ThermoCem, Stüwatherm, Prestobent.





2.a. Procédé de cimentation **2.b. Vue de dessus de la sonde géothermique**

Figure 2. Cimentation du puits. Sonde géothermique double-U.

Le raccordement des sondes géothermiques vers le bâtiment est réalisé au moyen de conduites en PEHD disposées en tranchée (voir figure 3.a), et raccordées aux têtes de sonde par l'intermédiaire de manchons électrosoudables normalisés. Le raccordement de ces conduites au bâtiment peut être exécuté sur des collecteurs installés en local technique, ou via des collecteurs enterrés disposés à l'extérieur (voir figure 3.b), cette dernière option permettant de minimiser le nombre de conduites devant traverser les parois du bâtiment.

3.a. Installation des conduites de raccordement

3.b. Collecteur enterré préfabriqué.

Figure 3. Eléments de raccordements des sondes vers le bâtiment

Le Test de Réponse Thermique

Le test de réponse thermique constitue une étape préalable indispensable pour dimensionner un système énergétique mettant en oeuvre un ensemble de sondes géothermiques verticales. Le test est effectué sur une ou plusieurs sondes géothermiques installées sur le site même du futur système géothermique. Ce test, réalisé au moyen d'un appareil spécifique (voir figure 4) permet :

- de mesurer in situ les propriétés thermiques moyennes du sous-sol,
- de relever la géologie et l'éventuelle activité hydrogéologique sur le site,
- de prévoir, au vu de la géologie locale, la technique de forage la plus appropriée pour la réalisation du projet dans son ensemble.

Le test de réponse thermique consiste à mesurer la réponse d'un terrain à un stress thermique appliqué à l'aide d'un réchauffeur fournissant une quantité d'énergie à un fluide (eau) circulant dans la sonde géothermique, cette dernière jouant le rôle d'échangeur thermique entre ce fluide et le terrain. Le stress thermique consiste en l'injection d'une puissance thermique P_{th} constante pendant toute la durée du test, le débit du fluide étant maintenu également constant. Les grandeurs observées, caractérisant la réponse du terrain, sont les températures T_E et T_S du fluide respectivement à l'entrée et à la sortie de la sonde géothermique. Selon la théorie de la source linéaire de chaleur (Eskilson 1987 ; Gehlin 2002), l'évolution dans le temps de la température moyenne du fluide $T_F=(T_E + T_S)/2)$ suit une loi logarithmique :

$$T_F(t) = \frac{p_{th}}{4\pi.\lambda}\ln(t) + p_{th}.\left[R_b + \frac{1}{4\pi.\lambda}\left(\ln(\frac{4a}{r^2}) - \gamma\right)\right] + T_0 = k\ln(t) + C \qquad (1)$$

Avec : P_{th} puissance d'injection par mètre de sonde en W/m, λ conductivité thermique du terrain en W/m.K, R_b résistance équivalente de la sonde en K.m/W, a diffusivité du terrain en m^2/s, r rayon du forage en m, γ constante d'Euler = 0.5772, T_0 température initiale du terrain en °C.

L'analyse de la courbe $T_F(t)$ enregistrée durant le test permet de déterminer :

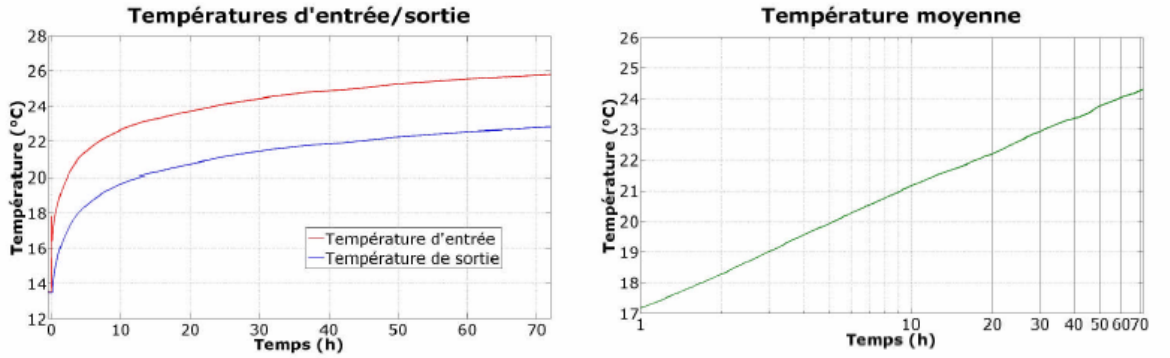
- la température initiale du terrain T_0,
- la conductivité thermique moyenne du terrain λ,
- la résistance équivalente de la sonde géothermique R_b,
- la chaleur spécifique volumique moyenne du terrain C_p.

Cette dernière peut être déduite avec une précision suffisante à partir des informations relatives à la géologie du site recueillies au cours du forage, et des valeurs usuelles rencontrées dans la littérature. Pour les valeurs usuelles de conductivité thermique et de chaleur spécifique des formations géologiques, on peut se reporter au guide de référence édité en Allemagne (VDI 2000a).

Figure 4. Appareillage de test développé par VENTILONE.

Il est recommandé de procéder à un suivi hydrogéologique de l'opération de forage préalable à l'installation de la sonde de test. Ce suivi permet d'une part de relever les formations géologiques présentes sur le site, mais également d'obtenir des informations concernant l'activité hydrogéologique. La connaissance précise de la géologie du site permet de valider les résultats du test et d'évaluer la chaleur spécifique du sous-sol. Par ailleurs, il est important d'évaluer les déplacements hydrogéologiques, qui jouent un rôle important sur le fonctionnement d'un système géothermique, notamment dans le cas de systèmes énergétiquement déséquilibrés (bilan annuel extraction/injection de calories dans le sol déséquilibré), puisque dans ce cas ces déplacements participent à la recharge thermique du sous-sol.

La figure 5 ci-dessous présente un exemple de courbes obtenues à l'issue du test de réponse thermique : les courbes de la figure 5.a représentent les températures en entrée (T_E) et en sortie (T_S) de la sonde de test. La courbe de la figure 5.b représente quant à elle la température moyenne $T_F(t)$ tracée avec une échelle logarithmique en abscisse (temps). A partir de 12h de test, cette courbe peut être approximée par une droite, conformément à l'expression (1), dont la pente k permet la détermination de la conductivité du terrain.



5.a. Température d'entrée/sortie **5.b. Température moyenne en échelle log.**

Figure 5. Exemple de réponse thermique du terrain au cours du test.

Conception d'un champ de sondes

La conception d'un champ de sondes géothermiques doit prendre en compte un ensemble de paramètres tels que la demande thermique à satisfaire (puissance thermique pour le chauffage, le rafraîchissement, la production d'eau chaude sanitaire), le bilan énergétique annuel au niveau du sous-sol (bilan des quantités d'énergie extraite et injectée), les propriétés thermiques du sous-sol (mesurées par le test de réponse thermique), la présence ou non d'aquifère traversant le champ de sondes.

Le flux géothermique naturel en provenance du centre de la terre étant trop faible pour participer à la recharge thermique du terrain (de l'ordre de 0,06W/m (Pahud 2002)), le sol ne constitue pas une ressource inépuisable d'énergie, et il est nécessaire de prendre en considération l'éventuelle recharge naturelle en présence d'un aquifère balayant la zone, ou la recharge par réinjection de calories (injection de calories par le rafraîchissement du bâtiment, ou par une production solaire thermique, par exemple).

Afin de limiter les effet d'épuisement de la ressource, il est conseillé de disposer les sondes en ligne, avec un espacement d'au moins 10 mètres entre sondes (BRGM 2005). Toutefois, en présence d'une nappe importante associée à un sous-sol relativement perméable, ou lorsque le profil de la demande thermique à satisfaire induit un fonctionnement équilibré au niveau du sous-sol, le champ de sonde peut être conçu avec une géométrie matricielle, et avec un espacement entre sonde s réduit. La conception et le dimensionnement d'un tel champ de sondes, pour des projets géothermiques supérieurs à 30kW, passe alors nécessairement par l'utilisation d'outils de simulation numérique adéquats (VDI 2000b).

La figure 6 ci-dessous présente un exemple de résultats d'une étude menée par simulation numérique. Le système géothermique, constitué de 19 sondes disposées en quinconce avec un espacement de 4m, est situé sur un site absent d'écoulement hydrogéologique. Ce système a alors été conçu pour soumettre le terrain à un cycle annuel de charge/décharge parfaitement équilibré. Ce fonctionnement, appelé stockage intersaisonnier (Ventilone 2006), garantit la pérennité du système puisque l'inertie thermique du sol est utilisée pour stocker les calories excédentaires du bâtiment en période estivale et fournir les calories nécessaires en période hivernale, le bilan énergétique au niveau du sous-sol étant nul sur un cycle complet.

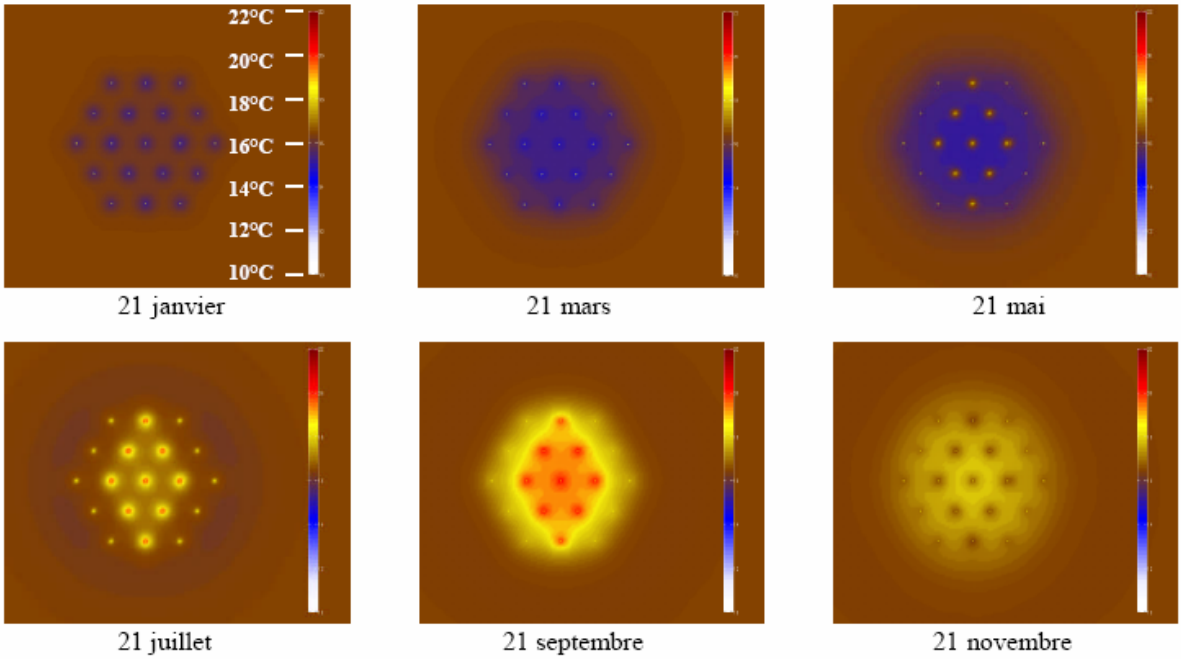


Figure 6. Résultat de simulation numérique : évolution sur un cycle annuel des températures dans le sol pour un système de 19 sondes géothermique. Cas d'un système équilibré, sans écoulement hydrogéologique.

Références bibliographiques

Eskilson P (1987). Termal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Doctoral Thesis, Department of Mathematical Physics, Lund University, Sweden, 1987.

VDI 4640 (2000a). Engineering Guideline : Thermal use of the underground. Part 1 : Fundamentals, approvals, environmental aspects. V DI Guideline, Germany, 2000.

VDI 4640 (2000b). Engineering Guideline : Thermal use of the underground. Part 2 : Ground source heat pump systems. VDI Guideline, Germany, 2000.

Gehlin S (2002) . Thermal Response Test, Doctoral Thesis, Department of Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2002.

Pahud D (2002). Geothermal energy and heat storage , Doctoral Thesis, SUPSI, Laboratorio di energia, Ecologia ed Economia, Switzerland, 2002.

BRGM (2005). Capteurs géothermiques verticaux pour pompes à chaleur. Aspects réglementaires, règles de l'art et qualification des entreprises de forage. BRGM/RP-53675-FR, BRGM, France, 2005.

Ventilone (2006) Seguin B, Reiss C. Le stockage intersaisonnier fait ses preuves. Environnement & Techniques N°272, Juin 2006.

Géothermie à Orly : un forage de type pétrolier en centre ville

JOUBERT Jean-Michel [1], AUSSEUR Jean-Yves [1]

1 ANTEA – Direction Technique, 3 avenue Claude Guillemin, Orléans, France, jm.joubert@antea-ingenierie.fr

Résumé
L'OPAC du Val-de-Marne gère à Orly un réseau de chaleur urbain pour le chauffage de 8 000 équivalents logements. La production de chaleur est assurée par 2 doublets géothermiques en service depuis 1984, exploitant l'eau à 76°C de l'aquifère du Dogger entre 1600 et 1700 m de profondeur. L'exploitation du doublet principal a été arrêtée en 2005 et son remplacement a été décidé. De nouvelles cibles ont été déterminées dans le Dogger par modélisation hydrodynamique et thermique en simulant l'historique de l'exploitation et sa poursuite pour les 30 prochaines années. Le nouveau doublet a été réalisé sous la maîtrise d'œuvre d'ANTEA, sur le site même des ouvrages abandonnés. L'entreprise COFOR a fait appel aux techniques du forage pétrolier : atelier de forage dirigé en gros diamètre, contrôle de l'artésianisme, des risques d'éruptions, gestions des effluents… Le doublet a été réalisés en 6 mois, fin 2007, et mis en service début 2008.

Contexte général

Situé entre 1 500 et 1 800 mètres de profondeur dans le sous-sol de la région Ile-de-France, l'aquifère du Dogger renferme une eau dont la température est généralement comprise entre 60 et 80°C. Ce réservoir assure aujourd'hui le fonctionnement de 34 installations géothermales. Au début des années 80, la géothermie profonde a connu un rapide démarrage sous les effets des chocs pétroliers, jusqu'en 1985 où le développement de la filière sera stoppé net, pour des raisons diverses, d'ordre économique (baisse du cours du pétrole), technique (corrosion et dépôts dans les tubages) et financière (taux élevés).

Depuis 1984, l'OPAC du Val-de-Marne exploite l'aquifère du Dogger par deux doublets de forages qui alimentent un réseau de chaleur de 18 km desservant des logements d'Orly, de Choisy-le-Roi et des bâtiments communaux. En 2005, à la suite d'un incident technique, le doublet ORLY II a du être fermé. L'OPAC du Val-de-Marne a alors décidé de réaliser un nouveau doublet, forage de production et forage d'injection, à l'emplacement même du doublet défectueux, au centre ville d'Orly sur le parking d'un centre commercial.

La puissance de production attendue est de 10 MW maximum (soit 45 000 MWh annuels) ce qui correspond à environ 8 000 équivalents logements. L'OPAC a confié à ANTEA une mission de maîtrise d'œuvre (conception et travaux) pour la réalisation de ce nouveau doublet.

