

Master

M2 - Hydrogéologie et Transferts

Année 2015-2016

Rapport des annexes

**Identification et analyse des difficultés
rencontrées lors de la réalisation d'un
forage d'eau**

Millin Yohan

**Stage effectué du 11/01/2016 au 30/06/2016
BRGM, 3 Avenue Claude Guillemin, Orléans
Tuteur de stage : Gutierrez Alexis, BRGM**

Sommaire

ANNEXE 1 : LE FORAGE SONIQUE (<i>BOART LONGYEAR, 2012</i>).....	2
ANNEXE 2 : L'UTILISATION DES FLUIDES DE FORAGE	3
ANNEXE 3 : CARACTERISTIQUES DES TYPES DE TUBAGE UTILISES EN FORAGE. (<i>BEZELGUES-COURTADE & DURST, 2012</i>)	5
ANNEXE 4 : CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES CREPINES (SYNTHESE D'APRES SOLAGES, 1979 & D'APRES DETAY, 1993).....	6
ANNEXE 5 : METHODOLOGIE POUR LE CHOIX DU MASSIF FILTRANT (<i>SOLAGE, 1979</i>).	7
ANNEXE 6 : VERTICALITE D'UN OUVRAGE (<i>MEHMERT, 2007</i>).	9
ANNEXE 7 : MISE EN PLACE DU MASSIF FILTRANT	10
ANNEXE 8 : L'IMPORTANCE DE LA CIMENTATION	12
ANNEXE 9 : L'EFFET DE L'AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE SUR UN TUBAGE PVC. (<i>MEHMERT, 2007</i>).	14
ANNEXE 10: LE VIEILLISSEMENT D'UN FORAGE	15
ANNEXE 11 : LES METHODE DE REPECHAGE	17
ANNEXE 12 : MILIEU NATUREL PARTICULIER ET LES IMPACT POTENTIELS. (<i>BEZELGUES-COURTADE & DURST, 2012</i>).19	19
ANNEXE 13 : RISQUE A L'INSTALLATION DU CHANTIER. (<i>BEZELGUES-COURTADE & DURST, 2012</i>).	20
ANNEXE 14 : INSTALLATION ET CHOIX DU TUBAGE. (<i>BEZELGUES-COURTADE & DURST, 2012</i>).	21
ANNEXE 15 : RISQUE LIE A LA CIMENTATION D'UN FORAGE. (<i>BEZELGUES-COURTADE & DURST, 2012</i>).	22
ANNEXE 16 : NOTE TECHNIQUE : COUT MOYEN D'UN FORAGE D'EAU EN FRANCE	23

Annexe 1 : Le forage sonique (*Boart longyear, 2012*).

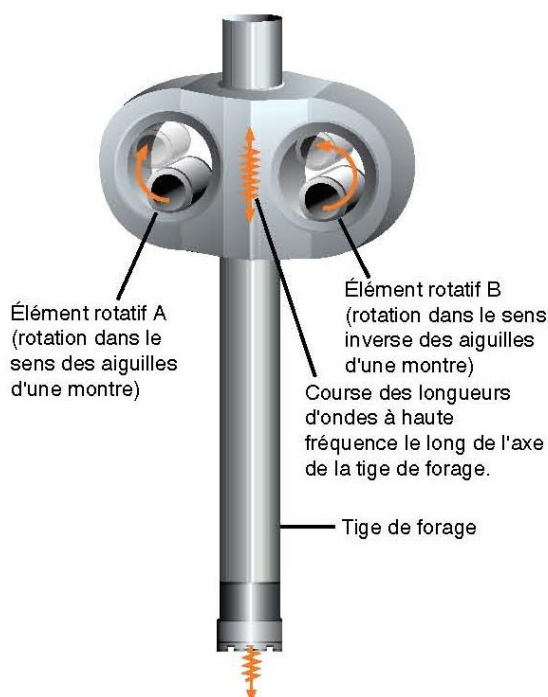
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU FORAGE SONIQUE

Le forage sonique est une méthode évoluée qui utilise l'énergie de résonance à haute fréquence générée à l'intérieur de la tête sonique pour faire avancer un trépan carottier ou un cuvelage dans les formations souterraines. Lors du forage, l'énergie de résonance est transférée le long de la rame de forage jusqu'à la face de la carotte à différentes fréquences soniques. Dans le même temps, la rotation de la rame de forage permet de répartir l'énergie et l'impact de manière homogène sur la face de la carotte.

L'énergie de résonance est produite à l'intérieur de la tête sonique par deux poids contre-rotatifs. Un système d'isolation pneumatique à l'intérieur de la tête sonique empêche la diffusion de l'énergie de résonance vers la carotteuse et canalise l'énergie vers la rame de forage.

Le foreur contrôle l'énergie de résonance générée par l'oscillateur de la tête sonique pour s'adapter à la formation rencontrée de manière à optimiser la productivité du forage. Un phénomène de résonance se produit lorsque l'énergie sonique résonante coïncide avec la fréquence naturelle de la rame de forage. De cette manière, une quantité maximale d'énergie est libérée sur la face de la carotte. Dans le même temps, le frottement du sol contigu à la rame de forage est considérablement réduit, ce qui accélère les taux de pénétration.

SCHÉMA DE L'OSCILLATEUR SONIQUE

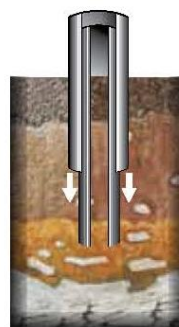


PROCÉDURE DE FORAGE SONIQUE

S'il existe plusieurs méthodes de forage sonique (selon les conditions spécifiques au site et les objectifs du projet), la procédure la plus courante consiste à faire avancer un trépan carottier, mis hors service par une rame de forage de large diamètre qui assure le cuvelage du trou ouvert et prévient tout effondrement.

ÉTAPE 1 - AVANCEMENT DU TRÉPAN CAROTTIER

La rame de forage avance au moyen de fréquences soniques. Lorsque cela est nécessaire, cette étape peut s'effectuer sans fluide, ni air ni boue.



ÉTAPE 2 - MISE HORS SERVICE DU CUEVAGE

Une fois le trépan carottier en place, le cuvelage est avancé par moyen sonique sur le trépan, protégeant ainsi l'intégrité du trou sur des terrains non consolidés et meubles.

ÉTAPE 3 - EXTRACTION PAR CAROTTES

L'extraction du trépan carottier produit un échantillon relativement non remanié avec une extraction des carottes proche des 100 %.



ÉTAPE 4 - AVANCEMENT DU TRÉPAN CAROTTIER

Les étapes 1 à 3 sont répétées en profondeur pour produire un carottage continu sur des formations non consolidées avec moins de 1 % de déviation.

Annexe 2 : l'utilisation des fluides de forage



Les fluides de forage

Certaines méthodes de foration telles que le rotary et le marteau de fond de trou (MFT) nécessitent un fluide de forage. Il est possible de distinguer deux familles de fluides de forages : les fluides à base d'eau et les fluides à base d'air. Ces fluides doivent être ajustés en permanence selon les besoins.

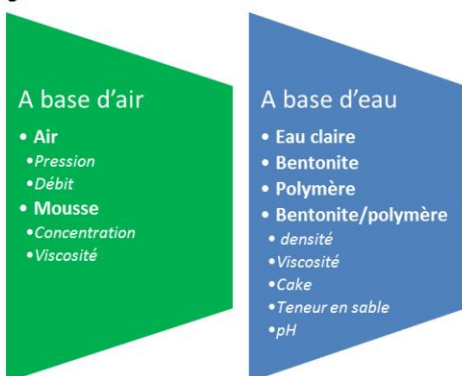
Quelles fonctions remplit le fluide de forage ?

L'utilisation des fluides à base d'eau (boue bentonitique et polymère) et à base d'air (MFT) permet de :

- ◇ remonter efficacement les *cuttings* à la surface,
- ◇ refroidir et lubrifier l'outil de forage,
- ◇ maintenir les parois du forage,
- ◇ Compenser l'artésianisme.

Classification des fluides de forage et les paramètres qui les caractérisent.

L'efficacité d'un fluide de forage va dépendre principalement de la réactivité de l'opérateur à ajuster les paramètres du fluide pendant le forage.



Forage à l'air comprimé

Utilisé en particulier avec la méthode MFT, l'air comprimé va permettre, par la pression d'air, d'actionner le marteau. Le débit d'air (en m³/min) va déterminer la vitesse de remontée des *cuttings*.

Il est parfois nécessaire d'ajouter une mousse stabilisée accompagnée d'un viscosifiant dans les situations suivantes :

- ◇ perte de l'air en milieu fracturé, difficultés de remontée des *cuttings*, avancement ralenti,
- ◇ faibles venues d'eau,
- ◇ éboulement, risque de coincement.

L'ajout de mousse se fait par le train de tige avec un mélange d'eau. Les quantités indicatives sont les suivantes :

- ◇ mousse stabilisée : 0.2 à 2% du poids d'eau utilisé,
- ◇ viscosifiant : 0.2 à 0.6 % du poids d'eau utilisé.

L'ajout de la mousse accompagnée d'un viscosifiant va permettre de remonter le *cutting*, de limiter les phénomènes d'éruption et de diminuer les éboulements. Cependant, l'utilisation de la mousse réduit la vitesse de pénétration :

- ◇ environ 40% à 6-7 bars,
- ◇ environ 20% à 10.5 bars,
- ◇ environ 10% à 18 bars.

A la fin de l'opération, un soufflage permet de se débarrasser de la mousse.



Forage au MFT avec utilisation de mousse, BRGM

Fluide de forage à base d'eau

L'eau claire est utilisée en milieu karstique lorsque le forage ne présente pas de risques d'éboulement, une importante quantité d'eau doit être disponible puisque la perte totale du fluide est fréquente dans ce milieu.

La boue à base de bentonite est principalement constituée d'une argile type smectite dont les propriétés (thixotropie) assurent le maintien des parois de l'ouvrage. Les proportions pour mélanges d'une boue neuve varient de 30 à 80kg de bentonite par mètre cube d'eau. La formation d'un dépôt argileux sur les parois du forage (le *cake*) permet d'empêcher les éboulements.

Cependant, ce *cake* colmate la formation aquifère. A la fin du forage, il faut appliquer un traitement chimique et/ou mécanique pour nettoyer la paroi du forage. Les caractéristiques rhéologiques de la boue bentonitique sont susceptibles de varier au cours du forage et l'opérateur devra tenir compte de ces changements en suivant les paramètres tel que la densité et la viscosité.



Les fluides de forage

Les boues à base de polymères, tirent partie des propriétés viscosifiantes de ces produits généralement biodégradables. Le « *revert* », tient son nom de sa capacité de réversion envers sa viscosité. A 20°, il suffit de 4kg de *revert* par mètre cube pour obtenir la même viscosité que la bentonite. La rupture de viscosité s'observe par changement de couleur de la boue et l'opérateur est ainsi averti que le processus de réversion a commencé. A partir de ce moment, la boue visqueuse devient aussi fluide que l'eau et le forage est débarrassé de la boue. Les opérations de lavage sont, de ce fait, beaucoup plus rapides qu'avec l'utilisation de la bentonite.

Cette boue polymère est dite aussi efficace que la bentonite pour :

- consolider les parois du forage,
- remonter les *cuttings*,
- lubrifier et refroidir l'outil.

Les caractéristiques du *revert* sont influencées principalement par les paramètres suivants :

Paramètres (valeur normale pour 8kg de <i>revert</i> /m ³ à 20°)
la viscosité (90s)
le moment de rupture de viscosité (3-4j)
le pH (5-7,5)

L'avantage du *revert* réside dans le fait que l'opérateur peut avancer ou retarder le moment de rupture de viscosité. Pour ce faire, il peut ajouter de la soude caustique (soit 2.25kg pour 100kg de

revert sec), le moment de rupture sera alors repoussé à 10 jours. A l'inverse, il peut rajouter un produit chimique qui provoque la rupture instantanée de la viscosité (*Fast Break*). La température et la présence dans l'eau de fer dissous (3 ppm) influencera aussi le moment de rupture de la viscosité du *revert*.