Les ouvrages ont été dimensionnés pour fonctionner avec un débit d'exploitation de 300 m3/h à 76 °C. À ce débit, l'OPAC assure un taux de couverture de 86% par la géothermie de son réseau de chaleur qui permet d'éviter chaque année l'émission de 15 000 tonnes de CO2. Les deux nouveaux forages sont entièrement tubés et cimentés face aux terrains aquifères supérieurs du Tertiaire, ainsi que face à la Craie du Secondaire, et face aux sables aquifères de l'Albien et du Néocomien. L'eau du Dogger, salée à 15 g/l (chloruré sodique), est intégralement réinjectée dans sa formation d'origine.

A ces profondeurs, l'eau est fréquemment salée et chargée en sulfures, ce qui accélère la corrosion des tubages. Pour limiter la corrosion, un produit inhibiteur adapté à la chimie des eaux est injecté en permanence en fond de puits de production. La maintenance de l'installation consiste à injecter régulièrement l'inhibiteur de corrosion, à remplacer la pompe d'exhaure environ tout les 5 ans, à réaliser périodiquement des diagraphies de contrôle des tubages et à effectuer un suivi physico-chimique de l'installation.

C'est le premier doublet géothermique en aquifère profond réalisé depuis une vingtaine d'année en France métropolitaine. Le coût de réalisation, d'équipement et de raccordement des ouvrages est de 10,5 millions d'euros dont une subvention de l'ADEME de 1,4 million d'euros. Les deux forages déviés ont été exécutés par l'entreprise COFOR qui a également assuré la fermeture par cimentation des deux forages de l'ancien doublet abandonné.

Préparation de l'opération

En premier lieu, la conception des forages du doublet et les différentes options techniques sont étudiées. Dans le cas particulier du projet d'Orly, la présence d'une zone déjà exploitée durant plus de 20 ans a du être prise en compte dès le départ sachant que les ouvrages ne pouvaient pas être implantés à distance de l'ancien doublet. Une modélisation hydrodynamique et thermique de l'aquifère du Dogger a été réalisée pour établir le choix des nouvelles cibles (points d'entrée des forages au toit du Dogger aquifère : Bathonien oolithique) en fonction de l'état thermique de l'aquifère après plus de 20 années d'exploitation.

L'étude de la conception des ouvrages a porté sur la trajectoire des ouvrages (figure 1), le choix des matériaux (tubages), leurs diamètres en fonction des objectifs de production et d'exploitation, le type et la mise en œuvre des cimentations et les programmes de contrôles et de suivi.

En parallèle, a été engagé l'établissement pour instruction des dossiers réglementaires (loi sur l'eau, code de l'environnement). La gestion administrative des projets de géothermie est assurée par la DRIRE : autorisations de recherche et d'exploiter de type minier, fixant la durée d'exploitation autorisée, la puissance, le débit et le périmètre d'exploitation.

Dès la conception, la gestion prévisionnelle des impacts du chantier a dû être étudiée. Les points les plus sensibles compte tenu de la localisation en milieu urbain des ouvrages ont été : les impacts sonores, sur la circulation (par exemple, une chaine de 80 transports lourds est nécessaire lors de l'amenée de l'atelier de forage et de son repli), les risques spécifiques aux opérations de forage tels que les risques d'éruption, de dégagement de gaz toxiques –H_2S-, l'acceptabilité par le voisinage d'un chantier actif jour et nuit et sans arrêt dominical…

L'installation de la plate forme a du prendre en compte l'exigüité de l'espace disponible, 5000 m² alors qu'une plate forme nominale exigerait 8000 m². La plate forme étant établie sur le parc de stationnement d'un centre commercial, la présence du public à proximité a nécessité l'établissement d'un plan d'évacuation commun avec celui du centre commercial. Par ailleurs, les connexions aux réseaux d'alimentation en eau et d'eaux usés ont du être négociées en fonction des besoins du chantier.

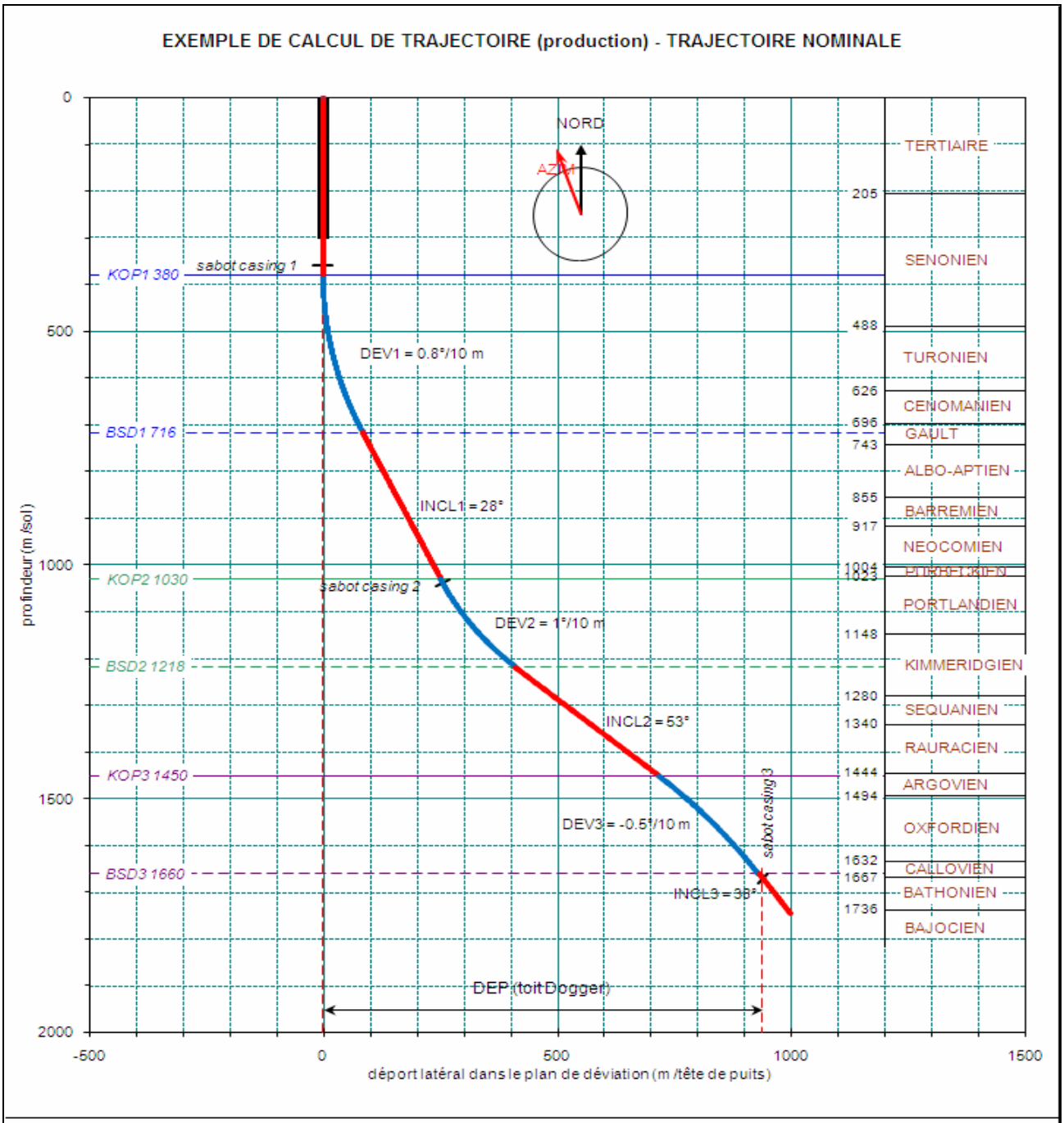
Le fonctionnement du chantier 24 h/24 et 7 jours/7 a nécessité des aménagements pour les travaux de nuit et pour les opérations à risques ou impacts particuliers (tubage, cimentations, acidifications, tests de production).

Déroulement des travaux

Les opérations de forage se sont déroulées dans l'ordre suivant : Forage d'injection, développement et tests, forage de production, développement et tests, raccordements à la centrale géothermique et enfin, scellement des forages du doublet abandonné. Un exemple du planning des opérations effectuées pour le forage de production GORY 6A est décrit ci-après :

Le forage GORY 6A a été réalisé à la suite du forage GORY 5 selon le phasage général suivant :

- du 25/06 au 10/07/2007 : Amenée et montage atelier MAS3000 ;
- du 11/07 au 14/09/2007 : Réalisation du forage GORY 5 et tests (attente du 14 juillet au 10 août pour prise de décision pour reconfiguration du forage, suite aux pertes entre 100 et 140 m) ;
- du 14/09 au 22/09/2007 : Ripage de l'atelier MAS 3000 au droit de GORY 6 ;
- du 23/09 au 29/09/2007 : Forage 26'' à 362 m et pose-cimentation du casing 18''5/8 ;
- du 30/09 au 21/10/2007 : Forage dirigé 17''1/2 jusqu'à 1132 m ; coincement garniture ;
- du 22/10 au 29/10/2007 : Essai de dégagement ; attente décision du 26 au 29/10 ; décision reprise en side track à 380 m (déviation provoquée sur nouvelle trajectoire) ;
- du 30/10 au 11/11/2007 : Instrumentation, back off (poisson de 862 à 1082 md), abandon de GORY6 par cimentation à 360 m ;
- du 12/11 au 26/11/2007 : Reprise en side track; forage en 17''1/2 dirigé de 380 à 1033 md, tubage 13''3/8 et cimentation ;
- du 27/11 au 15/12/2007 : Forage dirigé en 12''1/4 de 1033 à 2007 md, tubage 9''5/8 et cimentation ;
- du 16/12 au 24/12/2007 : Forage du Dogger en 8''1/2 de 2007 à 2107 md, mise en eau, développement et tests de production.



	Diamètre	mTVD	MD
forage 1	20"	365	365
forage 2	17"1/2	1043	1099
forage 3	12"1/4	1672	2034
forage 4	8"1/2	1747	2129
casing 1	18"5/8	360	360
casing 2	13"3/8	1038	1094
casing 3	9"5/8	1670	2031

(fond forage)

	mTVD	MD
TOIT DOGGER	1667	2028

DEPORT (toit du Dogger)	937	m
DEPORT (fond du forage)	1000	m
Chambre de pompage	300	m
AZIMUT plan de déviation	N 340	°

ANTEA

KOP : profondeur de départ de la section déviée
DEV : angle de build-up
BSD : base de la section déviée
INCL : inclinaison moyenne en section stabilisée

MD : longueur en mètres forés
TVD : profondeur verticale
DEP : déport latéral par rapport à la tête de forage
AZIM : orientation du plan vertical de déviation

***Figure 1** : Calcul de trajectoire de forage*

Contrôles et réception

Les contrôles ont concerné les aspects techniques dans les domaines (exemple du forage de production GORY6A) :

- du respect du cahier des charges techniques de réalisation ;
- du cadre réglementaire (protection des aquifères, permis d'exploitation) ;
- du respect des consignes de sécurité (BOP–obturateurs de secours, plan d'évacuation, procédure H_2S) ;
- de l'atteinte des objectifs de productivité.

A cet effet, les contrôles ont porté sur le suivi géologique (adéquation des principales cotes d'arrêt avec les objectifs du forage), les paramètres de déviation (suivi des écarts à la trajectoire définie), les cotes et la mise en œuvre des différentes phase de tubage et de cimentation réalisées, le forage et le développement de l'aquifère du Dogger et enfin les essais de production.

Les choix particuliers concernant le traitement des incidents de forage sur GORY 6 et les caractéristiques techniques de son abandon, la nouvelle trajectoire de GORY 6A, le plan des diagraphies, le programme de développement et de tests ont fait l'objet de concertations, de propositions et d'accords de la maîtrise d'œuvre.

Les cotes des formations géologiques traversées par le forage GORY 6A et les éléments de trajectométrie utilisés sont tirés des rapports journaliers transmis par COFOR. Les profondeurs, les longueurs forées et tubées et les volumes indiqués proviennent des rapports journaliers de COFOR. Les diagraphies consultées sont les originaux SCHLUMBERGER remis par COFOR. Les données de tests ont été fournies par COFOR, y compris les enregistrements débit-pression-température.

Les casings et tubages ont fait l'objet de contrôles qualité après livraison sur parc, de plans d'assemblages en fonction des coulées et d'un contrôle final par diagraphie après mise en place.

Les principales cotes techniques des forages d'injection et de production sont fournies dans les tableaux suivants.

Phase de forage (inject)	Repère géologique (toit de la formation)	Profondeurs prévisionnelles		Profondeurs effectives		Ecart TVD
		TVD*	MD**	TVD	MD	%
Forage 17 $^{1/2}$	Crétacé supérieur : craie			136	136	
	Gault : argiles	653	653	674	674	3,2
	Albien/Aptien : sables & arg.	700	700	706	706	0,9
	Néocom/Purbeck : arg. sabl.	813	813	819	819	0,7
KOP à 1025 m Forage 12 $^{1/4}$	Portlandien: calcaires	981	981	985	985	0,4
	Kimméridg.: marnes & calc.	1103	1104	1110	1111	0,7
	Oxford. inf & moyen: calc.	1296	1314	1295	1321	-0,1
	Callovien: argiles & marnes	1589	1696	1583	1706	-0,4
Forage 8 $^{1/2}$	Bathonien : calc. & calc ool.	1625	1743	1629	1746	0,2
	Bajocien : calcaires à pellets	1695	1834	1696	1826	0,1
Fond forage		1725	1873	1721	1856	

** TVD : profondeur verticale (True Vertical Depth)* *** MD : longueur forée (Meters Drilled)*

***Tableau 1** : Principales cotes du forage de production GORY6A*

Phase de forage (production)	Repère géologique (toit de la formation)	Profondeurs prévisionnelles		Profondeurs effectives		Ecart TVD
		TVD*	MD**	TVD	MD	%
Forage 26'' à 360 m vertical Forage 17 ½ KOP à 380 m	Crétacé supérieur : craie		Changement de trajectoire entre GORY6 prévisions modifiées	136	136	
	Gault : argiles	662		663	666	0,9
	Albien/Aptien : sables & arg.	711		705	711	0,0
	Néocom/Purbeck : arg. sabl.	817		819	834	2,1
Forage 12 1/4	Portlandien: calcaires	982		982	1018	0,0
	Kimméridg.: marnes & calc.	1107		1107	1166	0,0
	Oxford. inf & moyen: calc.	1291		1291	1456	0,0
	Callovien: argiles & marnes	1577		1577	1937	0,0
Forage 8 1/2	Bathonien : calc. & calc ool.	1623		1623	1999	0,0
	Bajocien : calcaires à pellets	1690		1691	2087	0,1
Fond forage				1707	2107	

** TVD : profondeur verticale (True Vertical Depth)* *** MD : longueur forée (Meters Drilled)*

***Tableau 2** : Principales cotes du forage de réinjection GORY5*

Les contrôles par diagraphies réalisés comprennent les diagraphies de contrôle géologique (gamma naturel et porosité neutron), les diagraphies techniques concernant la qualité de mise en œuvre des tubages (diagraphies de cimentation CBL/VDL, imagerie sonique, diamétreurs multi-bras), et les diagraphies de production (pression, débit, température).

Un exemple de résultat de diagraphies de contrôle dans l'aquifère est fourni en figure 2. Il met en évidence la faible épaisseur productive du Bathonien oolithique, une tranche de 10m de puissance seulement fournissant 85% de la production totale.

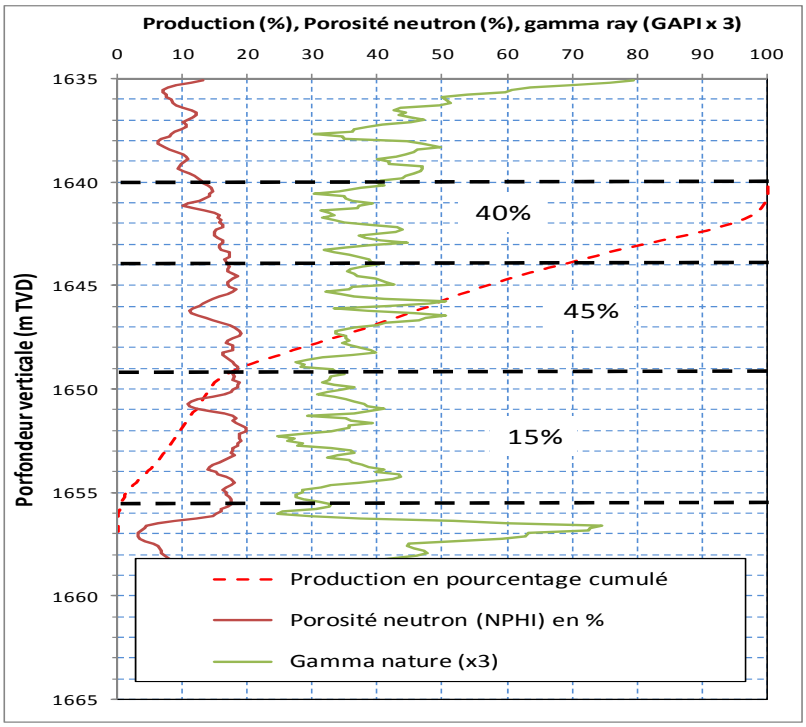


***Figure 2** : Diagraphies de production dans l'aquifère du Dogger*

Résultats et perspectives

Les objectifs de productivité et de température ont été largement atteints, puisque le doublet géothermique d'Orly est susceptible d'être exploité à plus de 350 m^3/h pour un objectif fixé au départ à 300 m^3/h avec une température en tête en production de 76°C.

Les performances atteintes par les ouvrages sont résumées sur les graphes de la figure 3.

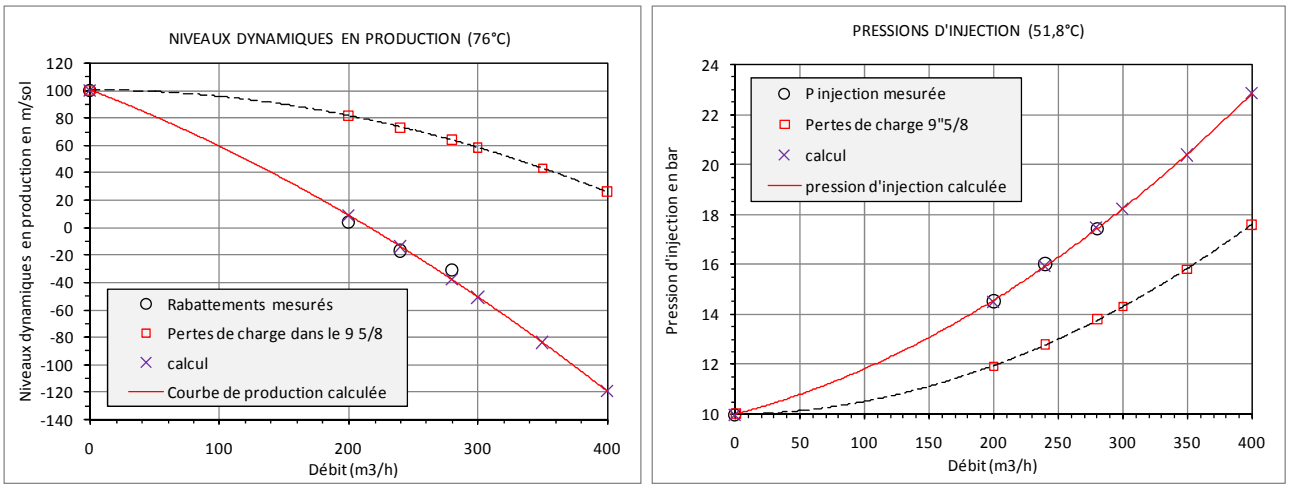


Figure 3 : *Courbes de production du forage GORY6A et d'injection du forage GORY5*

Ce doublet est le premier à être réalisé depuis la période de développement de la géothermie entre 1980 et 1985 en région parisienne à partir de l'aquifère du Dogger. Les choix techniques retenus, les options concernant les diamètres, les incidents et les décisions ayant permis de les résoudre dans un nouveau contexte réglementaire constituent une expérience unique qui devra être valorisée à l'occasion des nouvelles opérations actuellement étudiées.

La gestion des projets

Gestion des projets, de la réflexion à la réalisation
par Olivier GRIERE (G2H Conseils) 167

Le rôle du maître d'œuvre privé dans la réalisation des forages d'eau
par Bruno MARSAUD (ANTEA) 177

Conversion d'un puits d'exploration de Gaz de France en piézomètre
par Jean-François VERNOUX (BRGM) 183

Laayoune - Champ captant d'eau de mer
par Bruno CANALETA (SOGREAH) 189

Gestion des projets, de la réflexion à la réalisation

Olivier GRIERE

G2H Conseils 29 rue Blanche Hottinguer 77600 GUERMANTES, g2hconseils@club.fr

Résumé

Toute réalisation d'un forage d'eau nécessite une réflexion préalable qui débute par une analyse hydrogéologique puis par la conception de l'ouvrage à réaliser en intégrant l'ensemble des contraintes et en recherchant une optimisation objectifs/coûts et préservation de l'environnement.

Pour un tel projet, il est nécessaire de faire appel à des techniciens maîtrisant l'hydrogéologie et également les techniques de forages.

Quelque soit l'ouvrage à réaliser, les différentes étapes préalables à la concrétisation sont indispensables. Elles doivent être menées en toute objectivité et au besoin en proposant différentes solutions.

Le plus souvent, les forages d'eau sont réalisés pour une durée d'exploitation importante, c'est pourquoi la conception de l'ouvrage doit être particulièrement soignée pour assurer une durée de vie la plus longue possible en recherchant un coût d'exploitation optimal.

Les forages d'eau ne peuvent échapper à un suivi et un entretien réguliers, ces aspects doivent être précisés.

Quelque soit la nature du forage d'eau, les aspects environnementaux ne peuvent en aucun cas être ignorés ni minimisés.

L'objectif de cette communication est de présenter ces différents aspects en fonction de différents contextes hydrogéologiques et des attentes du maître d'ouvrage. Bien entendu, il ne faudrait pas oublier les forages domestiques qui échappent généralement à des études préalables mais qui constituent à l'échelle nationale l'essentiel des activités de forages.

La genèse du projet

La réalisation d'un forage d'eau constitue un acte fort pour la maître d'ouvrage. Tout d'abord s'agissant d'une recherche d'eau, il existe un risque d'échec. Si dans les domaines minier et pétrolier, cette notion d'échec fait partie du quotidien, il n'en est pas forcément le cas dans le domaine de l'eau. Il est donc primordial de minimiser ce risque d'échec, c'est pourquoi tout projet doit faire l'objet d'une étude de faisabilité puis de conception.

Ensuite, si la ressource apparaît en adéquation avec l'objectif assigné, il convient de concevoir le design de l'ouvrage à réaliser.

C'est pourquoi, le maître d'ouvrage doit en préalable définir ses besoins d'un point de vue quantitatif mais également le cas échéant d'un point de vue qualitatif en fonction des usages prévus (eau potable, eau minérale, eau industrielle …).

Outre la définition des besoins, le maître d'ouvrage peut avoir d'autres contraintes notamment foncières. Ces dernières même si elles doivent être prise en considération ne sauraient prévaloir dans un premier temps.

De l'importance de l'étude hydrogéologique

L'étude du contexte hydrogéologique doit permettre de préciser le ou les aquifères en présence. Pour cela, un hydrogéologue doit intervenir avec une connaissance régionale. L'essentiel des aquifères français sont connus dans les grandes lignes. Pour un projet, il convient d'affiner l'échelle de l'étude. De simples considérations d'ordre général ne sauraient suffire.

Il convient donc de rechercher le maximum d'informations pour préciser s'il existe un ou plusieurs horizons aquifères ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques (productivité, piézométrie, faciès physico-chimiques, vulnérabilité, état d'exploitation…).

Les différents Systèmes d'Information Géographique (lorsqu'ils existent) peuvent constituer un préalable toute fois insuffisant pour que le maître d'ouvrage puisse prendre une décision.

L'hydrogéologue doit zoomer pour cerner au mieux le contexte. Il n'est pas question de développer les différentes méthodes possibles, nous allons simplement citer quelques pistes :

- examen de la géologie à partir des cartes géologiques et des forages existants et pour les contextes compliqués examen complémentaire de terrain,
- étude structurale notamment pour les aquifères fracturés,
- investigations géophysiques pour préciser l'agencement des terrains. Pour cela, il existe de nombreuses méthodes qu'il convient de sélectionner en fonction du contexte et de l'objectif,
- campagne piézométrique et le cas échéant de prélèvements pour analyses,
- étude de la vulnérabilité de l'aquifère à adapter en fonction de l'objectif,
- étude des risques de pollution,
- bilan quantitatif (importance des prélèvements, sensibilité aux sécheresses).

L'étude hydrogéologique ne serait pas complète si les aspects administratifs ne sont pas abordés précisément.

Les aspects réglementaires ont déjà été abordés dans ce colloque mais il convient de rappeler que, bien souvent, le maître d'ouvrage ne maîtrise pas ces aspects. C'est pourquoi, le maître d'œuvre doit préciser la réglementation en vigueur.

En fonction de l'usage et de la nature de l'installation pour laquelle le forage est prévu, le projet peut relever de différents Codes et réglementations, à savoir Code Minier, Code de l'Environnement, Code de la Santé Publique, ICPE mais également d'un SDAGE ou d'un SAGE et le cas échéant d'arrêtés préfectoraux ainsi que de DUP de captages d'eau potable et parfois de captages d'eau minérale ou thermale.

En conclusion, l'étude hydrogéologique doit préciser si le contexte local est susceptible de répondre aux attentes du maître d'ouvrage ainsi que la coupe géologique prévisionnelle.

Conception de l'ouvrage

Quel type d'ouvrage est en mesure de répondre aux objectifs assignés ? Cette question peut apparaitre anodine mais en réalité différentes solutions peuvent être envisagées selon le contexte hydrogéologique.

Bien que rares, les galeries de captage peuvent constituer une solution élégante. Il est également possible d'envisager le captage d'une source. Dans ces cas, la conception des ouvrages à réaliser relève plus du génie civil.

Dans d'autres cas, il peut être possible d'envisager la réalisation de puits, puits à drains adaptés à des aquifères peu profonds en vue d'une capacité de production élevée.

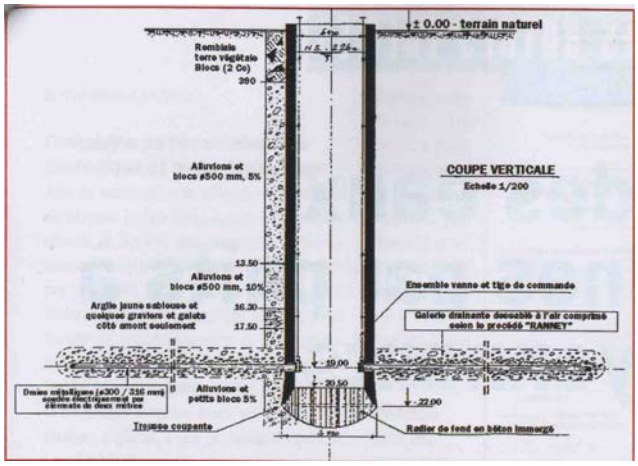


Figure 1 : Exemple de puits à drains

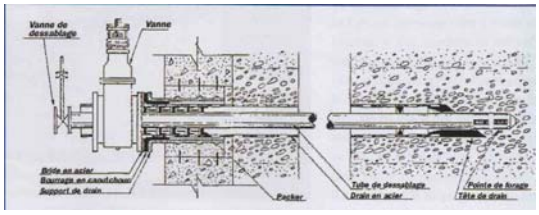


Figure 2 : Détail d'un drain

Pour l'essentiel, il s'agit de forages pour lesquels il convient de définir la conception technique.

De nombreux critères doivent être pris en considération :

- nature géologique de l'aquifère à capter,
- profondeur de l'aquifère,
- présence d'aquifères sus jacents,
- caractéristiques des eaux à capter,
- débit prévisionnel et niveau en pompage,
- nature des équipements de pompage,
- accessibilité au lieu de forage.

Ces différents critères permettront de définir la conception de l'ouvrage à réaliser.

Pour mener à bien la conception de l'ouvrage à réaliser, des compétences et des connaissances en matière de forages sont indispensables. Il s'agit alors d'analyser les différentes contraintes et les possibilités techniques de réalisation, les aspects financiers ne peuvent être ignorés.

Nous ne pouvons, dans le cadre de cet exposé, détailler tous les cas. Nous n'évoquerons que quelques aspects.

Point à étudier	implications	remarques
Débit de pompage et rabattement	Dimensionnement de la pompe donc de la profondeur de la chambre de pompage	
Chimie de l'eau	Nature des équipements et tubages	
Aquifères sus jacents	Nécessité d'isolation préalable	Conditionne la géométrie du forage
Nature des terrains à traverser	Technique de forage Zones de perte	Dans certains cas, différentes techniques peuvent être mise en œuvre sur le même forage Importance dans le choix des fluides de forage
Cimentation	Géométrie de l'ouvrage et technique de cimentation	
Complétion	Technique de gravillonnage	Modes de développement
Métrologie	Géométrie de l'ouvrage	La possibilité de mesurer le niveau de la nappe est théoriquement obligatoire
Artésianisme	Conception de la tête de forage	Difficultés éventuelles pour les cimentations
Nature des équipements de pompage et colonne d'exhaure	Compatibilité avec les matériaux du forage	Exemple pompe et colonne d'exhaure Inox dans tubage acier

Tableau 1 : principaux points à étudier

Chimie de l'eau

Cet aspect doit être examiné attentivement. Dans le cadre d'un projet, toutes les informations relatives à la chimie de l'eau devront être recherchées. En cas d'incertitude, la réalisation d'un sondage de reconnaissance pourra être nécessaire.

Suivant les spécificités de l'eau, des phénomènes de colmatage peuvent se produire.

Il peut s'agir d'incrustations ou entartrage par des carbonates. Ce phénomène se produirait sous l'influence de la mise en vitesse de l'eau à l'entrée du forage qui entraîne un dégagement du CO_2 induisant un déplacement de l'équilibre calco-carbonique.

Les dépôts ferrugineux, s'il y a apport d'oxygène dans une eau contenant des ions Fe2+ et/ou Mn 2+, la production de précipités insolubles peut être importante. Des phénomènes biologiques peuvent également intervenir notamment par la présence de bactéries sidérophiles et manganophiles du type Crenothrix et Leptothrix notamment. Une solution pouvant être mise en œuvre consiste à interdire l'introduction d'oxygène dans le forage à l'aide d'une tête étanche.