Le pH va également influencer la viscosité. En cas de contamination par le ciment (pH basique), l'ajout d'acide chlorhydrique permettra de ramener le pH de la boue polymère à des valeurs normales (5-7,5).

La densité du *revert* est de l'ordre de 1 et il est donc difficile de compenser une forte venue d'eau. Il pourra être ajouté du chlorure de calcium ou du chlorure de sodium (100kg de sel par m³ d'eau) pour passer d'une densité de 1 à 1,1.

La boue de forage avec additifs et polymères. En complément d'une boue à base de bentonite, peuvent être ajoutés des additifs et des polymères. Les catégories suivantes permettent de résumer la large gamme de produits existants :

- agents d'alcalinité,
- lubrifiants,
- stabilisateurs,
- diluant/dispersants,
- viscosifiant,
- agents de pondération,
- agents mouillants.

Forage à la boue à base de bentonite/polymère et remède en cas d'altération des caractéristiques rhéologiques de la boue

Objet des mesures (Valeurs normales)	Appareils de mesure	Altération des valeurs d'une boue neuve ----- Conséquences	Remèdes
Densité moyenne 1,20	Balance densité	Trop élevée : ◇ cake trop épais ◇ risque de perte de boue Trop faible : ◇ cake trop mince ◇ éboulement ◇ éruption si artésianisme	Diminuer la densité avec l'ajout d'eau $m = V_i \times \frac{(d_i - d_f)}{(d_f - d_{eau})} \times d_{eau}$ Augmenter la densité avec l'ajout de bentonite ou de baryte $m = V_i \times \frac{(d_f - d_i)}{(d - d_f)} \times d$ <i>df : densité finale di : densité initiale m : masse à ajouter deau : densité eau d : densité baryte Vi : volume de boue initiale</i>
Viscosité moyenne 40 à 45 secondes	Viscosimètre MARSH	Trop élevée : ◇ difficulté de pompage, risques de coincements pendant les arrêts de circulation Trop faible : ◇ risque de perte de boue, faible remontée du <i>cutting</i>	Diminuer la viscosité avec du pyrophosphate (40kg/m ³) Augmenter la viscosité avec de la bentonite, de l'amidon ou de la fécule
Cake 5 mm maximum	Filtre-pressé	Trop épais : ◇ colmatage des parois du forage Trop mince : ◇ éboulement des parois	Dilution à l'eau Ajout d'amidon, fécule ou de polymère cellulosique
Teneur en sable 5 % maximum	Elutrimètre ou tamis	Risque d'érosion de la pompe à boue	Employer les dessableurs à cyclones
pH 7 à 9,5	Papiers colorimétriques	pH > 11 = contamination par le ciment ou par l'eau de la formation pH < 7 = risque de floculation de la boue	Employer des polyphosphates ◇ acide si pH > 11 ◇ neutre si pH < 7

Références :

Lauga, R (1990). Pratique du forage d'eau. Edition Seesam.

MABILLLOT, A. (2005). Le Forage d'Eau. Guide pratique. Johnson Filtration Systems, Naintré..

BRGM —Service D3E, 3 avenue C. Guillemin, BP 3600945060 ORLEANS Cedex 2, FRANCE

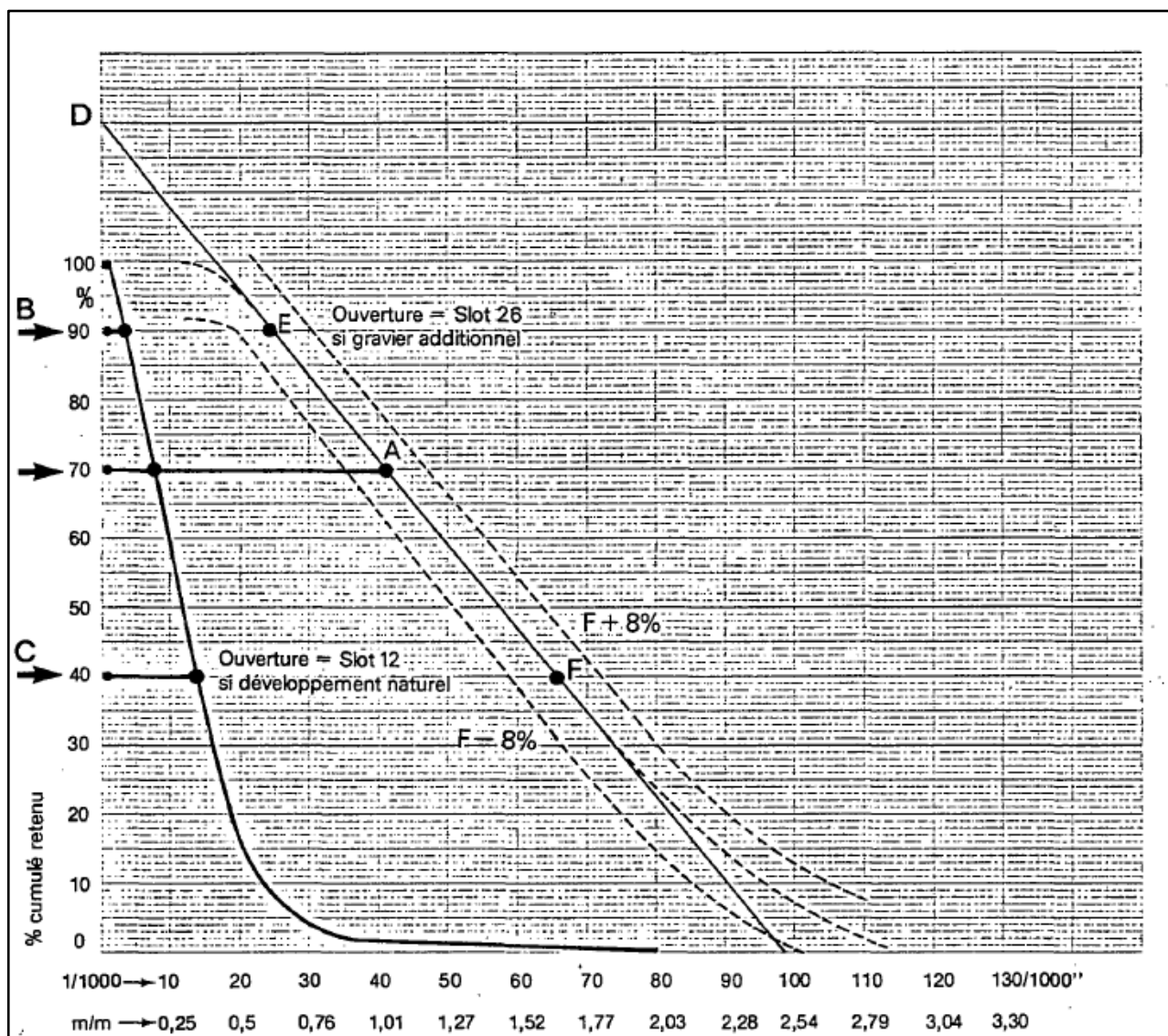
Annexe 3 : Caractéristiques des types de tubage utilisés en forage. (Bézègues-Courtade & Durst, 2012)

Matériaux		Résistance mécanique	Corrosion		Milieu
PVC alimentaire		Faible résistance mécanique → risque d'écrasement et/ou d'éclatement. Si dénoisement : écrasement facilité.	Insensible		Adapté aux forages peu profonds (< 200m)
PEHD		Modérée. Sensible aux altérations de surface (rayures)	insensible		Tout milieu
Acier		Excellente	très sensible		Inadapté aux eaux très minéralisées
Fibre de verre		Modérée. Sensible aux altérations de surface (rayures)	Insensible		Adapté à tous milieux
Acier inoxydable	austénitiques	Bonne résistance	Sensible à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlore		Inadapté si présence de chlore Si chlore, ajouter Mo à l'alliage
	ferritiques	Moins résistant que les autres nuances.	Très peu sensible à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlorures		
	duplex	Bonne	Très peu sensible		Adaptés aux environnements marins
	martensitiques	Grande dureté et résistance mécanique,	Résistance limitée (la plus faible des aciers inoxydables) Bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlore		Utilisable en présence de chlore
	durcissement par précipitation	Excellente résistance mécanique et grande dureté	Résistance < duplex		
Acier revêtu (galvanisé)		Dans une eau modérément dure à pH neutre, bonne résistance au chlorure, sulfates et nitrates.	Bonne résistance au chlorure, sulfates et nitrates dans une eau modérément dure à pH neutre Corrosion rapide du Zn dans une eau de faible dureté, pH élevé, alcalinité élevée		Adapté à eau modérément dure

Annexe 4 : Caractéristiques des différentes crépines (Synthèse d'après solages, 1979 & d'après Detay, 1993).

Type de crépines	Nature	Terrain conseillé	Indice des vides en %
Crépines à trous ronds	Acier/inox	Tendre/boulant à gros élément	10
Crépines à trous oblongs	Acier/inox	Dur	10 à 20
Crépines persiennes	Acier/inox	meuble	1.5 à 6
Crépines à nervures repoussées	Acier/inox	Meuble	3 à 27
Crépines fils enroulés	Inox	Meuble	20 à 50
Crépines à fentes	PVC/PEHD	Meuble	5.5 à 12

Annexe 5 : Méthodologie pour le choix du massif filtrant (Solage, 1979).



Exemple de calcul du massif de gravier par la méthode graphique
(cf. fig. n° 3)

Dans le cas de l'exemple choisi, la formation est définie par la courbe de gauche : on multiplie la valeur de l'abscisse à 70 % par un nombre compris entre 4 et 6 si le matériau est très uniforme et par 6 dans le cas contraire. Si par exemple nous prenons 6 nous obtenons le point A, premier point de la courbe cherchée. Pour le deuxième point, nous faisons appel à la notion de coefficient d'uniformité U qui représente le quotient de l'abscisse à 40 % par l'abscisse à 90 %. L'expérience montre que U varie de 2 à 2,5 pour un gravier additionnel. Prenons 2,5 :

Nous avons donc :

$$U = \frac{CF}{BE} = 2,5.$$

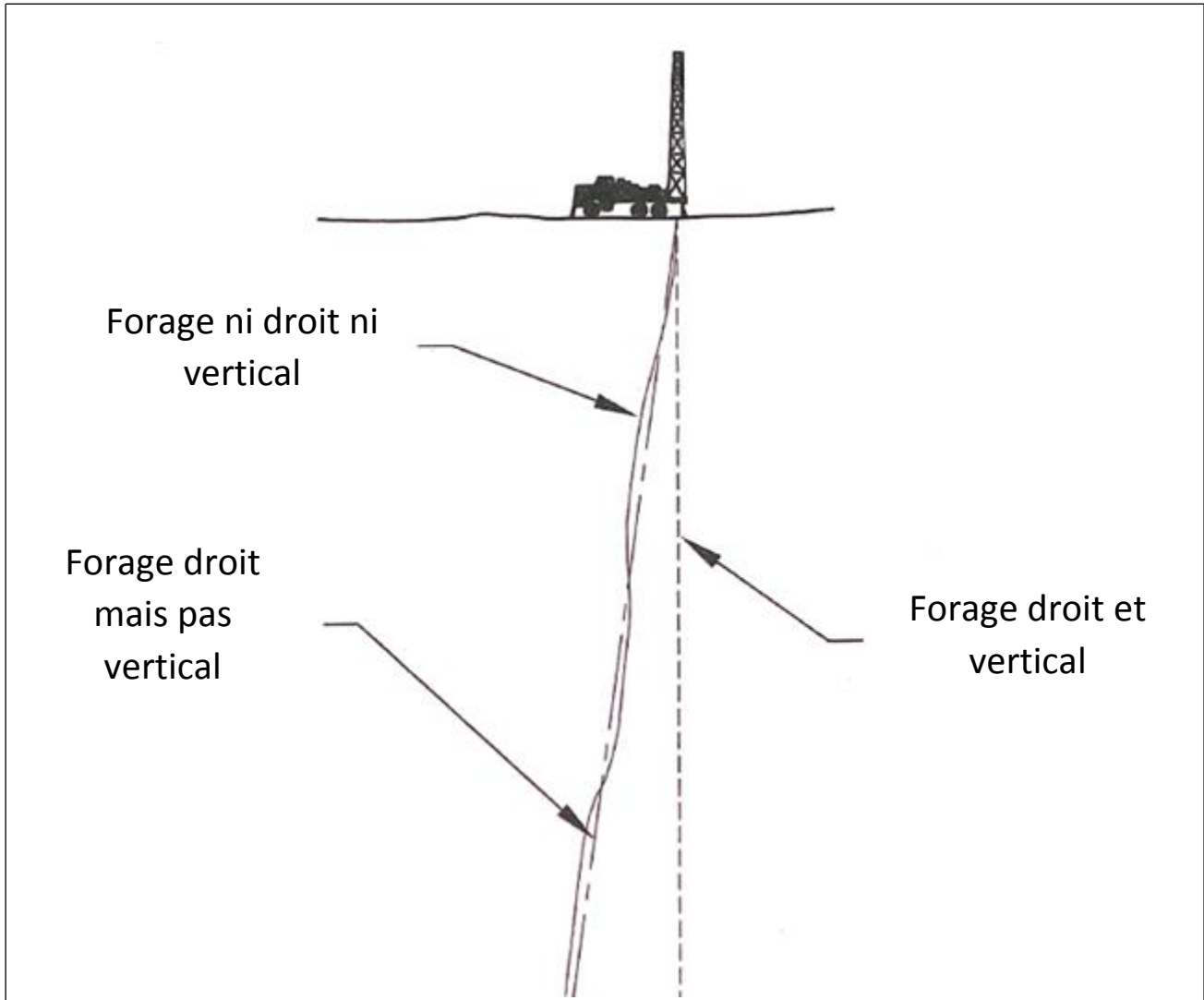
Pour trouver E et F, nous prolongeons l'axe des Y jusqu'au point défini comme suit :

$$BD = \frac{BC}{U-1} = \frac{BC}{2,5-1} = \frac{BC}{1,5}$$

La droite DA que nous traçons, coupe les abscisses à 90 % et 40 % respectivement aux points E et F cherchés. Les points limitent le segment de droite EF passant par A, qui constitue la portion caractéristique de la courbe granulométrique du gravier à utiliser.

Nous interprétons ce tronçon de courbe comme suit : le gravier à utiliser doit être tel que 10 % de son poids soit constitué d'éléments plus fins que 0,65 mm environ, et 40 % d'éléments plus gros que 1,65 mm environ, avec une tolérance de l'ordre de ± 8 % en poids pour chacune de ces deux données. Il est en effet pratiquement impossible de reconstituer la courbe complète d'un matériau, il faut donc nous limiter à ce tronçon de courbe.

Annexe 6 : verticalité d'un ouvrage (*Mehmert, 2007*).



Annexe 7 : mise en place du massif filtrant



Importance du massif filtrant

Le massif filtrant est mis en place dans l'espace annulaire du forage. Il joue le rôle de filtre et maintient la formation à capter (soutènement). Pendant la phase de développement, ce filtre permet l'évacuation des particules fines proches provenant de formations géologiques meubles et améliore la perméabilité autour du captage.

Pourquoi et quand utiliser un massif filtrant ?

L'ajout d'un matériaux inerte dans l'espace annulaire est indispensable pour des terrains meubles constitués de grains fins ou relativement homogènes.

Avantages

- ♦ Il empêche ou diminue fortement le risque d'ensablement de l'ouvrage
- ♦ Augmente considérablement la perméabilité autour du forage en permettant l'évacuation des fines.
- ♦ Il permet de choisir des crépines plus ouvertes qui diminuent les pertes de charge dans l'ouvrage.
- ♦ Il maintient les parois du trou et peut servir de support à un équipement ou un autre matériau (cimentation)

Pour les terrains hétérogènes meubles (Coefficient d'uniformité¹>5), constitués de matériaux grossiers, le massif filtrant additionnel n'est pas nécessaire car les grains les plus fins de la formation seront évacués lors du développement, laissant en place les éléments les plus grossiers qui font filtre. On parle alors d'auto-développement.

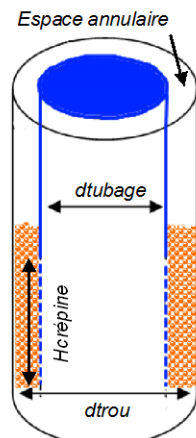
Caractéristiques

- ♦ Gravier siliceux ou billes de verre, chimiquement stables, désinfectés.
- ♦ Granulométrie calibrée de façon optimale par rapport à la formation aquifère exploitée. Faire appel à un professionnel.

Quel volume injecter ?

Le volume de gravier à injecter correspond au volume de l'espace annulaire affecté d'un coefficient de sécurité qui tient compte de l'incertitude sur le diamètre (liée au caving ou à la présence de cavités).

$$Vm_{filtrant} = \frac{H}{2} * (dtrou^2 - dtubage^2) * Cs$$



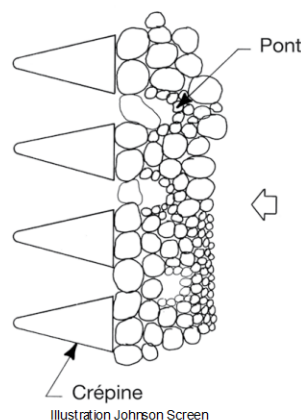
Avec :
 H : hauteur de crépine (en m)
 dtrou : diamètre du forage (en pouce)
 dtubage : diamètre de crépine (en pouce)
 Cs : Coefficient de sécurité pondérateur fonction de :
 ? L'aléa géologique (perte)
 ? La hauteur de sécurité au dessus de la crépine

Points de vigilance

? Garder une réserve de sécurité au-dessus de la crépine pour anticiper un tassement éventuel du massif qui mettrait à nu le sommet de la crépine.

? Utiliser un massif filtrant homogène (coefficient d'uniformité < 2.5) pour éviter la ségrégation des grains lors de la mise en place, principalement en gravitaire.

? Effet de pont, pendant la mise en place, il arrive que les grains du massif filtrant viennent s'appuyer sur la paroi du forage et sur la crépine. Les ponts sont imprévisibles mais bien moins présents en injection en circulation continue. Il y a la possibilité de détruire les ponts pendant la phase de développement.



Mise en place du massif filtrant

Règle de base

Pour jouer son rôle de filtre, l'épaisseur minimale de l'espace annulaire doit être comprise entre 2 et 3 pouces (50 à 75 mm) au rayon.

Forage peu profond : La mise en place du massif filtrant se fait par gravité. Deux types de méthodes existent :

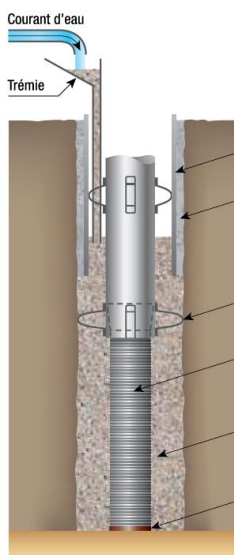


Illustration Johnson Screen

Les ponts se créent facilement.

Par circulation inverse avec un flux continu à l'aide d'une pompe. Le gravier est injecté depuis la surface accompagné d'un flux d'injection, tandis qu'un courant s'établit de l'extérieur vers l'intérieur de la crépine.

Cette méthode est adaptée aux forages Rotary pour lesquels la boue de forage peut-être mise aisément en circulation inverse. La disposition des grains du gravier autour de la crépine est facilitée mais le suivi du niveau est indispensable pour prévenir la formation de ponts.

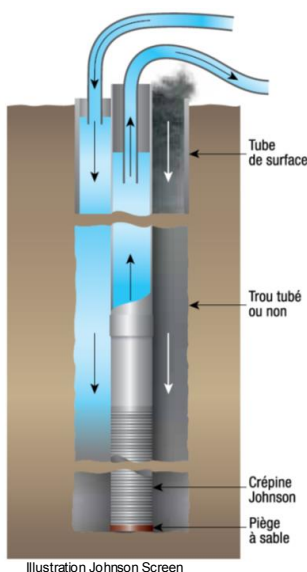


Illustration Johnson Screen

Forage profond : La mise en place du massif filtrant se fait sous pression en circuit continu, en surface l'espace annulaire est fermé hermétiquement.

Le massif filtrant est mis avec de la boue en suspension puis injecté suivant deux méthodes :

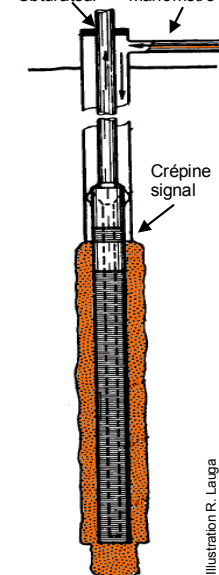


Illustration R. Lauga

Par circulation inverse avec injection sous pression du massif filtrant. Le remplissage se fait de bas en haut tout le long de la crépine.

A l'inverse de la méthode par gravité, la tête de forage est fermée hermétiquement à l'aide d'un presse étoupe ou d'un obturateur et le massif filtrant est propulsé par une pompe.

La pression dans le forage augmente au fur et à mesure de la mise en place du massif filtrant. La crépine-signal située quelques mètres au-dessus de la crépine captante va permettre d'évacuer la pression et de sécuriser le tubage (risque d'écrasement). La position du massif filtrant peut être suivie à l'aide d'un manomètre ou d'un enregistreur de pression, pour définir l'arrêt de l'injection.

La méthode Cross Over utilise un distributeur situé au dessus de la zone à gravillonner. Le gravier est injecté par les tiges jusqu'au distributeur qui permet le positionnement autour de la crépine. Ce dispositif ne nécessite pas que le forage soit en boue. Un packer et un pompage peuvent être mis en œuvre pour injecter le gravier sous pression, à condition de disposer une crépine-signal ayant le même rôle que dans la méthode précédente.



Illustration Johnson Screen

Références :

Norme AFNOR NF X10-999. Avril 2007. Réalisation, suivi et abandon d'ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages.
Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11/9/2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau : sondage, forage, puits, ouvrage souterrain non domestique.
Mise en œuvre du massif filtrant, 2011, rapport technique, Johnson screen
Lauga, R (1990). Pratique du forage d'eau. Edition Seesam.

Annexe 8 : l'importance de la cimentation



Importance de la cimentation

La cimentation est une étape primordiale du forage puisque c'est par le biais de cette méthode que la ressource naturelle est protégée. En effet, la cimentation permet d'isoler les nappes mais aussi d'ancrer et de confiner le tubage dans les terrains.

Pourquoi cimenter l'espace annulaire d'un forage ?

Il s'agit d'une obligation qui remplit plusieurs objectifs :

- ☑ Eviter la pollution de la ressource captée par :
 - les eaux de surface (ruissellement, pluie),
 - des nappes superposées.
- ☑ Colmater les zones de cavités ou de fissures qui provoquent des pertes de fluides de forage non désirées.
- ☑ Fixer la colonne de tubage au terrain,
- ☑ Protéger la colonne de tubage contre la corrosion du terrain.