Figure 3 : Exemple de tête étanche

Dans certains cas, l'inertage du forage est envisageable ou bien encore le traitement préventif par bactéricide. Une autre solution consiste à utiliser un système de pompage particulier tel le siphonage avec tête étanche ou pompe sous packer.

La corrosion est un phénomène physico-chimique qui tend à détruire le matériau qui se trouve dans un milieu avec lequel il n'est pas en équilibre. Ces phénomènes se produisent notamment en présence de différents alliages.

La corrosion électrolytique se trouve amplifiée si le métal n'est pas absolument propre. Les tubages Inox doivent être passivés.

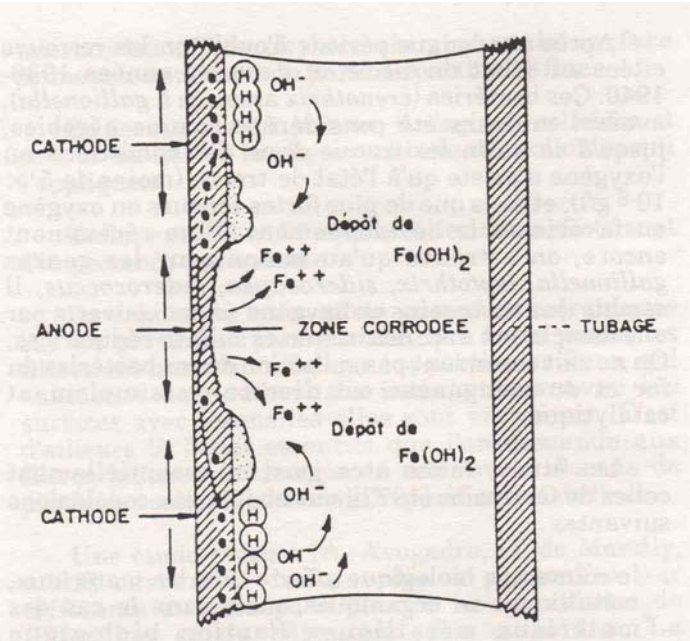


Figure 4 : Processus de la corrosion électrolytique

Un indice établi par J.W. Ryznar permet de déterminer le caractère incrustant ou corrosif d'une eau, cet indice s'écrit : IS= 2 pHs –pH.

Indice de Ryznar	Tendance de l'eau
4 à 5	Très incrustante
5 à 6	Légèrement incrustante
6 à 7	A peine incrustante ou à peine corrosive
7 à 7,5	Corrosive
7,5 à 9	Fortement corrosive
Plus de 9	Très fortement corrosive

Tableau 2 : caractéristique de l'eau en fonction de l'indice de Ryznar

Le choix du matériau à mettre en œuvre pour les casings et crépines est indiqué dans le tableau ci-dessous.

Matériau préconisé	Indice de Ryznar
Matière plastique (PVC)	Entre 7,5 et 18
Acier à faible teneur en carbone	Entre 7 et 8
Fer ARMCO	Entre 6,5 et 8
Cuivre rouge siliceux	Entre 6 et 8,5
Everdur (bronze)	Moins de 9
Super nickel	Moins de 9
Monel ‘’400 ‘’	Moins de 9,5
Acier inox 304	Moins de 12
Acier inox 304 ELC (très faible teneur en carbone)	Moins de 15
Acier inox 316	Moins de 16
Acier inox 316 ELC	Moins de 18

Tableau 3 : matériau préconisé en fonction de l’indice de Ryznar

Complétion

La complétion correspond à l’ensemble des opérations faites sur une couche aquifère, plus généralement il s’agit de la phase d’équipement du réservoir.

Lorsque cela s’avère nécessaire, il peut être indispensable de mettre en place un massif de graviers entre la crépine et le terrain.

Cette opération est relativement délicate et nécessite de cerner au mieux la granulométrie de la formation à capter ainsi que ses éventuelles variations.

Plusieurs techniques de gravillonnage sont possibles. La figure ci-dessous illustre deux possibilités de gravillonnage.

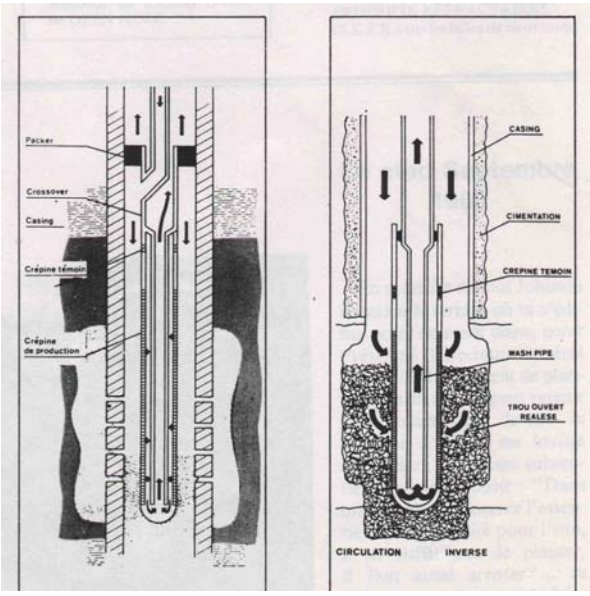


Figure 5 : Méthode du Cross-Over et Circulation inverse

Il existe également un procédé utilisant des crépines pré gravillonnées.

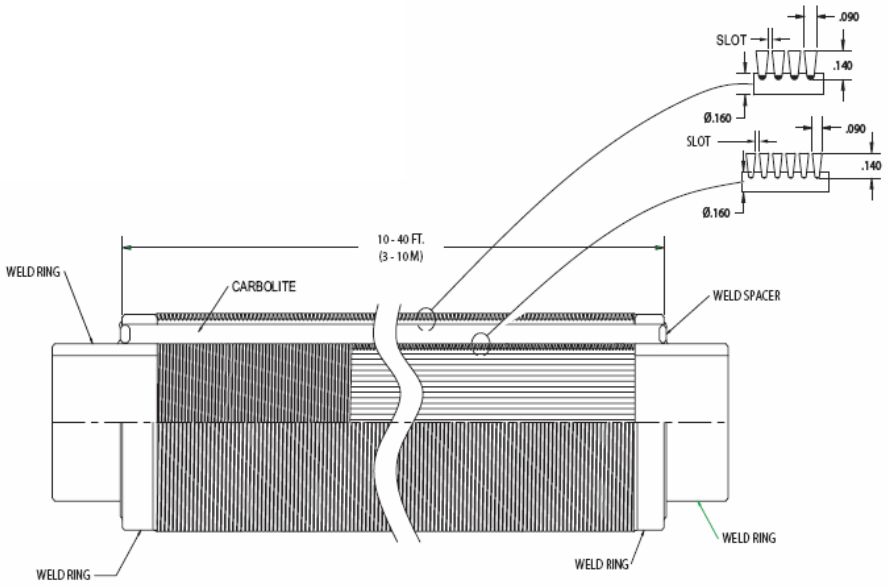


Figure 6 : Vue schématique d'une crépine Muni Pak ®

Figure 7 : Vue d'une crépine Muni Pak ® de dessus

Procédé de pompage

Si la solution la plus classique consiste à mettre en place une pompe immergée, il existe d'autres solutions.

Par exemple, il est possible de siphonner l'ouvrage ou les ouvrages d'un champ captant. Cette solution a été mise en œuvre par exemple à Metz avec plus de 100 puits, par la ville de Grenoble. Ce principe conduit à exploiter le ou les ouvrages avec une cote de rabattement imposée. Dans cette configuration, le ou les ouvrages ne peuvent être surexploités. De plus, le système engendre des économies d'énergie.

Une autre solution consiste à mettre en place une pompe immergée sous un packer ancré dans le tubage plein du forage (figure 8). Dans cette configuration, le casing fait fonction de colonne d'exhaure. L'avantage de cette solution permet le maintien en eau de l'ensemble du forage sans marnage et introduction d'air.
Cette solution est fréquemment mise en œuvre notamment en Australie.

La réalisation du forage

Concrétisation du projet, cette phase doit permettre d'atteindre les objectifs assignés ; néanmoins il convient de garder à l'esprit les incertitudes inhérentes à la recherche d'eau.

Elle fait appel à une entreprise de forages et à une direction des travaux.

Les travaux doivent être réalisés sur la base du cahier des charges mais être adaptés en permanence en fonction des terrains traversés. C'est pourquoi la présence d'un maître d'œuvre avec une spécialisation en hydrogéologie ainsi qu'une parfaite connaissance en matière de forage est plus que souhaitable.

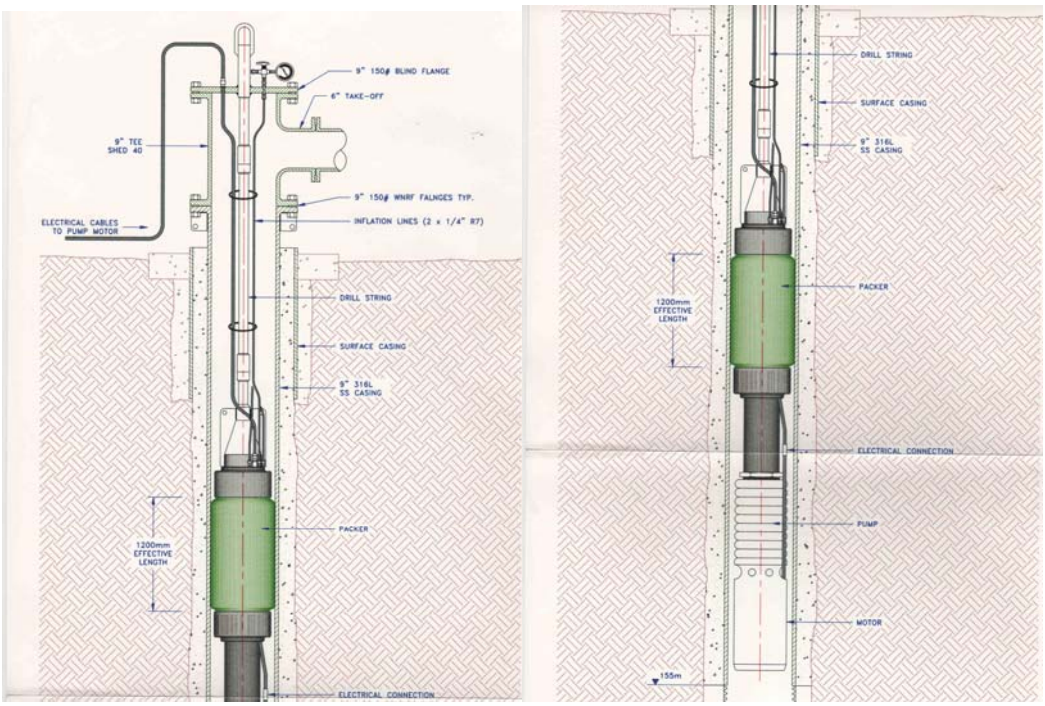


Figure 8 : pompe sous packer Partie supérieure du forage et partie inférieure du forage

Le suivi des travaux de forage dépasse le cadre habituel de la maîtrise d'œuvre, cette notion n'est que très rarement comprise en France où le suivi se borne aux réunions hebdomadaires de chantier. La réalisation d'un forage constitue un investissement important, le surcoût d'un suivi reste marginal.

En ce qui concerne les techniques de forage, nous ne les détaillerons pas. Les spécifications techniques doivent être suffisamment détaillées pour que l'entreprise de forages mette en œuvre le matériel adapted.

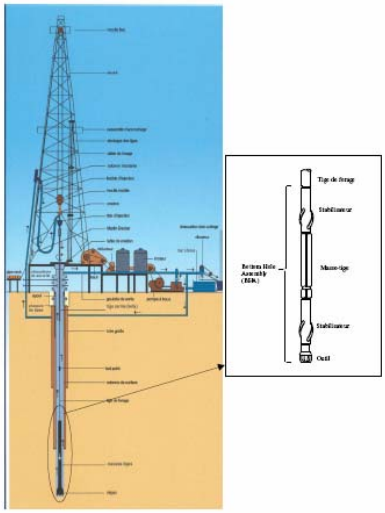


Figure 9 : Cas d'un forage au Rotary

Les travaux de forage doivent comprendre également des phases de développement ainsi que des pompages d'essai. Ces données doivent être interprétées au fur et à mesure par un hydrogéologue.

Au terme des travaux, un dossier des ouvrages exécutés doit être élaboré. Ce document doit rassembler l'ensemble des informations relatives à la réalisation du forage avec notamment la provenance des matériaux utilisés, les résultats des travaux de développement et des pompages d'essai ainsi que les résultats de l'analyse d'eau. Ce document constitue la carte d'identité du forage qui doit servir dans la vie de l'ouvrage.

La vie du forage

Tout forage doit faire l'objet d'un suivi tout au long de son exploitation. Ce suivi préventif permet de déceler toute baisse de productivité, vieillissement ou détérioration de l'ouvrage et des équipements de pompage.

Ce suivi régulier peut consister en des mesures régulières des capacités de production et des caractéristiques de la pompe (mesure d'isolement, report des couples débit-pression sur la courbe d'origine de la pompe).

Lors des changements de pompe, un examen par caméra immergée peut être réalisé pour vérifier l'intégrité du forage (rupture, colmatage, corrosion). Cet examen peut être complété par des diagraphies spécifiques.

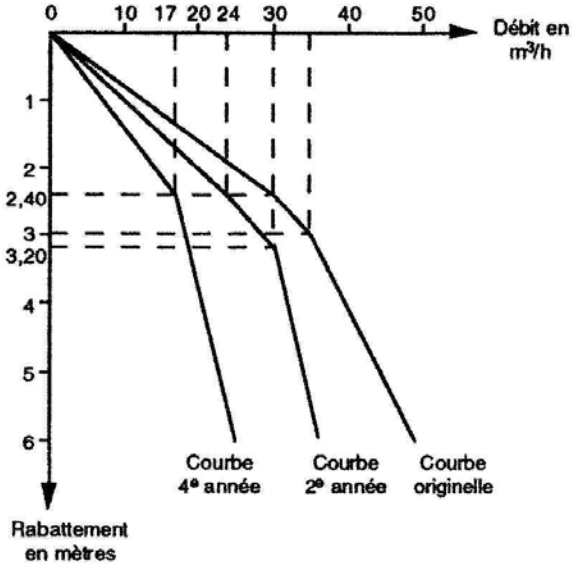


Figure 10 : évolution de la courbe débit/rabattement d'un forage en cours de colmatage

Figure 11 : Exemple de rupture de crépine

Figure 12 : absence de soudure

Conclusion

Ce rapide survol ne peut être exhaustif, néanmoins il faut retenir que la réalisation d'un forage d'eau reste un exercice complexe qui doit être confié à des spécialistes de l'hydrogéologie et en matière de forages.

La conception de chaque ouvrage doit être étudiée au cas par cas, une mauvaise conception peut entraîner des désordres graves ainsi que des atteintes à l'environnement (mélange des eaux, intrusion d'eau de surface,…).

La phase de réalisation doit faire l'objet d'un suivi spécialisé par des hommes de l'Art qui doivent assurer une présence sur le chantier pour adapter au besoin le programme de travaux.

Les entreprises de forages doivent disposer d'un matériel adapté et des équipements annexes pour mettre en œuvre les cimentations dans de bonnes conditions, le gravillonnage et les travaux de développement.

D'un point de vue technologique, le forage d'eau bénéficie des avancées et des recherches mises en œuvre dans le domaine pétrolier notamment. L'utilisation de certains procédés deviendra possible dans la mesure où les prix de mise en œuvre deviendront acceptables. Signalons que certains procédés sont déjà utilisés dans des cas particuliers tels que les eaux minérales ou thermales ou bien en géothermie qui connaît un essor important en raison de l'augmentation du prix des énergies fossiles. Il s'agit notamment des forages déviés ou de l'utilisation de fibres composites, de cimentation allégées (forages de grande profondeur) ou bien encore de patch.

Bibliographie

BRGM Le forage d'eau, guide pratique des maitres d'ouvrages, 80 SGN 159 HYD
GEOTHERMA Guide pratique pour le contrôle et l'entretien des captages d'eau souterraine, Etude inter agences n°32,
L'Eau, l'Industrie, les Nuisances Captage des eaux souterraines par puits à drains rayonnants, n° 265,
Le courrier Johnson Mise en place du massif filtrant de gravier dans les forages, n° 64,
Brochure AGE developments PTY LTD,
R. Degallier Décolmatage des puits et forages, manuel pratique, revue Hydrogéologie n°1,
Documentation Johnson.

Le rôle du maître d'œuvre privé dans la réalisation des forages

Bruno MARSAUD

ANTEA, 19 avenue Léonard de Vinci, Pessac, France, b.marsaud@antea-ingenierie.fr

Résumé
La loi MOP réglemente les rapports entre la maîtrise d'ouvrage publique et la maîtrise d'œuvre privée. Elle encadre de manière générale les différents éléments composant une mission de maitrise d'œuvre. Or, la réalisation des forages, ou leur réhabilitation, est aujourd'hui de plus en plus technique et complexe. Elle doit satisfaire à des contraintes de qualité de plus en plus exigeantes et s'inscrit dans un contexte réglementaire lui aussi complexe et évolutif. Même peu profond, un forage est plus qu'un simple trou dans la terre. Il résulte d'une recherche géologique définissant les réservoirs utilisables pour satisfaire un besoin, d'investigations hydrogéologiques et hydrogéochimiques définissant la nappe la mieux adaptée en termes de débit et de qualité. La bonne articulation de ces multiples compétences est indispensable à la réussite d'un projet. Il apparaît donc opportun de s'interroger sur le fait que le maître d'œuvre doit obligatoirement être un maître d'œuvre hydrogéologue.

1. La loi MOP

o Le cadre général

Les constructions publiques sont régies depuis 1985 par la loi dite « loi MOP ». Elle défini les rapports entre maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises. Modifiée à plusieurs reprises, elle est accompagnée de deux décrets majeurs qui en précisent la pratique :

- le décret n°93-1268 du 29 novembre 1993 relatif aux missions de maîtrise d'œuvre confiées par des maîtres d'ouvrage publics à des prestataires de droit privé.
- l'arrêté du 21 décembre 1993 qui précise les modalités techniques d'exécution des éléments de mission de maîtrise d'œuvre confiés par les maîtres d'ouvrage publics à des prestataires de droit privé.

Ils définissent tous deux les rôles des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre et le second précise le contenu des différentes missions normalisées de maitrise d'œuvre. Trois catégories d'opérations y sont distinguées et la réalisation de forages d'eau entre dans la troisième, à savoir les opérations de construction neuve, de réutilisation ou de réhabilitation d'ouvrages d'infrastructure.
Tous ces documents, fondamentaux, restent de portée générale et ne font que définir le cadre juridique du rôle de maître d'œuvre.
En pratique pour la conduite des marchés et des chantiers, le document de référence reste le CCAG travaux approuvé par décret n° 76-87 du 21 janvier 1976 et modifié plusieurs fois (et toujours en cours de refonte à l'heure actuelle). Bien que plus concret, il reste lui aussi applicable à tous les chantiers, s'intéresse principalement aux principes administratifs de gestion d'un chantier, et ne traite pas spécifiquement des forages d'eau.

1.2 La prise en compte de la spécificité des chantiers de forages

Le premier document apportant des précisions techniques relatives aux travaux de forages et jouant jusqu'à récemment le rôle de document de référence est le fascicule N°76 du CCTG (cahier des Clauses Techniques Générales) publié par le décret 87-263 du 8 avril 1987. Il précise de nombreux point mais reste suffisamment imprécis pour laisser beaucoup de liberté de conception, d'exécution et surtout d'interprétation.
Très récemment en avril 2007, une norme AFNOR a été établie, précisant considérablement les spécificités techniques à appliquer pour la réalisation d'un forage. Cela reste un référentiel et rien n'interdit au maître d'œuvre d'y déroger comme aux autres documents de références si le projet le nécessite.
Pour finir ce rapide tour d'horizon, signalons encore le titre « forage » du RGIE (Règlement Général des Industries Extractives). Plus dédié aux forages profonds soumis à un permis géothermique, il apporte des informations sur la conception et la réalisation des forages profonds.

2. Le Maître d'œuvre d'un chantier de forage doit-il être hydrogéologue ?

Ces documents normalisant l'exécution des chantiers de forages sont-ils suffisants pour permettre à un maître d'ouvrage de réaliser des travaux en se passant des compétences d'un maître d'œuvre hydrogéologue ?
Certainement pour de petits ouvrages à faible enjeu et c'est ce que l'on observe d'ailleurs actuellement par exemple sur le marché spécifique des pompes à chaleur sur nappe, en général parce que les maîtres d'ouvrage ne sont pas sensibles à la spécificité du forage d'eau, que les ouvrages sont d'apparence simples et que leur direction est laissée aux architectes et aux bureaux d'étude de construction. De nombreuses opérations de ce type se passent bien, sans maître d'œuvre hydrogéologue car il est heureusement fait appel à des entreprises de forage travaillant dans un souci de qualité et apportant sur les chantiers la compétence technique.
Il n'en est pas moins vrai que certaines de ces opérations tournent à la catastrophe car les aspects ressources et réglementation ne sont pas pris en compte et, in fine, les maîtres d'ouvrage se retrouvent avec des installations qu'ils ne peuvent alimenter. Ne parlons même pas des enjeux financiers qui peuvent être très importants. Le maître d'œuvre spécialisé est alors parfois appelé « en pompier » pour tenter de sauver la situation.
Ces situations témoignent que le maître d'œuvre hydrogéologue doit apporter des compétences indispensables à la réussite des projets. Essayons de voir dans quels grands domaines ces apports sont les plus notables.

2.1. Un forage est avant tout un outil de mobilisation d'une ressource répondant à un besoin

Même peu profond, un forage est plus qu'un simple trou dans la terre. Il résulte d'une recherche géologique définissant les réservoirs utilisables pour satisfaire un besoin, d'investigations hydrogéologiques et hydrogéochimiques définissant la nappe la mieux adaptée en termes de débit et de qualité.
Pour arriver à ce résultat, le maître d'œuvre hydrogéologue doit être capable d'effectuer cette partie de la mission (qui ne fait pas partie des missions normalisées) ou, s'il ne le fait pas lui-même, d'utiliser des études déjà existantes pour adapter l'ouvrage à réaliser (AVP-PRO) à la ressource et aux besoins du maître d'ouvrage.
Cette adaptation s'effectuera bien sûr en termes de caractéristiques dimensionnelles de l'ouvrage, mais aussi en termes de métallurgie en fonction de la chimie de l'eau et d'équipement (crépines) selon la nature des terrains et leur productivité.
Ajoutons encore que l'expérience d'un maître d'œuvre hydrogéologue en terme de diagnostic et de gestion d'ouvrage ancien permet d'édicter des recommandations en termes d'exploitation (débit ou niveau à ne pas dépasser) lorsque des ressources sensibles sont captées (fer, chlorures, …) et d'intégrer ces dispositions dès la phase de conception.

2.2 Un forage doit être adapté à la règlementation qui régit l'usage de la ressource.

La réglementation régissant l'exploitation des ressources, est aujourd'hui de plus en plus technique et complexe. Elle impose de prendre en compte des contraintes de qualité de plus en plus exigeantes et s'inscrit dans un contexte réglementaire lui aussi complexe et évolutif (Code de l'Environnement pour les travaux et les prélèvements, Code de la Santé Publique pour l'Eau Potable et le Thermalisme, Code Minier pour la Géothermie à grande profondeur).
Ce besoin de prise en compte de la réglementation intervient lors de toutes les phases d'un projet. A l'amont, dans le cadre de la recherche d'une nouvelle ressource qui devra être réglementairement exploitable et protégeable, à la conception de l'ouvrage, durant les travaux et notamment pour l'adaptation à l'imprévu, et enfin en aval pour l'obtention des autorisations administratives d'exploitation.
Si l'on prend l'exemple du thermalisme, où les procédures d'homologation sont très lourdes, il est fondamental d'anticiper et de prendre en compte dès la conception de l'ouvrage les futurs critères qui conditionneront l'obtention de l'homologation. C'est notamment le cas de la stabilité dans le temps des paramètres chimie de l'eau qui nécessite une adaptation de la métallurgie des ouvrages, de la réalisation de tests pertinents pour distinguer les différentes venues d'eau, de cimentations adaptées à des chimies d'eau particulières (chlorures, sulfates, …) ou encore de la position des tubages pour isoler les bonnes venues.
Citons encore la simple implantation d'un forage d'eau potable sur une parcelle donnée. Il est indispensable d'intégrer pour cette mission la définition des futurs périmètres de protection (distance aux limites de la parcelle) et des servitudes que peut représenter par exemple le chemin d'accès à l'ouvrage. Là encore l'expérience et les compétences du maître d'œuvre hydrogéologue peut éviter des difficultés importantes.

Pour finir sur cet aspect réglementaire, rappelons enfin que les procédures administratives d'autorisation de prélèvement ou des ouvrages, de distribution de l'eau ou de protection sont longues et conditionnent souvent les délais globaux d'une opération ; là encore la bonne maitrise de ces éléments permet au maître d'œuvre hydrogéologue de bien conseiller le maître d'ouvrage sur les délais à prendre en compte pour la réalisation des travaux et de l'ensemble de l'opération (programmation, investissement).

2.3 La gestion des marchés de forages, encore des particularités.

La gestion des marchés, particulièrement sur le plan administratif est encore un domaine où l'on peut s'interroger sur la nécessité du recours a un maître d'œuvre spécialisé. Et pourtant ses compétences particulières nous paraissent indispensables pour :

- Etablir les pièces administratives du marché et notamment dans le CCAP (Cahier des Clauses Administratives Particulières) en prévoyant la bonne priorité des pièces, les modes de révision des prix adaptés à ce type de travaux, les éventuelles suspensions de marché pour défaut d'autorisation administratives ou encore un mode de pénalité particulier pour les délais d'exécution car intégrant les contraintes d'aléa géologique (cf. infra). L'absence de prise en compte de ces éléments à la base peut rendre difficile le déroulement du marché par la suite.
- Etablir le CCTP en définissant l'ouvrage à réaliser, en donnant à l'entreprise tous les éléments techniques (besoin, contexte géologique et hydrogéologique, risques existants) afin de lui permettre de répondre de manière pertinente, tout en lui laissant suffisamment de liberté pour qu'elle puisse se démarquer en proposant une solution innovante. Comment faire cela sans être spécialiste ?
- Analyser les offres des entreprises, identifier les délais intenables, les manques de moyens ou les erreurs techniques conduisant à une mauvaise évaluation du prix, et conseiller le maître d'ouvrage pour le choix du mieux disant.
- Diriger le chantier durant les travaux en appuyant ses décisions sur l'ensemble des contraintes réglementaires et techniques (besoins, ressource) et gérer le problème d'aléa géologique.
- Prendre en compte les risques en termes de sécurité de certaines opérations spéciales (acidification, perforation, dévissage à l'explosif) et veiller au respect des règles de déclaration de sous-traitance (cimentation, serrage des tubes, gravel pack…)
- Effectuer ou faire effectuer les opérations préalables à la réception des ouvrages et informer le maître d'ouvrage de la qualité et de la complétude des travaux réalisés pour permettre leur réception des travaux dans de bonnes conditions.

On le voit bien, une fois de plus, les compétences d'un hydrogéologue paraissent indispensables pour la gestion des marchés de travaux de forage. Ajoutons encore l'exécution des missions particulières qui ne sont pas des missions normalisées de maitrise d'œuvre et qui nécessitent obligatoirement le recours à hydrogéologue (suivi géologique, interprétation des essais et test de production, réalisation des diagraphies et interprétation)

2.4 L'ennemi sournois tapi au fond du sous-sol, l'aléa géologique.

Pour finir cette revue des spécificités des travaux de forage il est impossible de ne pas s'arrêter un moment sur la notion d'aléas géologique. Dans notre cas l'aléa géologique est un événement imprévisible qui survient en cours de forage et qui, au mieux, perturbe le chantier et, au pire, conduit à l'abandon de l'ouvrage, la perte de matériel ou l'échec de l'ouvrage.

Il est important de souligner que l'entreprise de forage et le maître d'œuvre hydrogéologue composent avec un milieu naturel, de surcroît en profondeur dans le sol. Malgré les données géologiques et hydrogéologiques qui peuvent exister sur un secteur donné, malgré leur bonne prise en compte, malgré les reconnaissances et les précautions prises, il peut survenir des éléments imprévus (qualité des eaux, niveaux d'argile gonflante, variation de faciès, éboulement, etc…).

Fort heureusement, et dans la très grande majorité des cas, ces éléments imprévus peuvent être gérés dans le cadre du chantier et une bonne concertation entre maître d'œuvre hydrogéologue et entreprise de forage permet de trouver la solution technique permettant de s'adapter à cette situation nouvelle. Il demeure que parfois ces adaptations nécessitent du temps supplémentaire, voire des moyens supplémentaires pouvant impliquer des dépassements de marché.

La tentation est grande pour le maître d'ouvrage soucieux de ses intérêts financiers de faire prendre les frais inhérents à cet aléa à l'entreprise de forage. Ceci est d'autant plus vrai qu'entreprise et maître d'œuvre sont – normalement…- assurés pour leurs activités. C'est là que le rôle du maître d'œuvre hydrogéologue est très important :

- Il doit avoir informé le maître d'ouvrage des risques techniques encourus sur un chantier de forage et notamment les commissions d'appel d'offres devant lesquelles des avenants devront parfois être défendus.
- Il doit défendre les intérêts du maître d'ouvrage mais aussi préserver ceux de l'entreprise. En conséquence il doit faire la part des choses entre aléa et mauvaise exécution, savoir ordonner à l'entreprise de refaire à sa charge un travail mal exécuté, mais aussi savoir se retourner vers le maître d'ouvrage lorsque l'aléa est indiscutable pour l'aider à négocier un avenant justifié et juste.

Ce rôle fondamental de la gestion du risque d'aléa géologique sur un chantier de forage est un point clé pour éviter les contentieux. Seul un hydrogéologue est en mesure d'apporter cette expertise et cela nous paraît être un des éléments majeurs qui doit pousser les maîtres d'ouvrages à retenir un maître d'œuvre hydrogéologue.

3. Maître d'ouvrage public et maître d'œuvre privé.

Nous espérons que la rapide liste ci-dessus aura convaincu les maîtres d'ouvrages, et notamment les maîtres d'ouvrage publics, de l'intérêt de disposer sur les chantiers de forages d'un maître d'œuvre hydrogéologue spécialisé.

Pour autant, la « Loi MOP » ne fait pour autant pas obligation de disposer d'une maître d'œuvre privé et les maîtres d'ouvrage publics s'organisent de manières différentes selon les cas.