Choix du ciment

Le ciment se choisit en fonction :

- De la nature des terrains,
- De la température moyenne du terrain,
- De la vitesse de prise du ciment,
- De la résistance du ciment à l'écrasement après prise.

Pour les forages d'eau, la plupart du temps, le ciment Portland ordinaire est utilisé. Il est déconseillé d'utiliser du ciment à prise rapide qui pourrait venir obstruer des parties hautes de l'ouvrage sans forcément atteindre la profondeur voulue. Il s'agit uniquement d'un mélange eau/ciment (coulis).

Volume d'injection et caractéristiques techniques

Le volume d'injection dans l'espace annulaire se calcule avec la formule suivante :

$$V_{\text{ciment}} = \frac{H}{2} \times (d_{\text{trou}}^2 - d_{\text{tubage}}^2)$$

L'injection sous pression est obligatoire depuis l'arrêté du 11 septembre 2003.

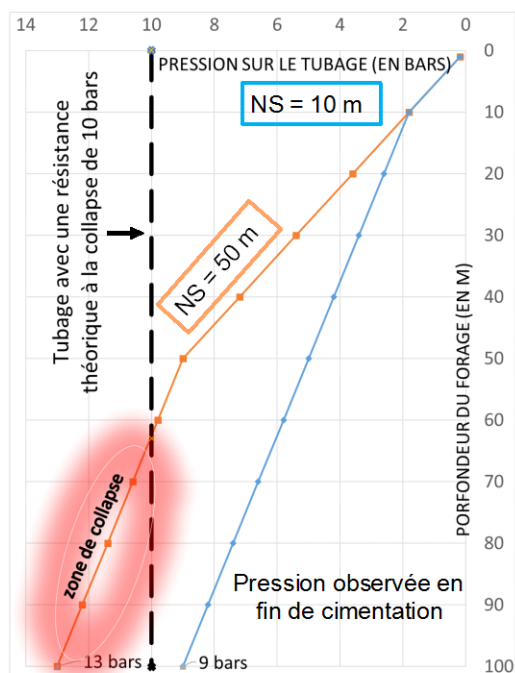
Le ciment doit avoir une densité proche de 1.8 obtenue avec un mélange 1/3 eau et 2/3 de ciment. Cela correspond à mélanger deux sacs de ciment de 25kg, avec 25L d'eau pour obtenir 40L de laitier à densité 1.8.

L'approvisionnement du ciment doit se faire en continu sur le chantier.

Recommandation lors de l'injection

Il est nécessaire de prendre en compte la pression exercée pendant l'injection du ciment sur le tubage. Pour une densité de 1.8 de coulis, à une profondeur de 100m, la pression relative appliquée à l'extérieur du tubage par le ciment est de l'ordre de 18 bars. Afin de compenser cette pression, l'intérieur du tubage peut-être mis en eau ou en boue pendant l'opération de cimentation.

L'exemple ci-dessous montre qu'en fin de cimentation avec une hauteur d'eau à l'intérieur du tubage de 90m (niveau statique (NS) = 10m), le gradient de pression exercé sur le tubage est plus faible que pour une hauteur d'eau de 50m (niveau statique = 50m). A travers cet exemple, à la fin de la cimentation, le tubage de résistance théorique à l'écrasement de 10 bars risque de s'effondrer aux alentours de 60m profondeur pour le cas d'une colonne d'eau de 50m.



Afin d'éviter le collapse du tubage, plusieurs passes de cimentation avec un temps de séchage peuvent être envisagées, si la méthode d'injection le permet.

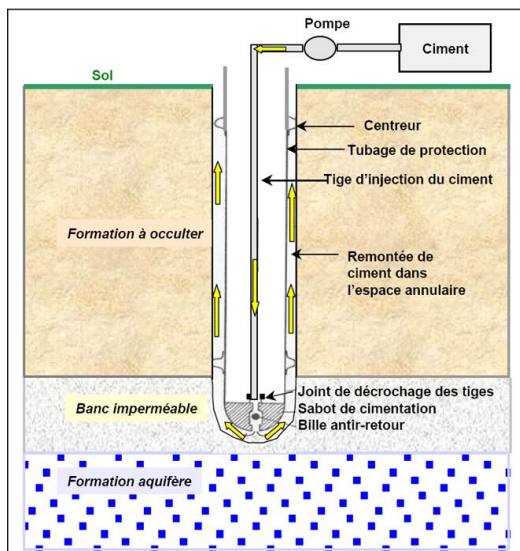
Si la cimentation a lieu sur un tubage PVC, il est prudent d'appliquer un coefficient de réduction sur la résistance à l'écrasement du tubage au regard des réactions exothermiques du ciment qui fragilisent le tubage PVC (classiquement 0.75).

Importance de la cimentation

Méthodes de cimentation

La cimentation doit se faire dans un espace annulaire d'au moins deux pouces, dans un trou libre et dégagé.

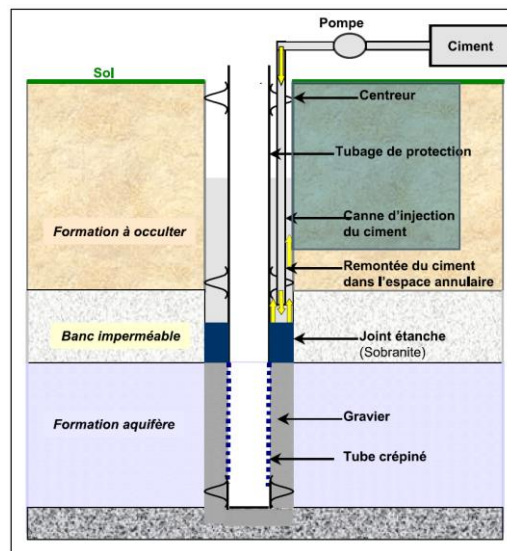
Cimentation par les tiges ou méthode *Float shoe*



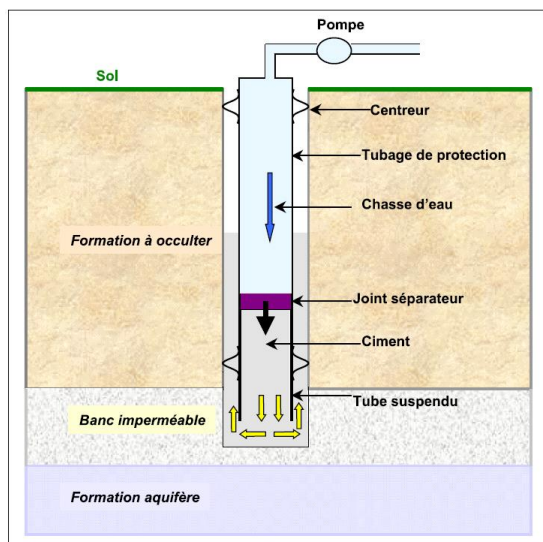
Source : Guide d'application : relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau (2003)

Cette méthode de cimentation est équipée d'un sabot spécial destructible et muni d'une bille anti-retour qui empêche la remontée du coulis dans le train de tige. La cimentation est finie quand le coulis atteint la surface de l'espace annulaire. Ensuite, l'opération de forage peut reprendre et le sabot est détruit.

Cimentation par canne dans l'espace annulaire



Cette méthode ne peut être utilisée que pour les forages peu profonds. La cimentation par canne dans l'espace annulaire est la seule solution viable par l'extérieur du tubage. A l'aide d'une pompe, le coulis est injecté sous pression à travers les cannes qui sont préalablement mises en pied du forage. Les cannes sont remontées progressivement selon l'avancée de la cimentation.



Source : Guide d'application : relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau (2003)

Cimentation par l'intérieur du tubage

Pour cette méthode, il existe plusieurs variantes, se basant sur le même principe, qui consiste à pousser le ciment (préalablement introduit à l'intérieur du tubage plein) à l'aide d'une chasse d'eau.

Utilisation d'un sabot de cimentation : le sabot permet de séparer la boue du forage et le ciment. Le sabot destructibles est ensuite foré

Références :

Norme AFNOR NF X10-999. Aout 2014. Forage d'eau et de géothermie Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages
Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11/9/2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau : sondage, forage, puits, ouvrage souterrain non domestique.

Annexe 9 : L'effet de l'augmentation de la température sur un tubage PVC.
(Mehmert, 2007).

Température du liquide à l'intérieur ou à l'extérieur du tubage PVC		Pourcentage maximal de la résistance d'un tubage pvc en fonction de la température
°F	°C	
73.4	23	100%
80	27	88%
90	32	75%
100	38	62%
110	43	50%
120	49	40%
130	54	30%
140	60	22%

Annexe 10: Le vieillissement d'un forage



Le vieillissement d'un forage

Un forage a pour vocation d'avoir une pérennité de l'ordre de 30 à 50 ans. Un ouvrage confectionné dans les règles de l'art peut être opérationnel plusieurs décennies. Cependant le phénomène de vieillissement est inévitable et s'accompagne de deux phénomènes majeurs : le colmatage et la corrosion.

Symptômes de dépérissement d'un forage

- ☒ Diminution du débit spécifique (débit/rabattement)
- ☒ Venue de sable
- ☒ Remontée de dépôt

Ce sont les principaux symptômes qui indiquent que le forage est en cours de dépérissement. Les deux phénomènes qui causent cette dégradation sur l'ouvrage sont le colmatage et la corrosion.

Cause du vieillissement d'un forage

Le colmatage, l'obstruction et l'incrustation

Le colmatage peut être dû à de l'obstruction dite mécanique, à l'incrustation chimique ou encore au résultat d'un fort développement bactérien.

Le colmatage mécanique peut aboutir à l'ensablement de l'ouvrage. Effectivement, un mauvais dimensionnement des crépines ou une vitesse d'entrée d'eau dans celles-ci provoquent la migration continue du terrain avoisinant le forage. L'autre cas est la présence de particules fines au sein de l'aquifère qui vont venir colmater au fur et mesure des années le massif filtrant.

Le colmatage chimique concerne la transformation de sels solubles tels que les carbonates, les composés ferreux, ferriques ou manganés. Le dégagement de CO₂ ou l'apport d'O₂ peuvent

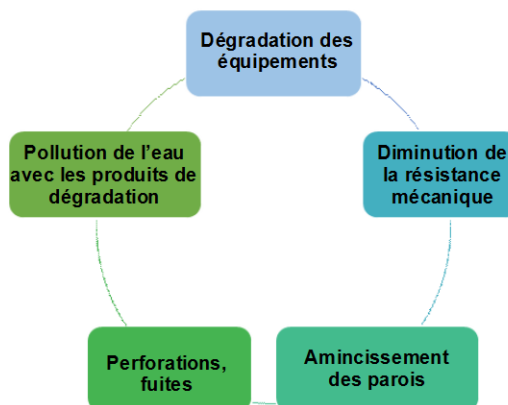


Dépôts fer/carbonate. BRGM (A. Gutierrez)

déclencher ces incrustations.

Les effets et les causes de la corrosion

La corrosion se produit uniquement sur de l'équipement métallique. Les effets sur l'équipement se font sur le long terme et dépendent de la qualité de l'équipement.



Les effets de la corrosion, Johnson Screens, (2009)

Les causes de corrosions existent sous différentes formes.

La corrosion électrochimique, lorsque les eaux de l'aquifère ont des caractéristiques particulières (eaux conductrices) et qu'il y a deux potentiels électriques différents ou deux métaux de nature différente. Si ces deux métaux sont en contact direct, le métal le moins noble deviendra anode et sera sujet à corrosion. Au contraire, les métaux nobles deviendront cathode et ne subiront aucune attaque. Afin d'isoler deux métaux, il est fortement conseillé d'utiliser un raccord diélectrique.