Les premières à faire ce choix de ne pas avoir de maître d'œuvre privé sont généralement de grandes collectivités (conseil généraux, syndicats départementaux) qui disposent dans leurs services d'un hydrogéologue assurant cette fonction, soit simplement pour les phases de reconnaissance, soit pour l'intégralité de leurs besoins. Remarquons au passage que cette structuration existe aussi dans les grands groupes privés liés au domaine de l'eau où il peut exister des services spécialisés. L'avantage est que bien souvent cet hydrogéologue connait très bien son territoire d'intervention et ses spécificités. Il joue parfois en plus le rôle d'AMO (Assistance à Maitrise d'Ouvrage) et participe à la politique de gestion des ressources en eau de son territoire d'activité.

Le besoin en termes de maitrise d'œuvre privé pour les chantiers de forage est dans ce cas faible. Tout au plus il intervient pour des opérations très spéciales (réhabilitation) ou pour des missions de bureau d'étude (contrôle géologique, interprétations des essais).

Avouons le, à partir du moment où la compétence hydrogéologique est là, il n'ya pas alors de grande différence et, à moins que le désengagement de l'état ou des collectivités ne pousse à arrêter ces missions, il n'y a pas de plus-value technique énorme à recourir à un maître d'œuvre privé. Un inconvénient peut toutefois être relevé : dans un schéma classique le maître d'œuvre privé joue un rôle de tiers intervenant, parfois plus objectif dans la gestion de l'aléa géologique, le maître d'ouvrage assurant le rôle de maître d'œuvre étant en quelque sorte « juge et partie ».

L'autre grande catégorie qui fait le choix de ne pas recourir à la maitrise d'œuvre privé est celle des collectivités (syndicats, communes) qui s'appuient en termes de maitrise d'œuvre sur les services de l'Etat. Ceux-ci, rodés à la maitrise d'œuvre générale, s'appuient sur des missions d' « assistance technique » confiées à un partenaire privé. Cette mission est une sorte de maitrise d'œuvre sans en être une ; le partenaire privé assure une partie des missions de maitrise d'œuvre (cahier des charges, analyse des offres, direction des travaux) mais n'en assume pas la pleine responsabilité. Cette solution n'est pas à recommander car elle ne définit pas clairement les responsabilités de chacun et bien souvent, dans le cadre des procédures contentieuses, les tribunaux requalifient ces missions en maitrise d'œuvre, ce qui peut être dramatique pour les bureaux d'étude qui ne sont pas assurés pour cela.

Il nous parait donc préférable de clarifier les rôles de chacun et de se contenter de confier aux services de l'Etat un rôle d'AMO attirant l'attention sur la nécessité de disposer d'un maître d'œuvre spécialisé, organisant son choix, et coordonnant l'exécution des travaux.

C'est l'organisation la plus classique, elle couvre tous les domaines techniques (eau potable, thermalisme, géothermie) et a l'avantage de définir clairement les responsabilités de chacun.

4. Et demain ?

Nous espérons avoir convaincu que le maître d'œuvre d'un chantier de forage doit être un hydrogéologue. Public ou privé, peu importe pour autant qu'il reçoive une vraie mission de maître d'œuvre.
Le désengagement annoncé des services de l'Etat qui assistaient auparavant les collectivités sera probablement le fait majeur qui va déplacer une partie des projets vers les maîtres d'œuvre privés. Ces services se concentrent aujourd'hui sur des missions de conduction d'opération et n'ont plus toujours les moyens de s'investir techniquement dans la conduite opérationnelle des travaux.
Il est donc probable que l'on verra moins souvent des missions d'assistance technique et heureusement, les services de l'état se recentrant sur l'AMO. Les maîtres d'œuvre privés sont prêts à élargir leur mission de l'amont vers l'aval pour les y accompagner.

Conversion d'un puits d'exploration de Gaz de France en piézomètre

Jean-François VERNOUX [1], Florent SOVIGNET [2], Nicola LABAT [3]

[1] BRGM, BP 6009, 45060 ORLEANS CEDEX 2, jf.vernoux@brgm.fr

[2] DRIRE Ile de France, 10 rue Crillon,- 75194 PARIS Cedex 04

[3] Gaz de France, Dir. Exploration-Production, 361 av. du Pdt Wilson, 93211 SAINT DENIS, nicolas.labat@gazdefrance.com

Résumé

Gaz de France a obtenu par Arrêté ministériel en mai 1996 une Autorisation de Recherche de formations souterraines naturelles aptes au stockage de gaz combustible à l'intérieur d'un périmètre situé dans le département de la Marne. Un forage d'exploration a été réalisé en 1996 sur ce permis: le puits PN01, sur la commune de Congy (51) avec pour cible le Barrémien inférieur.

Les résultats du forage ont cependant disqualifié la structure en biseau stratigraphique pour une utilisation en stockage souterrain de gaz naturel. Les études technico-économiques menées à partir des données ont abouti à un coût prévisionnel de développement du site prohibitif et donc à l'abandon du projet. Par la suite et de ce fait, le site d'exploration du Petit Morin n'a plus fait l'objet de travaux et aucune autre installation n'a été construite à la suite de ce forage.

L'étape suivante pour ce puits était logiquement la programmation de sa fermeture, mais un processus de recherche de valorisation de cet ouvrage a commencé et les réflexions se sont engagées entre la DRIRE Ile de France, le BRGM et Gaz de France : en 2003, le puits PN01 n'a pas été retenu dans un projet de valorisation de conversion en un puits d'A.E.P. car l'eau du Barrémien nécessitait un traitement. Les discussions techniques se sont poursuivies et l'issue positive du compromis trouvé au final, et partagé par l'ensemble des acteurs, est sa conversion en piézomètre de surveillance à l'Albien.

Cette issue contribuera ainsi à ajouter un point de contrôle et de connaissance essentielle dans un secteur aujourd'hui sans ouvrage de ce type sur l'aquifère de l'Albien.

Un dossier d'arrêt des travaux miniers et de conversion du puits PN01 en piézomètre a été déposé par Gaz de France en préfecture de la Marne le 12 février 2008. L'instruction de ce dossier est en cours, le préfet devrait prendre un premier avis (donné acte) en août 2008 sur la réalisation des travaux. L'opération de conversion est planifiée à ce jour fin septembre/octobre 2008.

Le futur propriétaire et gestionnaire du puits PN01 sera le BRGM. Une convention est en cours de signature entre Gaz de France et le BRGM pour la rétrocession du puits. Une signature devant un notaire devra intervenir une fois les travaux réalisés de façon à rétrocéder le puits et le terrain au futur propriétaire, le B.R.G.M..

La conversion du puits d'exploration PN01 en piézomètre de surveillance à l'Albien est le symbole de l'engagement pour le développement durable et l'environnement et également de la connaissance des eaux souterraines des acteurs qui ont contribués à ce projet. Cette opération ne manquera pas d'ouvrir d'autres perspectives sur la même thématique à l'avenir, en effet d'autres opérations sont déjà prévues à court terme dans le Bassin Aquitain.

Historique

Gaz de France a obtenu par Arrêté ministériel en mai 1996 une Autorisation de Recherche de formations souterraines naturelles aptes au stockage de gaz combustible à l'intérieur d'un périmètre d'une superficie de 700 kilomètres carrés environ, englobant une partie du territoire de la Marne, sur le site du « Petit Morin ». Le réservoir potentiellement apte au stockage et ciblé par Gaz de France était le Barrémien inférieur à une profondeur d'environ 950 m/sol.

Gaz de France a foré un puits d'exploration à la fin de l'année 1996 sur la commune de Congy : le puits PN01.

Les résultats du forage ont cependant disqualifié la structure en biseau stratigraphique pour une utilisation en stockage souterrain de gaz naturel. Les études technico-économiques menées à partir des données ont abouti à un coût prévisionnel de développement du site prohibitif et donc à l'abandon du projet.

De ce fait, le site d'exploration du Petit Morin n'a plus fait l'objet de travaux et aucune autre installation n'a été construite à la suite de ce forage. Avec la collaboration de la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche, et de l'Environnement (DRIRE) d'Ile-de-France, Gaz de France a souhaité rétrocéder le puits de Petit-Morin PN01 à un nouveau propriétaire plutôt que de l'abandonner et de le boucher définitivement.

Deux utilisations potentielles furent envisagées:

- une conversion en forage d'eau potable en réponse au besoin d'alimentation de la commune de Congy et de la communauté de communes de la Brie des Etangs (CCBE) ;
- ou une transformation en piézomètre pour mesurer la pression dans les aquifères albien et/ou néocomien en fonction de la complétion envisagée (cette transformation a été évaluée par le BRGM et ANTEA en 2000).

Pour une conversion en puits d'eau potable

En 2003, la commune de Congy, comme les communes voisines, recherchait un nouvel approvisionnement car les captages et les sources dans les nappes perchées éocènes de la région étaient contaminées par des nitrates et des pesticides. Comme les analyses de la DDASS révélaient un dépassement des normes de qualité pour les eaux destinées à la consommation humaine, le préfet mis en demeure la CCBE de trouver une nouvelle ressource en eau potable avant la fermeture imminente des captages actuels.

En toute logique, la conversion du forage profond PN01, qui capte l'aquifère du Barrémien inférieur (Néocomien), a donc été envisagée pour la production d'eau potable. Cependant si un pompage réalisé en février 2004 a montré que le débit était suffisant pour subvenir aux besoins de la CCBE, l'analyse de l'eau recueillie a révélé qu'elle n'était pas potable. L'analyse a en particulier confirmé les hypothèses de Raoult (1999) sur la mauvaise qualité des eaux de l'Albien et du Néocomien dans cette partie du Bassin de Paris. L'eau ne contient pas de traces de pesticides et de composés potentiellement toxiques mais elle dépasse les limites fixées par la réglementation des eaux brutes destinées à la consommation humaine pour la turbidité, la conductivité, le sodium, les sulfates, l'ammonium, le manganèse, les fluorures et le bore (tableau 1).

Paramètre	*Valeur obtenue*	*Limites de qualité Eau Potable*
Turbidité (NTU)	110	< 1
Conductivité (µS/cm 20°C)	5780	< 1000
Na^+ (mg/L)	1600	< 200
K^+ (mg/L)	31	< 12
NH_4^+ (mg/L)	3.1	< 0.1
Mg^{2+} (mg/L)	57	< 50
F^- (mg/L)	1.9	< 1.5
SO_4^{2-} (mg/L)	3300	< 250
B (mg/L)	5.9	< 1
Mn (mg/L)	0.41	< 0.05

Tableau 1 : paramètres physico-chimiques hors limites pour les eaux du forage PN01

Pour rendre cette eau consommable il était nécessaire de la traiter avant ou après un mélange avec l'eau déjà distribuée. Au final la CCBE n'a pas souhaité utiliser ce puits.

Pour la conversion en piézomètre à l'Albien

La reprise de l'ouvrage de Gaz de France pour en faire un piézomètre apparaît comme un moyen très intéressant de renforcer le réseau de surveillance quantitatif de la nappe de l'Albien. En effet cette nappe représente un enjeu majeur pour l'alimentation de secours des populations en cas de crise (Verjus, 2005) et un modèle a été développé pour assurer la gestion de l'aquifère (Hydroexpert, 2000). Dans le même temps, la profondeur importante de l'aquifère dans la partie centrale du bassin de Paris (500 à 800 m de profondeur, figure 1) rend difficile, pour des raisons économiques, la création d'un forage à unique but de piézomètre.

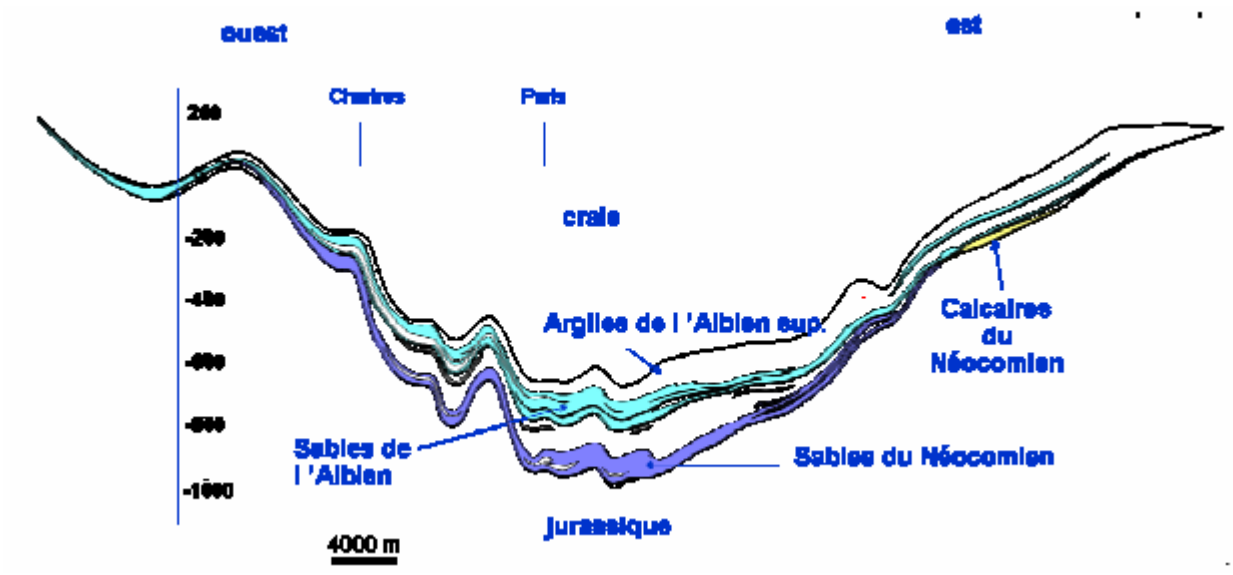


Figure 1: Coupe schématique est-ouest de l'Albien-Néocomien du bassin de Paris

Le puits PN01 est situé dans un secteur où il n'existe aucun piézomètre (figure 2) et où l'Albien est encore profond ; le toit des sables de l'Albien, qui constituent le réservoir aquifère est à une profondeur de 855 m et la nappe est captive (niveau d'eau mesuré à 115.5 m de profondeur le

09/08/03).

Les sables de l'Albien ne constituent qu'une des couches d'un système aquifère complexe, dénommé Albien-Néocomien, constitué d'une alternance de couches perméables et semi-perméables voire très peu perméables (figure 3). Sur le plan stratigraphique, on distingue 5 unités : l'Albien, l'Aptien, le Barrémien, l'Hauterivien et le Valanginien. Le Barrémien inférieur, l'Hauterivien et le Valanginien constituent le Néocomien. Lorsque ces niveaux sont indifférenciés, les pétroliers utilisent le terme de Wealdien.

Initialement l'intérêt, en terme de suivi piézométrique, portait à la fois sur l'Albien et sur le Néocomien, dans la mesure où ces deux nappes bien que séparées par plusieurs dizaines de mètres de niveaux semi-perméables sont le siège d'échanges verticaux par drainance. Une étude (BRGM, 2000) a montré que le contexte hydrogéologique dans le secteur du forage PN01 était particulier avec la présence de deux niveaux aquifères dans le Barrémien. C'est d'ailleurs ce qui avait motivé le choix du site par Gaz de France qui souhaitait avec ce forage évaluer la possibilité de stocker du gaz dans le Barrémien inférieur qui, dans ce secteur, montre une structure en biseau.