La corrosion par piqure, concerne les métaux passivés. Il s'agit de corrosions très locales qui peuvent affecter toute l'épaisseur du tube. Ce phénomène se produit dans des eaux agressives (chlore, brome, fluor) où le film protecteur va s'effriter en quelques points et permettre la corrosion. En général, tout accroc, soudure, raccord sur un tubage est susceptible de faciliter la corrosion.

Le développement bactérien : colmatage et corrosion

Le développement des bactéries concerne le plus souvent les bactéries ferrugineuses. Pour se développer, elles rongent les surfaces métalliques et sécrètent une boue visqueuse (brunâtre) dans laquelle elles se multiplient. Le phénomène provoque du colmatage et des incrustations mais aussi la dégradation du métal qui est corrodé.



Le vieillissement d'un forage

Mesures préventives et remédiations

Les mesures de préventions et de remédiations suivantes sont non exhaustives et doivent être adaptées à chaque situation.

Afin d'éviter toute **incrustation ou colmatage**, il est nécessaire de :

- ☑ prévoir un équipement adapté à la nature chimique de l'aquifère,
- ☑ limiter l'oxygénation du milieu, en réduisant le rabattement du forage et en ne dénoyant pas les crépines,
- ☑ effectuer un développement efficace en évacuant le maximum de particules fines et si le forage est réalisé à la boue en éliminant le *cake* qui se trouve sur les parois du forage,
- ☑ procéder à des contrôles réguliers de l'état de la pompe et de l'équipement du forage.

En cas d'incrustation ou de colmatage avérés, l'utilisation d'une action mécanique et/ou chimique est recommandée. En règle générale :

- les acides sont plus ou moins efficaces selon le type dépôt,

Acides	Phospho-rique	Sulfamique	Chlorhy-drique	Acétique	Citrique
Dépôts					
Dépôt carbonaté	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Mauvaise à moyenne	Mauvaise
Dépôt de sulfate	Bonne à mauvaise	Bonne	Bonne à mauvaise	Très faible	Très faible
Oxydes Fe/Mn	Bonne	Moyenne	Très bonne	Bonne	Chélation
Biofilm	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Relativement bonne	Mauvaise

- les polyphosphates permettent de défloculer les particules argileuses,
- l'action mécanique par le brossage ou le *jetting* permet de nettoyer l'équipement des dépôts ferreux et manganés.

Pour éviter toute **prolifération bactérienne**, il convient lors de la phase de forage et de mise en place de l'équipement de désinfecter tout objet qui rentre dans l'ouvrage :

- ☑ outil de forage,
- ☑ tige,
- ☑ crépine,
- ☑ tubage plein,
- ☑ massif filtrant.

En cas de prolifération bactérienne au sein

du forage, un traitement au chlore peut permettre de désinfecter l'ouvrage. Une action mécanique telle que le brossage en complément de l'injection du chlore permet une action complète mais les opérations de décolmatage peuvent être longues.



Dépôt bactérien (colmatage et corrosion) Johnson Screens, (2009)

Pour prévenir de la **corrosion**, il convient d'anticiper sur :

- ☑ la nature des tubages. Effectivement, l'équipement tubage/crépine doit avoir la même nature, à défaut, les différents éléments doivent être isolés,
- ☑ la nature des eaux de l'aquifère. Si les eaux sont agressives un tubage inox est alors primordial pour la pérennité de l'ouvrage.

Une fois le tubage corrodé par une quelconque cause (galvanique, piqure, bactérienne), les actions envisagées dépendent du degré de dégradation du tubage.

Si l'état de l'équipement semble correct, il peut alors être envisagé une régénération chimique et/ou mécanique. A l'inverse, si la stabilité et l'étanchéité de l'ouvrage semblent compromises, il est préférable de modifier la structure du forage soit en :

- ☑ rechemisant l'ouvrage en un diamètre plus petit,
- ☑ retirant l'équipement en place et le remplacer,
- ☑ abandonnant l'ouvrage dans les règles de l'art.

Références :
Norme AFNOR NF X10-999. Avril 2007. Forage d'eau et de géothermie Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages
SCHNIEDERS, J. W. Production Water-Well Design. In : STERRETT, R. J. (2007). Groundwater & Wells. Johnson Screens, third edition.
BART, S. (2009). Les formes de corrosion en forage d'eau. Johnson Screens

Annexe 11 : les méthodes de repêchage



L'instrumentation - repêchage

L'instrumentation dans un forage désigne l'ensemble des opérations dont le but est de repêcher un objet ou de décoincer un outil, une partie du train de tige ou encore une colonne de tubage. Ces opérations, aussi délicates que périlleuses, doivent être parfaitement réfléchies et dans certaines situations, la décision d'abandon du forage sera inévitable.

Quand parle-t-on d'instrumentation ?

L'instrumentation intervient sur un forage qui est en péril lorsqu'un objet est coincé ou tombé dans le forage. L'instrumentation désigne l'ensemble des moyens mis en œuvre pour repêcher le « poisson » dans le forage.

Quelle sont les causes de ces incidents ?

Les principaux incidents sont dus :

- ◇ au blocage ou au coincement de l'outil,
- ◇ aux fausses manœuvres,
- ◇ à la rupture d'un câble de levage,
- ◇ à un déboîtement de colonne de tubage,
- ◇ à un écrasement de la colonne de tubage,
- ◇ à la chute fortuite d'un objet ou de la colonne de tubage.

Leur cause peut provenir d'une usure excessive du train de tige ou de la colonne de tubage, d'un outil de forage en mauvaise état ou mal approprié ou encore des paramètres de forage incorrectement suivis. Tous ces incidents entraînent l'arrêt temporaire du forage et une décision rapide doit être prise pour la suite des opérations : le repêchage.

Les méthodes de repêchage

L'instrumentation sur le train de tiges et l'outil intervient à la suite d'une avarie pendant l'étape de forage. Avant de tenter un repêchage suite au coincement de l'outil ou du train de tige, il convient de tenter de dégager au maximum le trou du forage. Pour se faire, l'opérateur peut essayer :

- de dégager le train de tige par force de traction d'une coulisse ou encore de vérin,
- de dégager une partie du train de tige en dévissant la partie supérieure qui ne semble pas bloquée,
- de sectionner le train de tige si le dévissage ne donne pas de résultats,
- de surforer à l'aide d'un tube de diamètre supérieur au train de tige dont la base est coupée en dents de scie.

Ces différentes étapes préliminaires permettent de dégager la tête du poisson et d'extraire un maximum de débris qui pourraient gêner pendant la phase de repêchage.

La liste suivante d'outils permet de faire face aux situations les plus complexes en fonction de la méthode de forage choisie :

En cas de forage avec la méthode de battage (utilisation d'un câble), les outils de repêchage sont les suivants :

- ⇒ le harpon,
- ⇒ le coupe câble,
- ⇒ le mouton.

En cas de forage avec un train de tige de forage, les outils de repêchage les plus courants sont les suivants :

- ⇒ l'*overshot*,
- ⇒ la cloche et le taraud,
- ⇒ la fraise,
- ⇒ la tringle de dégagement,
- ⇒ le crochet.

L'instrumentation sur des outils légers est souvent le résultat d'une chute fortuite provoquée par le facteur humain.

Les outils suivants peuvent permettre le repêchage de l'outil, de boulons ou encore de morceaux d'outils de forage :

- ⇒ l'araignée,
- ⇒ le panier à sédiments,
- ⇒ l'aimant.

L'instrumentation sur la colonne de tubage, comme pour l'instrumentation sur le train de tiges, nécessite prudence et calme lors de la réalisation du repêchage. Les outils qui permettent de repêcher une colonne de tubage sont les suivants :

- ⇒ le coupe-tubes,
- ⇒ le joint de sable,
- ⇒ la poire,
- ⇒ l'*overshot*,
- ⇒ la cloche et le taraud.

Recommandations générales

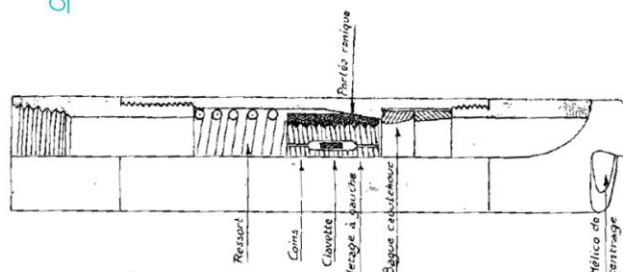
L'opérateur doit garder à l'esprit les quelques recommandations suivantes en cas d'avarie :

- ☑ **maintenir ou rétablir la circulation de boue dans le forage,**
- ☑ **connaître exactement la position et l'aspect de la tête du poisson,**
- ☑ **avoir un trou de forage dégagé (jeu radial suffisant) et droit,**
- ☑ **prendre en compte la faisabilité du repêchage (financier et technique).**

L'instrumentation - repêchage

Ces outils permettent principalement de repêcher les trains de tiges ou la colonne de tubage. La cloche, par rotation, taille un filet à l'extérieur du « poisson » tandis que le taraud façonne un filet à l'intérieur du « poisson ».

Cloche



Overshot ou cloche à coins

L'overshot est l'outil de repêchage le plus couramment employé pour la récupération de train de tige. Il est composé d'un sabot de forme hélicoïdale permettant de récupérer plus facilement la tête du « poisson ». Quand l'outil est parfaitement en place dans l'overshot, une simple traction actionne un ressort qui vient resserrer les mâchoires sur la tête du poisson. La remontée de celui-ci peut commencer.

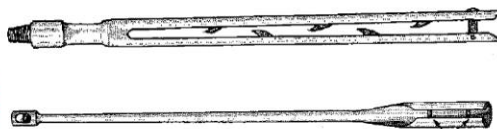
Guidances pour un forage durable



BRGM — Service D3E, 3 avenue C. Guillemin, BP 36009 45060 ORLEANS Cedex

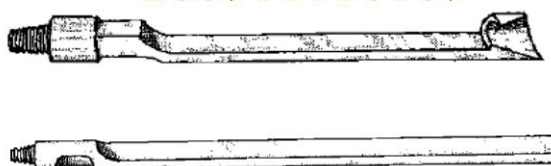
Mouton

Le mouton et le harpon sont deux instruments utilisés pour le repêchage d'outils de forage. Ils nécessitent l'utilisation d'un câble (battage). Le mouton permet de frapper l'outil tandis que le harpon sert au repêchage du câble.



Harpon

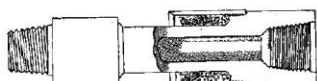
Le crochets et la tringle de dégagement sont des outils qui permettent de passer sous un épaulement pour exercer un rétrobattage sur un outil et de redresser un outil qui serait coincé contre la paroi du forage.



Crochet

Tringle de dégagement

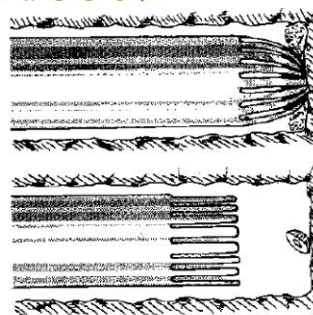
Panier à sédiments



Aimant

Ces trois outils sont généralement utilisés pour repêcher des outils ou des morceaux d'outils de forage ou encore des boulons. Le panier à sédiments permet, par circulation du fluide, de récupérer tout objet de faible taille se trouvant au fond du forage. L'aimant (de 10 pouces) peut soulever, dans des conditions idéales, un objet métallique de l'ordre de 900 à 1000 kg. Cependant, le poisson ne doit pas être calé ou coincé. Enfin, l'araignée, formée de plusieurs doigts dans son extrémité, permet par son propre poids de se refermer et de remonter des objets de petites tailles.

Araignée



Références :
Lauga, R (1990), Pratique du forage d'eau. Edition Seesam.
MABILLLOT, A. (2005), Le Forage d'Eau. Guide pratique. Johnson Filtration Systems, Naintré.

Annexe 12 : milieu naturel particulier et les impact potentiels.
(Bézèlques-Courtade & Durst, 2012).

Milieu	Impacts potentiels	Possibilités de prévention/remédiation
Aquifères superposés	Mise en communication de différents aquifères	Isolement par cimentation, captage d'un seul aquifère par forage
Zone de perte (Karsts, milieux fissurés)	Perte de fluide de forage → arrêt de la foration Cimentation impossible → défaut d'isolement	Adaptation de la cimentation (nature de ciment et technique de cimentation) Isolement de la zone de perte : packer, tubage technique permanent.
Roche non consolidée	Non-tenue du trou de forage → arrêt de la foration	Technique de maintien des parois : fluide de forage ou tubage à l'avancement
Artésianisme	Mise en communication de différents aquifères Rejets non maîtrisés en surface	Tête de puits adaptée pendant la foration Adaptation de la technique de foration pour contenir l'artésianisme (densité de boues, vanne, pompage dans forage périphérique,...) Adaptation de la technique de cimentation (packers, chaussette géotextile)
Formations salifères, anhydres ou gypsifères	Mouvement de sol (gonflement, affaissement). Déstabilisation du bâti environnant	Isolement par cimentation Fluide de foration adapté
Argile gonflante	Mouvement de sol (gonflement,...). Déstabilisation du bâti environnant	Isolement par cimentation Fluide de foration adapté (agent anti-gonflement)
Mouvements de terrain	Risque d'arrachement des installations	
Sols pollués	Infiltration des polluants vers les aquifères	Isolement par cimentation (éviter l'infiltration)
Gaz	Risque de fuite de gaz en surface	Connaissance des zones à risque
Zones inondables	Risque d'infiltration des eaux de surfaces vers les aquifères	Tête de puits étanche, ou au-dessus des plus hautes eaux connues
Sous-sol riche en sulfate, Eau acide	Dégradation des ciments → défaut d'isolation	Ciment spéciaux
Environnement marin, Présence de H₂S, Zone de battement de la nappe	Corrosion des tubages → défaut d'isolation	Acier et ciment adapté

Annexe 13 : Risque à l'installation du chantier. (*Bézèlques-Courtade & Durst, 2012*).

Risques chantier	Impacts potentiels	Possibilités de prévention/remédiation
Présence de réseaux souterrains	Rupture de canalisation → pollution du sol, du sous-sol, des aquifères, du réseau hydrographique Sécurité du chantier engagée	Demandes de renseignement (DR) et Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT) par le maître d'ouvrage ou l'entreprise de forage
Stockage et transferts de produits polluants (hydrocarbures, déblais de forages, fluides de forage, divers additifs de foration)	Fuites → pollution du sol, du sous-sol, des aquifères, du réseau hydrographique	Dispositifs de stockage isolés Dispositifs de protection du forage (bâche sous machines, bacs de récupération sous les compresseurs, ...) et de collecte d'éventuelles fuites Évacuation et traitement des déblais, des fluides de forage, de l'eau (de foration et des tests hydrauliques) et additifs
Circulation de véhicules	Impact paysager	Remise en état du site
Rupture d'approvisionnement en matériau en cours de réalisation du forage	Mal façon du forage (modification de la nature de l'équipement, cimentation incomplète, ...) → infiltrations depuis la surface, échanges entre aquifères, instabilités géologiques	Surplus d'équipements Unités de fabrication des fluides et ciments sur site

Annexe 14 : Installation et choix du tubage. (*Bézèlques-Courtade & Durst, 2012*).

Causes	Impacts potentiels	Possibilités de prévention/remédiation
Matériau inapproprié au milieu	Corrosion → percement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique, concentration en métaux dans l'eau souterraine à proximité du forage (contamination possible de forage voisins)	Adaptation des matériaux au milieu
Assemblage inapproprié de matériaux	Corrosion → percement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique, concentration en métaux dans l'eau souterraine à proximité du forage (contamination possible de forage voisins)	
Dégradation des propriétés de résistance mécaniques dans certains contextes (températures élevées, rayures)	Percement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique, concentration en métaux dans l'eau souterraine à proximité du forage (contamination possible de forage voisins)	
Fragilité potentielles au niveau des points d'assemblage (collage, soudage, vissage)	Percement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique, concentration en métaux dans l'eau souterraine à proximité du forage (contamination possible de forage voisins)	

Annexe 15 : Risque lié à la cimentation d'un forage. (*Bézèlques-Courtade & Durst, 2012*).

Causes	Conséquences	Impacts potentiels	Possibilités de prévention/remédiation
Conditions de milieu particulières non anticipées (artésianisme, milieu fissuré, karst, sulfates, CO₂, formations gonflantes,...	Difficultés techniques pour la cimentation	Défaut de mise en place (cavités, fissures, discontinuité de la cimentation, vides entre tubage et ciment et/ou entre ciment et sous-sol) → défaut d'isolement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique	Remédiation difficile, mais prévention possible (connaissance du milieu)
	Qualité de ciment non adaptée au milieu	Dégradation du ciment (porosité augmentée, écrasement) → défaut d'isolement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique	Remédiation difficile, mais prévention possible (connaissance du milieu)
Non-respect des préconisations techniques, techniques non maîtrisées, matériel inapproprié	Défaut de mise en place	Défaut d'isolement (cavités, fissures, discontinuité de la cimentation, vides entre tubage et ciment et/ou entre ciment et sous-sol) → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique	Remédiation difficile, mais prévention possible (sensibilisation, formation de la filière)
	Réaction exothermique de prise du ciment	Dégradation de l'équipement PVC du forage d'eau (écrasement)	Remédiation difficile, mais prévention possible (utilisation de ciments adaptés)

Annexe 16 : Note technique : coût moyen d'un forage d'eau en France

Introduction

Ce travail a été élaboré sous l'encadrement de Mr Alexis Gutierrez (BRGM) en parallèle à l'étude menée sur les difficultés rencontrées pendant la réalisation d'un forage dans le but d'en évaluer l'impact financier. Les données collectées permettant également de donner un aperçu des prix de forage en France, il a été jugé intéressant d'en présenter une courte synthèse. Le travail s'appuie sur une première base de données, créée en 2012, par M^{lle} Sarah Dao, stagiaire de l'université de Poitiers. Malheureusement, il était difficile de mettre en avant à partir de cet outil des tendances extrapolables en raison, notamment, d'un nombre trop faible de points. Après refonte de la base de données, ajout de nouvelles données et actualisation par des devis de travaux de forages compris entre 2012 et 2016 avec l'aide de Mr. Madjid Bouzit, (BRGM), les résultats présentés ci-après ont pu être obtenus.

1. Méthodologie

La méthodologie utilisée pendant cette étude se présente comme suit, avec dans un premier temps une phase de récolte de devis de forage venant de tous horizons :

- Interrogation des directions régionales du BRGM
- Interrogation des hydrogéologues de bureau d'études
- Interrogation des foreurs de toute la France

Cette étape d'enquête a permis d' étoffer la précédente base de données concernant le coût d'un forage. Après dépouille un à un des devis de forages, le dossier est numérisé puis intégré à la base de données sous Excel. Pour des raisons de confidentialité, cette base de données ne peut être diffusée mais les résultats qui ressortent de cette étude sont présentés dans les chapitres suivants.

En ce qui concerne la structure même de la base, le choix fut pris de la décomposer en plusieurs classes (onglets sous Excel) qui correspondent à différentes utilisations d'un forage. Les onglets permettent de faire un pré classement des différents devis. Les forages sont répartis ainsi :

- Les forages destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) : il s'agit principalement de forages destinés aux collectivités. Ils sont équipés pour permettre l'exploitation de la nappe sur le long terme.
- Les forages destinés à une utilisation piézométrique (PZ) : Ces ouvrages de surveillance sont de petit diamètre.
- Les forages destinés à de la recherche en eau (RECO) : Ces ouvrages rassemblent des reconnaissances géologiques (récupération d'échantillons) ainsi que des reconnaissances hydrogéologiques allant jusqu'au pompage d'essais.
- Les forages pour la géothermie (GTH) : Il s'agit d'ouvrages destinés à exploiter la ressource en eau afin d'en tirer un potentiel énergétique.
- Les autres catégories de forages tels que les forages d'irrigations pour des parcelles agricoles (IRR), les forages de reconnaissances avec abandons pour la recherche en eau (RECOABD) et les abandons de forage pour causes de vétusté ou non-conformité (ABD) sont inclus dans la base de données.

Cependant, au vu du faible nombre de devis, il est impossible d'en tirer une quelconque interprétation. A cela, il faut rajouter une autre classe, les forages qui n'ont pas pu être défini (ND), puisque certains devis ne font pas référence à un usage particulier. Ces catégories ne sont pas étudiées dans cette note.

A la date du 31/05/2016, le [tableau 1](#) synthétise le nombre de forages dans chaque catégorie :

Catégorie/onglet	AEP	PZ	RECO	GTH	IRR	ABD	RECOABD	ND	TOTAL
Nb de forages	29	104	36	27	7	9	12	21	245

tableau 1 : nombre de devis intégré à la base de données en fonction de l'usage d'un forage

Ensuite, à l'intérieur de chaque classe, les caractéristiques du forage sont les suivantes :

- Profondeur
- Méthode de foration
- Diamètre représentatif du forage
- Alésage ou télescopage
- Nature du tubage
- Diamètre du tubage
- Nature de la crépine
- Diamètre de la crépine

Cas particulier des forages géothermiques

La base de données incorpore aussi les forages destinés à la géothermie. Les données proviennent uniquement d'une base existante qui concerne la garantie AQUAPAC. Le dispositif de garantie AQUAPAC couvre le risque géologique lié aux opérations de géothermie de très basse énergie sur nappe. Il s'agit du risque d'échec à la découverte d'une ressource en eau souterraine ou à l'insuffisance d'eau pour le fonctionnement d'une installation géothermique. Le BRGM apporte son expertise à l'évaluation des dossiers dont certains contiennent des éléments de coût de forage¹. Sur les 340 dossiers instruits (depuis 1984), seuls 27 forages disposent de données détaillées en termes de coûts. Les informations utilisables sont les suivantes :

- Coût total du forage au mètre linéaire
- Coût de la foration au mètre linéaire en fonction du type de terrain aquifère capté

Description des postes

Le coût d'un forage varie selon divers paramètres tels que la profondeur, le diamètre, la méthode de forage, la nature des équipements tubulaires, etc... Ces postes financiers sont donc détaillés afin d'identifier les plus importants. Au regard des devis consultés, voici les principaux postes d'un devis de forage présenté dans le [tableau 2](#).

¹ Martin J.C., 2015 : **Garantie AQUAPAC : Bilan de l'année 2015. Rapport final**. BRGM/RP-65490-FR

Postes caractéristiques d'un devis de forage	Postes retenus et réorganisés pour la base données	Unité
Amenée et repli du matériel	Amenée et repli du matériel	Forfait
Foration	Foration	Mètre linéaire
Équipement et mise en place	Équipement et mise en place	Mètre linéaire
Massif filtrant et mise en place	Équipement en tête de forage et vérification de l'ouvrage	Forfait
Cimentation de l'espace annulaire	Massif filtrant et mise en place, cimentation de l'espace annulaire et margelle de protection	Forfait, mètre linéaire ou mètre cube
Développement	Développement	Heure ou forfait
Pompage d'essai	Pompage d'essai	Heure ou forfait
Équipement en tête de forage & margelle de protection		
Vérification de l'ouvrage		

tableau 2 : présentation des postes de facturation d'un devis de forage et des postes retenus pour la base de données

Certains postes de facturation des devis de forages sont présents dans la base de données mais inexploitable à l'heure actuelle et n'ont pas pu être étudiés par manque de précision dans les devis :

- L'amenée et le repli du matériel, qui est souvent un forfait, varie selon l'entreprise et la distance par rapport au chantier. Ce poste ne sera pas pris en compte dans cette étude au regard de sa variabilité représenté graphiquement [figure 1](#). L'écart interquartile qui permet de mesurer la dispersion par rapport à la médiane indique une valeur de 5200 euros soit plus du double de la valeur médiane. Cette valeur prouve que ce poste de facturation est sujet à une forte dispersion.