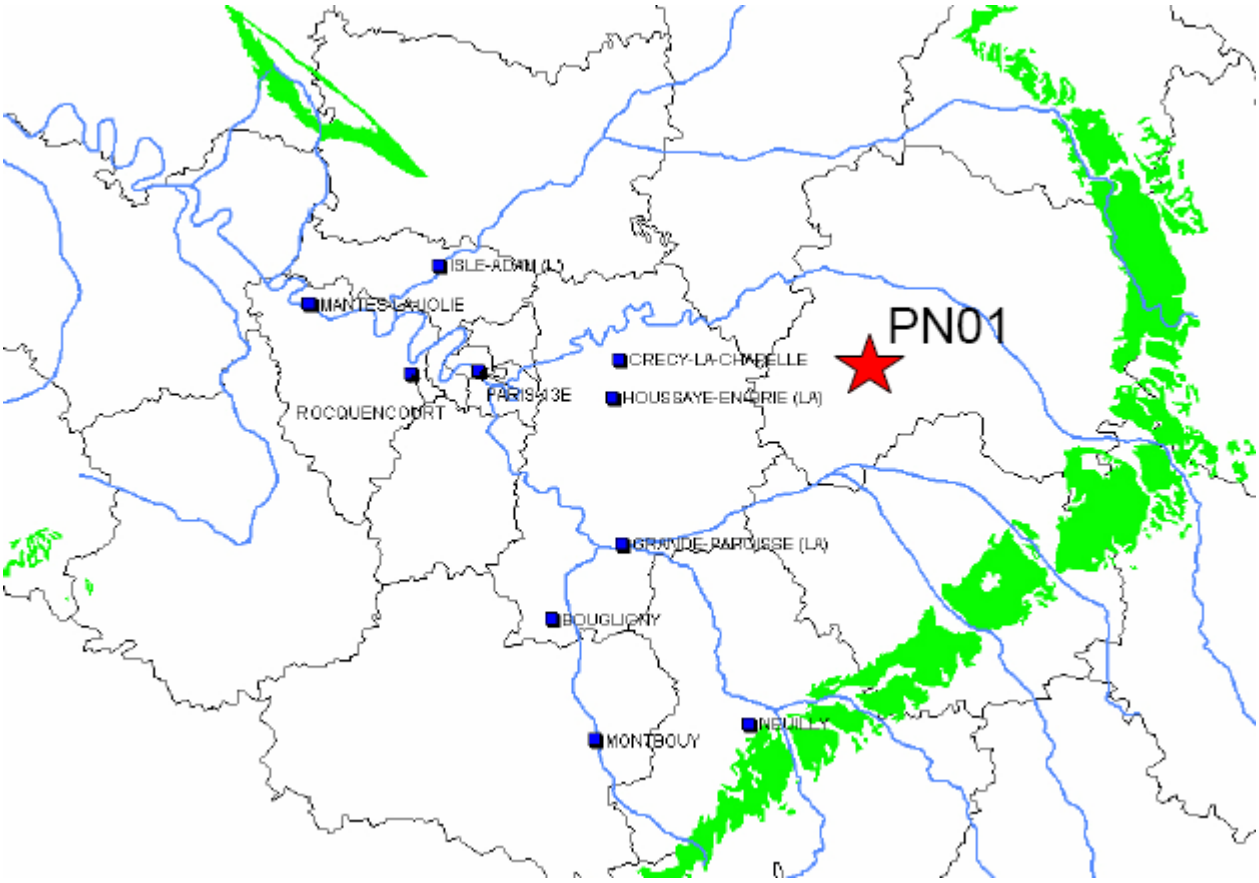


Figure 2: Localisation des points du réseau piézométrique à l'Albien et du puits PN01

Le forage PN01 a ainsi recoupé 4 niveaux aquifères de l'Albien-Néocomien :

- dans les sables de l'Albien inférieur entre 855 et 866 m ;
- dans le Barrémien supérieur entre 912 et 937 m ;
- dans le Barrémien inférieur entre 954 et 960 m ;
- dans l'Hauterivien entre 987 et 1020 m.

A partir du moment où Gaz de France abandonnait son projet de stockage et proposait une reconversion éventuelle en piézomètre, la préoccupation du BRGM était de vérifier la représentativité des niveaux aquifères pour le suivi d'une des deux nappes, voire des deux. L'étude de 2000 a montré que le niveau aquifère des sables de l'Albien inférieur paraissait bien représenter la nappe de l'Albien et que le niveau aquifère des sables hautériviens paraissait bien représenter la nappe du Néocomien.

Le forage apparaissait donc susceptible d'être transformé en piézomètre à l'Albien ou en piézomètre au Néocomien. Dans la mesure où aucun bouchon de ciment n'a été mis en place, ce forage pouvait même être équipé en double piézomètre. Un programme a été donc proposé pour chacune des trois solutions (ANTEA, 2000).

La solution du double piézomètre est délicate à mettre en œuvre techniquement et s'avère coûteuse (deux fois le prix d'une transformation en piézomètre simple à l'Albien). Par ailleurs, il est plus important, dans le cas d'un piézomètre simple, de suivre l'Albien que le Néocomien. C'est donc le choix du piézomètre à l'Albien qui a été retenu.

Le programme proposé par Gaz de France et validé par le BRGM a pour objectifs principaux :

- l'isolation de l'aquifère du Barrémien inférieur (Néocomien), seul niveau face auquel le puits est actuellement ouvert (crépines face à des perforations du liner cimenté 7"), par pose d'un bouchon dans le packer de cuvelage et mise en place d'un bouchon de ciment au-dessus ;
- la mise en configuration du puits pour contrôler l'aquifère de l'Albien inférieur, par perforation des cuvelages 9"5/8 et 7".

La figure 3 montre la coupe technique simplifiée du puits, tel qu'il sera configuré à l'issue de ces travaux.

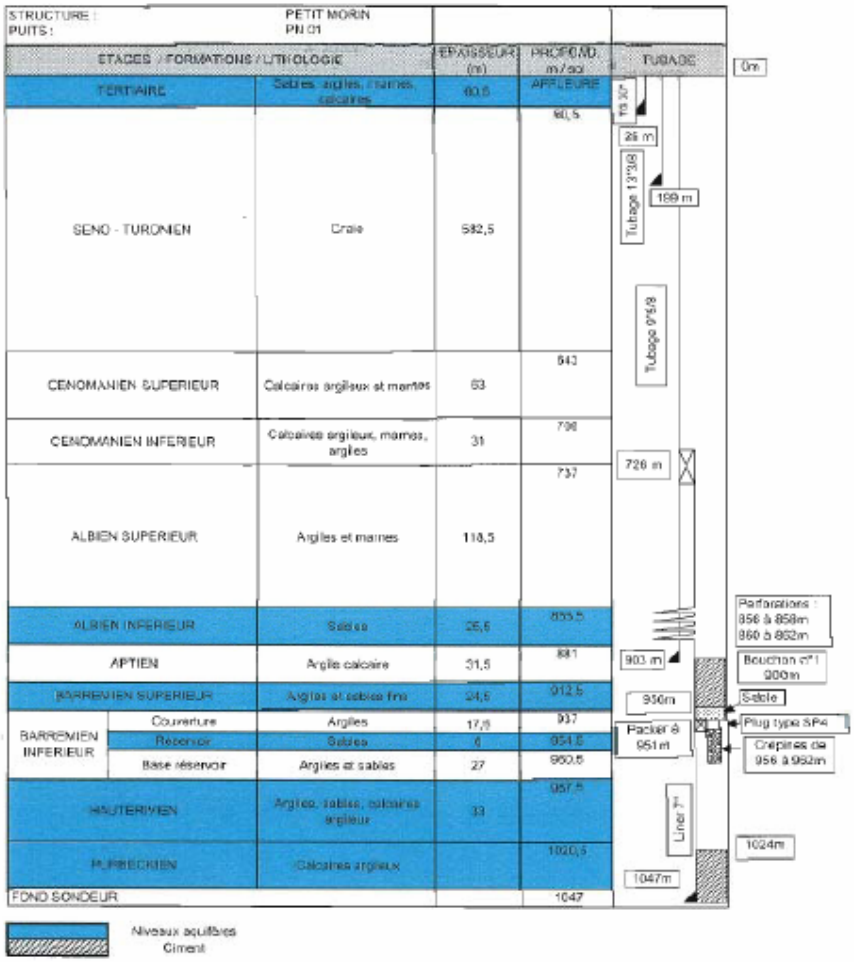


Figure 3 – Equipement du puits PN01 après sa conversion en piézomètre

Une fois les travaux de conversion réalisé, c'est le BRGM qui reprendra officiellement l'ouvrage (piézomètre). Un accord préalable a été signé par le B .R.G.M. le 11 janvier 2008 sur son engagement de reprise du puits cet accord est complété par la signature d'une convention (en cours) entre Gaz de France et le BRGM pour la rétrocession du puits. Une signature devant un notaire viendra, une fois les travaux réalisés, officialiser la rétrocession du puits et du terrain attenant au BRGM qui en devient propriétaire.

Cette démarche se fait en parallèle de la démarche administrative.

Aspects réglementaires

L'autorisation de recherches de formations souterraines naturelles aptes au stockage de gaz combustible accordée à Gaz de France en 1996 est arrivée à échéance en mai 2006. Le puits PN01 est le seul ouvrage réalisé dans le cadre de cette autorisation de recherches. Il est soumis depuis sa réalisation à la surveillance administrative et à la police des mines et des stockages souterrains exercée par le préfet du département de la Marne, pour le compte du ministre chargé des mines (article 77 du code minier).

Gaz de France a souhaité, dans le cadre de la transformation de PN01 en piézomètre et de sa rétrocession au BRGM, être dégagé de ses responsabilités et obligations liées à la police des mines et des stockages souterrains. Pour cela, et même en l'absence d'autorisation de recherches en cours de validité, Gaz de France avait obligation d'adresser au préfet de la Marne une déclaration d'arrêt des travaux miniers (article 84-1 et 91 à 93 du code minier).

Cette déclaration, effectuée en février 2008, contient la description des mesures envisagées afin de préserver les intérêts mentionnés à l'article 79 du code minier, qui comprennent la sécurité et la salubrité publiques, les caractéristiques essentielles du milieu environnant, et les intérêts visés par le code de l'environnement. Dans le cas du puits PN01, Gaz de France a démontré que les travaux de transformation en piézomètre n'auront pas d'incidence sur l'environnement et, en particulier, sur les nappes d'eau. Gaz de France a également décrit les travaux de remise en état de la plate-forme d'implantation du puits.

La Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche, et de l'Environnement (DRIRE) d'Ile-de-France a été chargée de l'instruction technique du dossier. Il a été soumis pour avis aux services de l'Etat et à la commune de Congy. Aucun avis défavorable n'a été émis. Les travaux de transformation pourront donc commencer dès que le préfet de la Marne aura donné acte à Gaz de France de sa déclaration d'arrêt des travaux miniers et autorisé la réalisation des travaux par arrêté préfectoral.

A l'issue des travaux, la DRIRE Ile-de-France, sur la base d'un mémoire de fin de travaux rédigé par Gaz de France et d'un procès-verbal de récolement établi suite à une visite sur site, pourra proposer au préfet de la Marne de donner acte à Gaz de France de l'exécution des mesures prévues, par arrêté préfectoral. Cet acte administratif mettra fin à l'application de la police des mines sur ce site. Le futur piézomètre PN01 n'y sera donc pas soumis.

Conclusions

1996 – 2008 : quelques années se sont écoulées entre le forage de ce puits d'exploration, qui portait les espoirs de découverte d'une nouvelle structure pour le stockage de gaz naturel et sa transformation en piézomètre de contrôle à l'Albien. Ces années ont permis :

- de faire mûrir un projet de conversion de puits en substitution d'un abandon et de permettre au projet un peu inhabituel ;
- de faire prendre forme de l'idée à la réalisation et ce sur l'ensemble des plans : réglementaires, techniques, financiers…;
- d'obtenir l'adhésion de l'ensemble des acteurs de ce projet et de clarifier le rôle de chacun.

L'année 2008, verra aboutir le projet de conversion du puits d'exploration PN01 en piézomètre à l'Albien: les opérations de conversion sont planifiées en Octobre 2008, pour un montant estimé aujourd'hui à 250 000 € et seront réalisées en accord avec la procédure administrative en cours.

La conversion du puits PN01 est le symbole de l'engagement pour le développement durable et l'environnement et de la connaissance des eaux souterraines des acteurs qui ont contribués à ce projet.

Cette première expérience a inspiré à Gaz de France d'autres opérations puisque fin 2008 d'autres rétrocessions de puits d'exploration sont prévues dans le Bassin Aquitain. Ces opérations ne manqueront pas d'ouvrir d'autres perspectives à l'avenir.

Références bibliographiques

ANTEA, 2000. Transformation du forage profond PN01 de Congy (Marne) en piézomètre à l'Albien et au Néocomien – Etablissement du programme technique. Rapport A 21583, octobre 2000, 27 p.

BRGM, 2000. Etude de faisabilité pour la mise en place d'un piézomètre à l'Albien-Néocomien – Puits PN01 (Marne). Rapport BRGM/RP-50289-FR, juin 2000, 28 p.

CHASSAGNEUX V., LEROY E., 1997. Rapport géologique de fin de sondage : structure du Petit Morin – Puits PN01. Rapport GDF M.DRS-VCH/DTH-G54494.

GUIGUES SA, 1997. Résultats d'analyses d'eau du PN01. Courrier du 13/01/1997, étude 54/397, 2p. HYDROEXPERT, 2000. Réalisation d'un modèle de gestion des aquifères de l'Albien et du Néocomien –

Phase 2. Rapport RP00M040, 15 juin 2000, 2 volumes, 53 + 88 p.

MORO S., 1997. Structure du Petit Morin – Puits PN01 : Interprétation des tests sur les aquifères du Barrémien inférieur et de l'Hauterivien. Rapport GDF réf. M.DRS-SMO/DTH G.54217, 31 janvier 1997,13 p.

RAOULT Y., 1999. La nappe de l'Albien dans le Bassin de Paris : de nouvelles idées pour de vieilles eaux. Thèse de l'Université Paris VI, 170 p.

VERJUS P. 2005. La nappe de l'Albien-Néocomien. Sauvegarde et mise en valeur d'une ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable de secours, Bulletin Inf. Géol. Bass. Paris, Vol. 42, N° 3, p. 42 à 47

Laayoune - Champ captant d'eau de mer

Bruno CANALETA

SOGREAH, 6 rue de Lorraine, 38130 Echirolles, bruno.canaleta@sogreah.fr

Résumé

La rareté de la ressource en eau douce a toujours constitué un véritable défi et une contrainte majeure pour l'exploitation des phosphates des gisements du Sahara Marocain. Cette région est en effet marquée par une faible pluviométrie (< 160 mm/an). Les quelques nappes d'eaux saumâtres du sous-sol sont inutilisables. Ces contraintes ont donc amené l'OCP (Office Chérifien des Phosphates) qui exploite les gisements depuis 1970, à mettre en œuvre des solutions alternatives économiquement rentables : l'usage combiné de l'eau de mer pour le lavage des phosphates et de l'eau dessalée pour le rinçage. En 2002, l'OCP a décidé de restructurer son système de production et de traitement d'eau industrielle afin de réduire les coûts de production et d'optimiser les consommations d'eau :

- Création d'un champ captant de 16 forages d'eau de mer d'une capacité de 4 800 m^3/h
- Acquisition de 2 unités d'osmose inverse d'une capacité unitaire de 2000 m^3/jour

Réalisé en 2004, le champ captant a permis une meilleure gestion de l'eau entre la demande des unités de production et les quantités pompées (économie de plus 150 000 € par an par rapport à l'ancien système de production). De plus, les eaux marines prélevées par les forages côtiers bénéficient d'une filtration naturelle qui a également permis de s'affranchir de traitements coûteux exigés par les techniques de dessalement.