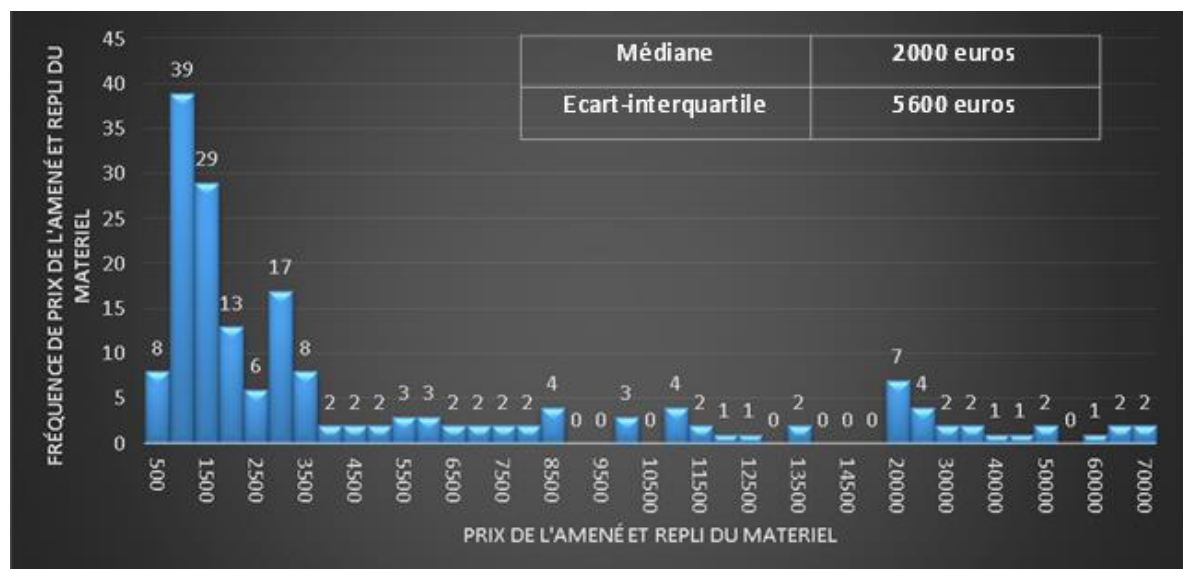


figure 1 : fréquence du prix de l'amené et repli du matériel

Les postes suivants ont pu être analysés et inclus dans l'étude des coûts globaux d'un forage mais n'ont pas pu être individualisés (ramenés à un prix en fonction d'une quantité) :

- Le prix du gravier et du ciment qui dépendent de la méthode d'injection, ne sont presque jamais précisés dans le devis. A cela, il faut ajouter que ce poste est souvent évalué au mètre linéaire alors qu'il s'agit d'un volume (en m³) variable selon les diamètres de forage et d'équipement. .
- Le développement et les pompages d'essais qui sont soit facturés au forfait, soit facturés à l'heure. La base de données ne permet pas pour le moment, de comparer ces postes de facturations.

Actualisation du coût d'un forage

Afin de pouvoir comparer les devis de forages entre eux, il a semblé nécessaire d'actualiser le coût d'un forage en fonction de l'année 2016. Pour cela, un coefficient d'actualisation est appliqué à l'ensemble des résultats obtenus. Avec l'aide de Mr. Madjid Bouzit, (BRGM), il a été possible d'actualiser l'ensemble des devis de forage en utilisant l'Index Travaux Publics - TP04 - Sondages et forages Référence 100 en janvier 1975, Série arrêtée – provenant de l'INSEE². A travers cette série est extrait un coefficient d'inflation du marché qui peut être multiplié directement sur les devis en fonction de l'année Cet index fut lui-même actualisé par un coefficient de raccordement³ permettant son utilisation au 01/01/2016.

2. Résultats

Avant d'aller plus loin, la [figure 2](#) présente le nombre de dossiers consultés en fonction des années de parution des devis (forage d'eau et géothermique).

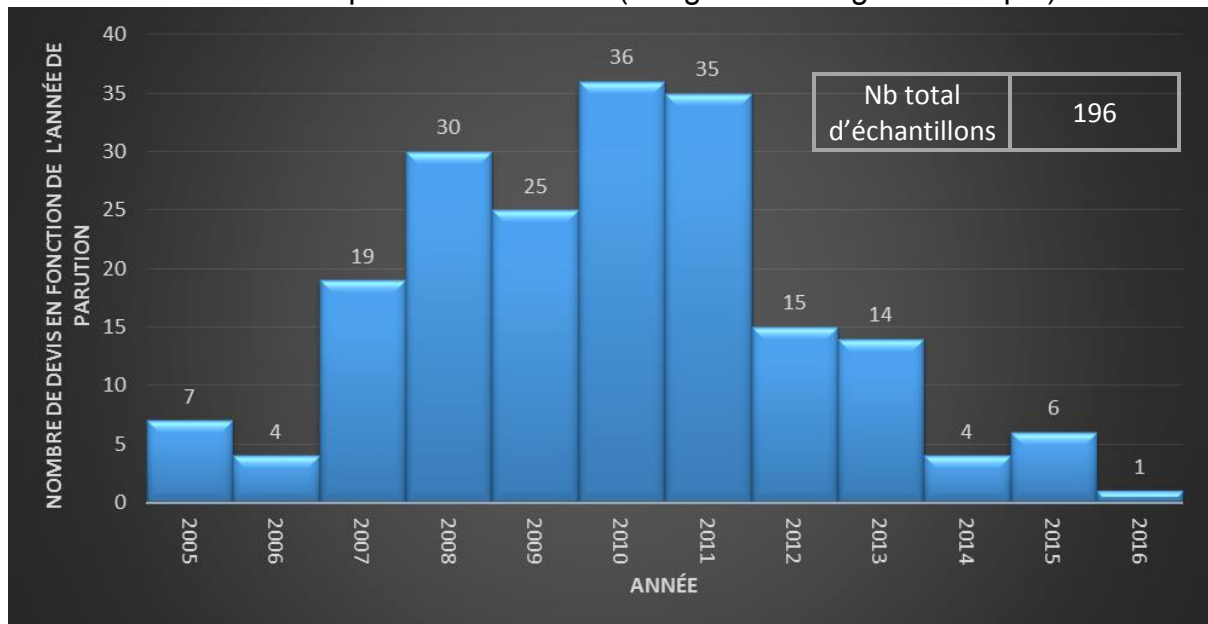


figure 2 : nombre de devis dans la base de données en fonction de l'année de parution

² Institut national de la statistique et des études économiques,

³ Le coefficient de raccordement fait la liaison entre une série arrêtée et une nouvelle série. Le raccordement se fait en multipliant les valeurs de la nouvelle série par le coefficient de raccordement qui est égal à 6.19 dans ce cas.

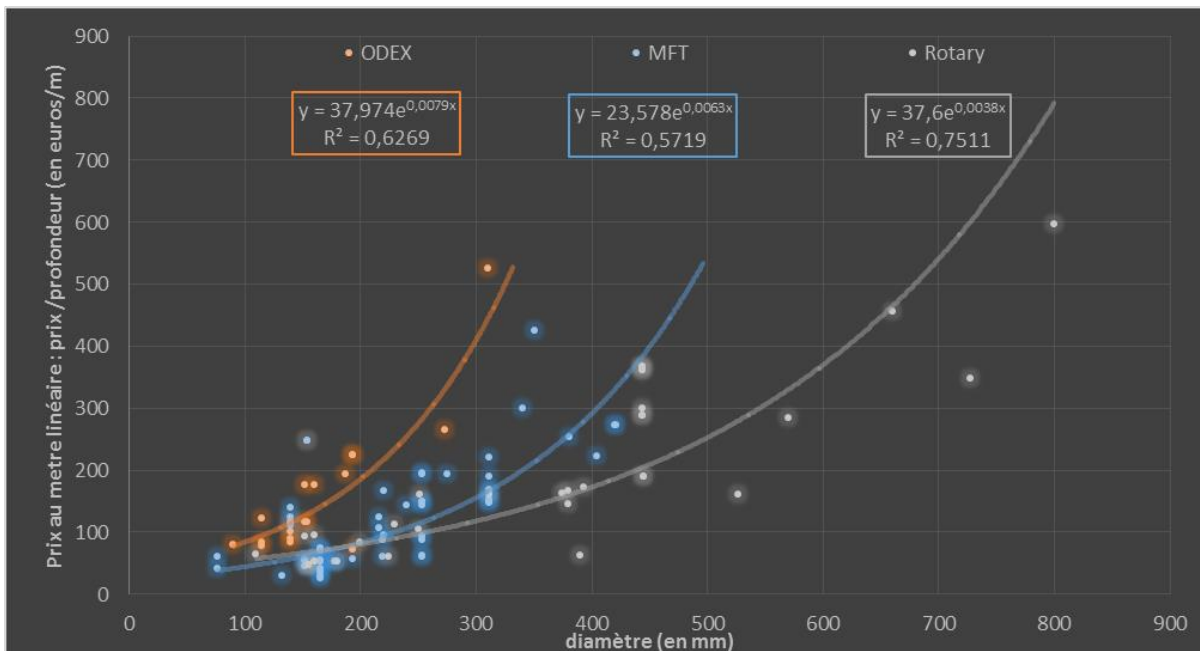
Au total, 196 devis ont pu être utilisés dans cette étude. Cependant, certains devis n'étant pas complets ou suffisamment précis, le nombre de devis réellement utilisé pourra varier selon le poste étudié.

Trois postes sont examinés plus particulièrement car ils permettent d'apporter des éléments concrets de réponses aux questions suivantes :

- **Quelles sont les méthodes de forage les plus économiques ?**
- **Que représente le coût de l'équipement dans un forage ?**
- **Quel est l'ordre de grandeur du prix d'un forage selon son usage et sa profondeur ?**

Coût de la foration

La [figure 3](#) présentée ci-dessous permet d'estimer un prix de forage pour l'exploitation en eau au mètre linéaire en fonction du diamètre et de la méthode souhaitée⁴ (elle-même dépendante des terrains à traverser). Les résultats montrent que pour toutes les méthodes de forage étudiées, la relation diamètre du forage en fonction du prix au mètre linéaire suit un modèle de régression exponentielle du type $y = b \exp^{ax}$. Le coefficient de détermination r^2 permet de juger s'il existe une relation entre les variables comparées. Les méthodes tarière, TAV, battage, carottage, sonique ne disposent pas d'un nombre suffisant de devis pour être représentées comme l'illustre le [tableau 3](#).



[figure 3 : évaluation du coût de l'étape de foration \(euros/ml\) en fonction du diamètre et de la méthode de foration](#)

⁴ Marteau fond de trou (MFT), tubage à l'avancement (ODEX), autres méthodes de tubage à l'avancement (TAV)

Méthode de foration	MFT	ODEX	ROTARY	TARIERE	TAV	Battage	Sonique	Carottage	Non défini
Nb d'échantillons	54	19	34	8	12	4	1	Pas inclus	27

tableau 3 : nombre de devis en fonction de la méthode de foration

Comme mentionné précédemment, le nombre total de devis utilisés ne correspond pas au nombre total de devis inclus dans la base de données. Cela s'explique par le manque d'informations sur la méthode de forage dans différents devis.