1. Contexte

Le site de l'usine de PhosBoucraa se trouve en bordure de l'Océan Atlantique sur la côte du Sahara Marocain, à environ 5 km au Sud du port de Laayoune. L'usine produit des phosphates qui sont ensuite exportés par voie maritime grâce à un wharf de plus de 3 km de long.

La rareté des ressources en eau douce sur ce site a rendu nécessaire l'usage combiné de l'eau de mer pour le lavage des phosphates et de l'eau dessalée pour le rinçage.

Les besoins en pointe de l'ensemble des unités production sont de 4 000 m^3/h. La production annuelle est de l'ordre de 14 Mm^3 dont 1,1 Mm^3 sont dessalés.

L'eau de mer nécessaire au traitement des phosphates est prélevée dans l'océan à partir d'une station de pompage installée sur le wharf de chargement, puis acheminée par conduite jusqu'à un bassin de réception à terre.

La prise d'eau est intégrée au wharf sur une plate forme spécifique qui se trouve à plus de 1600 m du rivage. En 2002, les structures du wharf supportant le pompage et la conduite présentaient des dégradations importantes qui nécessitaient de très lourds investissements pour réhabiliter l'ouvrage (12 M€).

2. Restructuration du système de production d'eau

En 2002, l'OCP a décidé de restructurer son système de production et de dessalement d'eau industrielle :

- Acquisition de 2 unités d'osmose inverse d'une capacité unitaire de 2000 m^3/jour,
- Remplacement de l'ancien système de pompage installé sur le wharf par des forages sur le rivage.

Dans une première étape, l'OCP a demandé à SOGREAH d'étudier un circuit de prise d'eau de mer indépendant du wharf. Trois types de prise d'eau ont été étudiés en phase APS :

- Prise d'eau en mer par conduite immergée ;
- Prise d'eau dans un bassin filtrant ;
- Forages le long du rivage.

Géologie

La zone côtière le long des plages de Laayoune est constituée d'une couche pelliculaire de sables fins recouvrant un plateau rocheux formé de grès coquilliers et conglomératiques. Un forage de reconnaissance et une série de piézomètres ont été réalisés en 2002 afin de reconnaître le potentiel aquifère de ces grès. Le forage a traversé des grès consolidés jusqu'à 40 m de profondeur, comportant de nombreuses macro fissures et cavités. Ces « vides » ont occasionné des pertes importantes de circulations de boue. Les essais par pompage ont montré que l'on pouvait exploiter ces grès à des débits de l'ordre de 300 m^3/h (la transmissivité des grès étant comprise entre 1 à 4 x 10^{-2} m^2/s).

L'eau produite par le forage est très proche de l'eau de l'océan au niveau de la minéralisation. Elle présente d'excellentes caractéristiques au niveau de la turbidité et de la teneur en matières en suspension (eaux claires exemptes de sables lors des pompages).

Comparaison financière des solutions

A l'issue des études APS, les diverses solutions ont été évaluées financièrement :

- Prise d'eau en mer par conduite immergée (- 10 m/CM) 17 M€
- Prise d'eau dans un bassin filtrant 49 M€
- Ligne de 16 forages le long du rivage 6 M€

Etudes de projet d'un champ captant de 16 forages

Les études hydrogéologiques, hydrauliques, électro - mécaniques ont conduit à proposer un champ captant de 16 forages qui permettra d'assurer une production de pointe de 4800 m^3/h (sur la base d'une production moyenne de 300 m^3/h par forage).

Deux lignes de forages sont prévues :

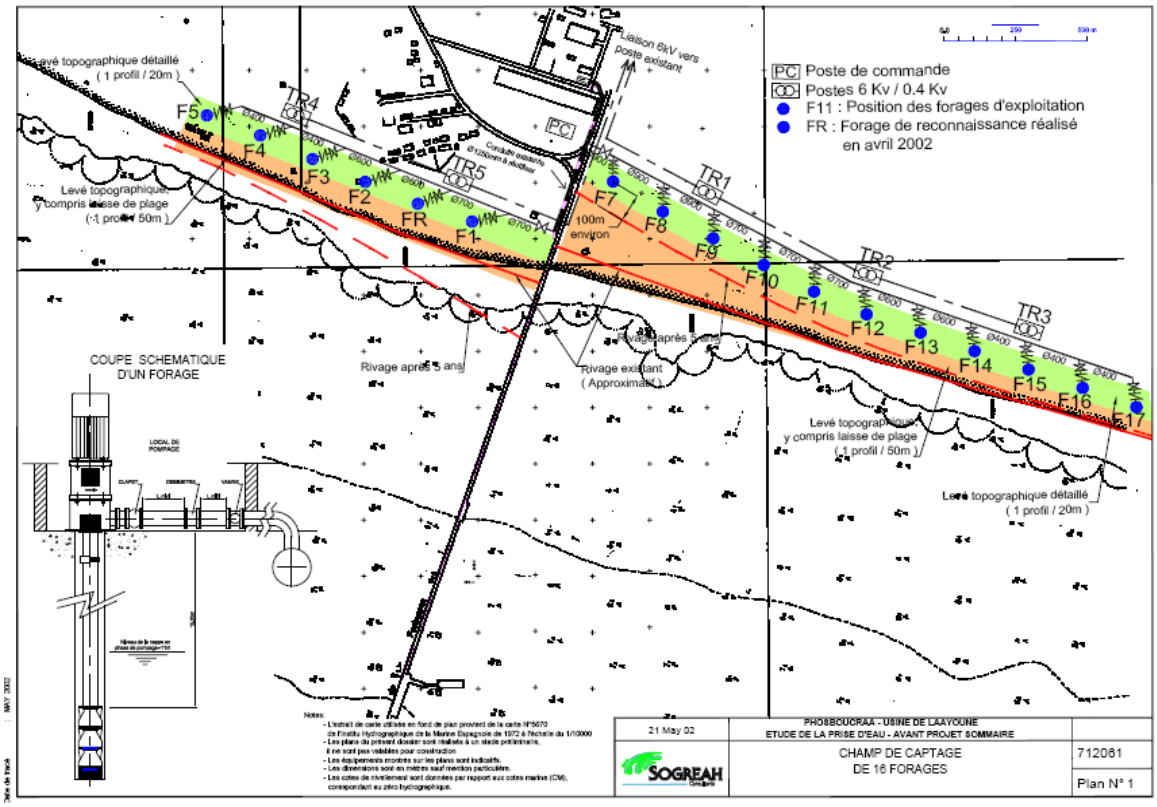
- 6 forages le long de la plage Nord
- 10 forages le long de la plage Sud

La distance entre forage a été fixée à 200 m afin d'éviter toutes interférences entre forages.

Les forages ont été positionnés en haut de plage à la côte + 3 m/CM.

Le plan d'ensemble du champ captant est présenté sur le plan ci-après.

Figure 1 *Implantation des forages constituant le champ captant*



3. Réalisation du projet en 2004

La procédure d'appel d'offre a duré 2 ans.

Les travaux ont été attribués à l'entreprise CEGELEC Maroc pour un montant de 6 M€. Ils ont débuté en mars 2004 et se sont achevés en octobre 2004.

La consistance des travaux a été la suivante :

- Réalisation de 16 forages équipés de crépines JOHNSON (+ 16 piézomètres)
- Installation de 16 pompes PEME GOURDIN à ligne d'arbre – 300 m^3/h
- Pose de 3700 mètres de conduites en PRFV (diamètre 400 à 900 mm) – AMITECH Spain
- Construction de cinq postes MT / BT (6 Kv / 400 v)
- Construction des bâtiments forages et des postes électriques
- Mise en place d'un système de télégestion et de vidéosurveillance des forages

SOGREAH a assuré une mission d'assistance technique lors de l'exécution des travaux.

4. Caractéristiques techniques des forages

Les forages ont été sous traités à l'entreprise FORASOL Maroc. Les forages et équipements de pompage ont été dimensionnés pour une production unitaire de 300 m^3/h, avec une installation des pompes à ligne d'arbre à - 20 m/TN.

Les travaux de forages ont été organisés en deux étapes :

- Réalisation d'un sondage équipé en piézomètre sur chaque point de forage
- Réalisation de 16 forages d'exploitation d'une profondeur de 40 mètres

La méthodologie d'exécution des forages d'exploitation a été la suivante :

- Mise en place d'un tube guide 26'' cimenté au terrain
- Tubage provisoire en 24'' des sables de plage sur 4 mètres
- Forage du toit des grès en 22'' jusqu'à 10 m de profondeur
- Mise en place d'un casing inox 18''5/8
- Cimentation du casing inox 18''5/8 (ciment spécial mer)
- Forage des grès au tricône à l'air en 17''1/2 jusqu'à 40 mètres
- Mise en place de la colonne de captage et du gravel pack
- Développement par air lift pendant 8 heures
- Développement par pompage pendant 8 heures
- Essai par paliers de débit de 2 heures (90, 180, 270 et 360 m^3/h)
- Essai à débit constant (300 m^3/h) pendant 24 heures
- Inspection caméra des forages

La colonne de captage fournie par JOHNSON, est identique pour tous les forages (voir plan d'équipement des forages en page suivante).

Elle est constituée :

- de tubes plein inox 316 L d'un diamètre DN 14'' (épaisseur de 6 mm, longueur de 5,85 mètres), avec un diamètre intérieur de 339,59 mm
- de crépines inox 316 L DN 14'' (355,6 mm) à fil enroulé triangulaire (125 µ), slot de 1 mm sur une longueur totale de 23,4 mètres (voir photographie en page suivante)

Les raccords sont de type raccords rapides à clavetage circulaire (type ZSM). Ce système de raccords présentait l'avantage de permettre un assemblage rapide de la colonne de captage (par rapport aux raccords vissés qui se révèlent particulièrement délicats à assembler sur des tubages inox de gros diamètres) ou de travaux de soudure sur le chantier.

Un tube lisse intermédiaire a été intercalé entre 17.5 m et 21,9 m pour constituer une chambre de pompage (l'aspiration de la pompe étant positionnée à 20 mètres). La base de la colonne de captage est constituée d'un tube de décantation d'une longueur de 1,5 mètre à fond conique. Du fait des raccords ZSM, l'assemblage et la descente des colonnes de captage, ont été rapides (réalisés en moins de 1 heure par l'entreprise).

Aucun problème particulier n'a été rencontré lors des opérations de mise en place du gravier, hormis le fait que certains forages ont nécessité d'importantes quantités de gravier, en raison de la fracturation des grès. Lors des essais, les forages qui ont consommé de fortes quantités de graviers, se sont révélés être les plus productifs.

Les 16 forages donnent des débits compris entre 257 et 300 m3/h pour des débits spécifiques compris entre 22 et 155 m3/h/m. Le débit spécifique Q/s (en m^3/h/m) caractérise la productivité du forage en donnant le débit par mètre de rabattement de nappe. Ce paramètre intègre les pertes de charge « naturelles » liées au passage de l'eau dans le terrain, et les pertes de charges liées à l'ouvrage, et notamment au passage de l'eau à travers le complexe gravier/crépines.

La productivité des forages est variable selon une gamme de débits spécifiques de 27 à 155 m3/h/m.

Comme l'équipement mis en place est standard (hormis pour le forage de reconnaissance FR), le rabattement observé sur les différents forages, est essentiellement lié à la plus ou moins grande fissuration des grès au droit de chaque forage (il s'agit en fait de macro fissures).

La dernière opération a consisté à réaliser une inspection caméra afin de vérifier l'état des crépines (voir photographies N°1 et N°2 sur la planche photographique en annexe).

5. Pompes et canalisations

Les 16 forages ont été équipés de pompes PEME GOURDIN (à ligne d'arbre) de type GEVFE39/32PN à 2 étages – 300 m3/h à 27.5 m – Moteur 45 Kw (voir photographies N°3 et N°4). Des variateurs de vitesse permettent d'ajuster le débit des forages en fonction des caractéristiques hydrauliques (de 200 à 350 m^3/H).

Les 2 conduites d'adduction mises en place le long des plages Nord et Sud sont en PRVF (Polyester Renforcé à la Fibre de Verre) provenant de l'usine AMITECH SPAIN (voir photographies N°5 et N°6). Les principaux avantages du PRVF étant son insensibilité à la corrosion et son poids.

6. Supervision et télégestion du champ captant

Les forages sont gérés par un système supervision et de télégestion (voir photographies N°7 et N°8). Le fonctionnement consiste à gérer automatiquement le nombre de forages en service et leur vitesse, à partir d'une table de priorité des forages et d'une consigne de débit (vitesse variable entre 1200 et 1500 tr/mn). Le contrôle complet des forages est fait à partir d'un poste de supervision (commande à distance des forages, gestion des alarmes et défauts, calcul des débits, calcul des consommations énergétiques, rapports de production…).

7. Retours d'expérience et perspectives de développement

Exploité depuis 2004, le champ captant de l'OCP a permis une meilleure gestion de l'eau entre la demande des unités de production et les quantités pompées (économie de plus 150 000 € par an par rapport à l'ancien système de production). De plus, l'eau de mer pompée par les forages bénéficie d'une filtration naturelle qui a également permis de s'affranchir de traitements coûteux exigés par les techniques de dessalement.

Le système de supervision permet de gérer avec une grande souplesse la production des forages. Depuis 2004, il n'a pas été constaté de baisse significative de productivité des ouvrages. Les premières opérations d'entretien des forages sont programmées pour 2009.

Lorsque les formations géologiques le permettent, les forages côtiers constituent donc une solution de captage particulièrement performante des eaux marines, en particulier pour les unités de dessalement par osmose inverse qui nécessitent un pré-traitement très poussé de l'eau brute.

COLLOQUE "LE FORAGE D'EAU AU XXIE SIECLE"

Liste des entreprises présentes sur les stands du hall d'exposition :

- ANTEA - www.antea-ingenierie.fr
- AQUAM - www.aquam.fr
- FORADOUR - www.foradour.com
- FORAGES MASSE - www.forages-masse.fr
- FRANCE REGENERATION TECHNOLOGY - www.france-regeneration.com
- GEO HYDRO INVESTIGATION www.geohydroinvestigation.com
- GEOPRO S.A. - www.geopro.be
- HYDRO-ASSITANCE - www.hydro-assistance.fr
- HYDRO INVEST - www.hydroinvest.com
- JOHNSON SCREENS - www.johnson.fr
- LYONNAISE DES EAUX - www.lyonnaise-des-eaux.fr
- SALTEL INDUSTRIES - www.saltel-industries.com
- SDEC FRANCE - www.sdec-france.com
- SEMM LOGGING - www.semmlogging.fr

ASSOCIATION DES HYDROGEOLOGUES DES SERVICES PUBLICS

A.H.S.P.
Maison de la Géologie
77, rue Claude Bernard
75005 Paris

www.ahsp.fr

"Le forage d'eau au XXIe siècle"

Colloque organisé en 2008 par l'Association des Hydrogéologues des services publics (AHSP)
&
l'Institut EGID Bordeaux 3
avec le concours de

Ce colloque a reçu le label :