Pour les forages destinés à la géothermie, les résultats obtenus avec 27 forages présenté à travers le [tableau 4](#) sont fonctions de la lithologie des aquifères captés lors de la foration. Comme dit dans les chapitres précédents, la base de données exploitée pour les forages géothermique ne fournit pas assez de détails pour une interprétation plus étendue.

Aquifère capté	Calcaire	Craie	Sable
Q3	767	787	739
Q1	548	314	395
Médiane	674	332	599
Min	293	55	269
Max	1359	1140	1376
Écart interquartile	219	473	344

tableau 4 : statistique globale du prix de foration pour un forage géothermique en fonction de l'aquifère exploité

A travers les médianes et l'écart interquartile, une comparaison peut être faite selon le type d'aquifère capté et par conséquent le terrain traversé durant la foration. Le terrain traversé est directement relié à la méthode de foration. Il est observé une variation significative par rapport à la médiane et la dispersion (écart interquartile) entre les aquifères captés calcaire/sableux et les aquifères captés principalement crayeux. Cette variation peut s'expliquer par une méthode de foration différente ou par un biais de l'analyse puisque la dispersion du prix au mètre linéaire de foration dans un terrain crayeux est relativement élevée par rapport à sa médiane.

Coût de l'équipement et de sa mise en place

Le coût de l'équipement (tubage plein et tubage crépiné) sont présentés la [figure 4](#) et [figure 5](#)[Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#) En analysant la relation diamètre de l'équipement, prix au mètre linéaire et la nature de tubage, on obtient alors une relation du type linéaire $y = ax + b$ entre ces variables. Le nombre total d'échantillons utilisés dans cette partie correspond à chaque type et diamètre de tubage relevé dans les devis. Étant donné qu'un ouvrage est souvent composé de plusieurs diamètres de tubage (soutènement, chambre de pompage, chambre de captage), le nombre total d'échantillons est alors augmenté. L'équipement d'un forage géothermique n'a pas pu être analysé par manque de précisions de ce poste de facturation.

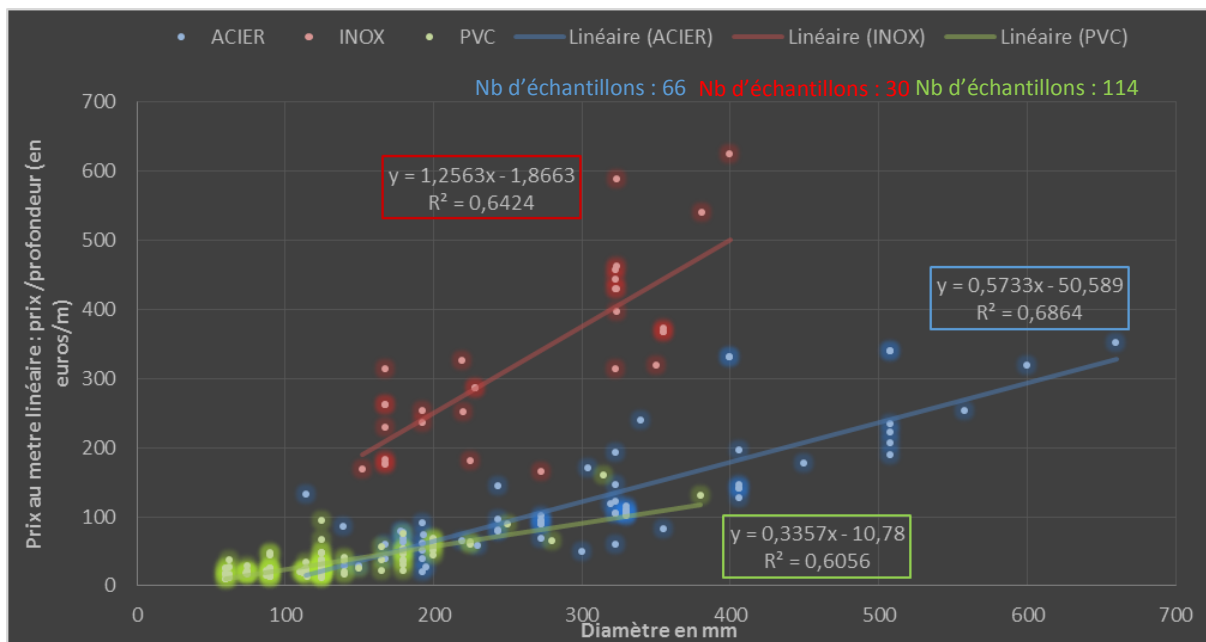


figure 4 : évaluation du coût du tubage plein et de sa mise en place (euros/ml) en fonction du diamètre du tubage et sa nature

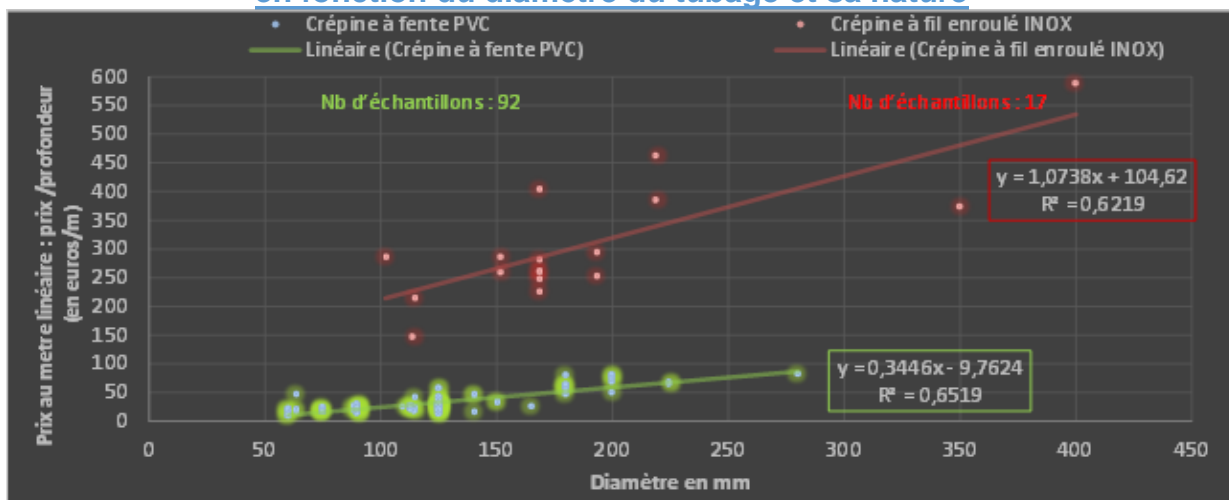


figure 5 : évaluation du coût tubage crépiné et de sa mise en place (euros/ml) en fonction du diamètre de la crépine et sa nature

Coût global d'un forage

Le coût global d'un forage d'eau en France varie selon plusieurs paramètres. Cependant, en isolant les forages selon leur usage⁵, il est possible de dégager des généralités. L'échantillonnage ne permet pas de retenir les usages irrigation et forages industriels, trop peu nombreux dans la base de données. La figure 6 permet d'avoir une notion du coût d'un forage dans son ensemble (sans l'amenée-repli), avec un prix rapporté au mètre linéaire de forage. Les postes de facturation comptabilisés sont le coût de foration, le coût de l'équipement (tubage, massif filtrant et cimentation) et le coût lié au développement ainsi qu'au pompage d'essais.

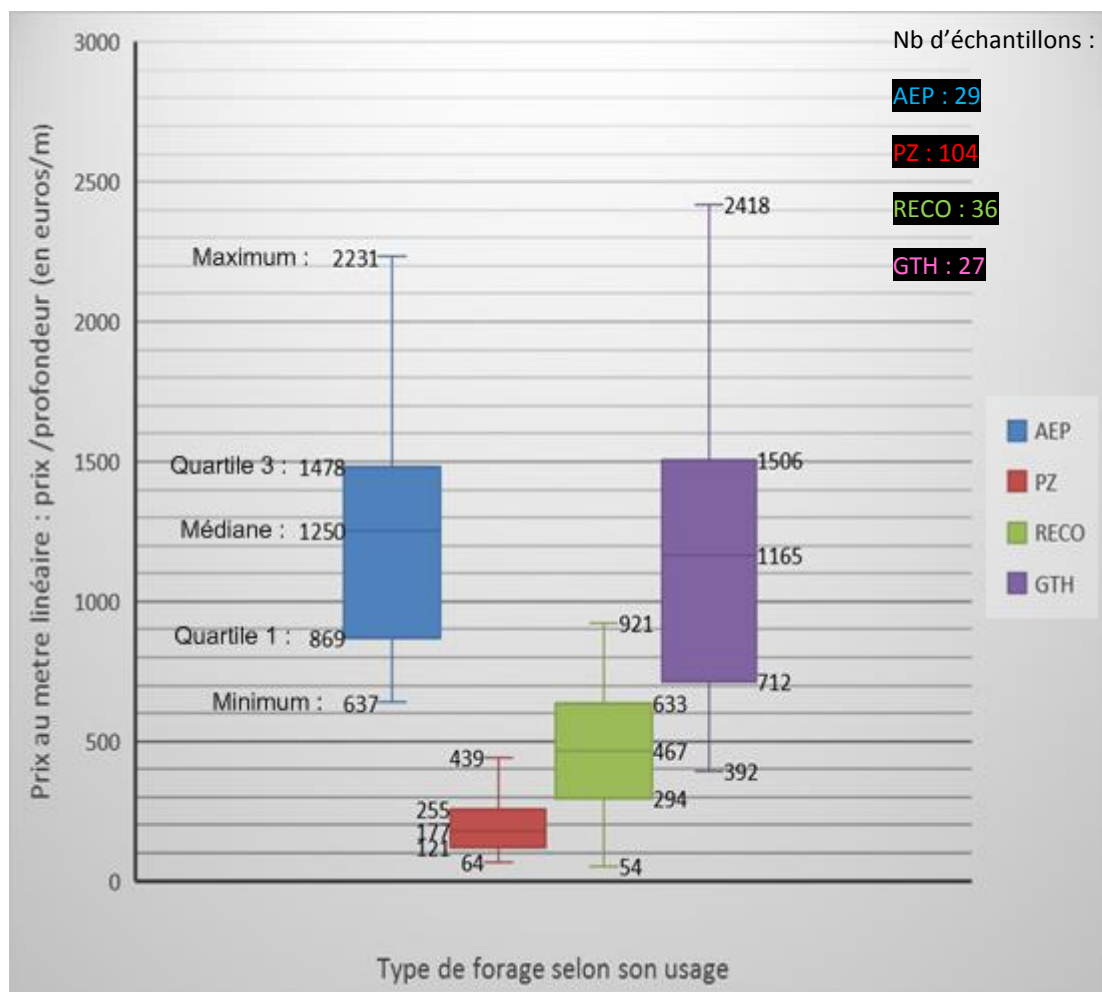


figure 6 : évaluation du coût global d'un forage d'eau et géothermique en France (euros/ml) en fonction de l'utilisation de celui-ci

Conclusion

Cette courte analyse constitue une première exploitation statistique d'une base de données comprenant plus de 190 forages à la date du 31/05/2016. Elle peut paraître succincte au regard des possibilités offertes par le volume de données

⁵ Alimentation en eau potable (AEP), piézomètre (PZ), reconnaissance (RECO), géothermie (GTH)

collectées. Toutefois, l'objectif de ce travail de mise à jour des données du BRGM n'était pas de faire une analyse du marché du forage en France, ce qui constituerait un sujet de stage à part entière, mais simplement de disposer d'éléments permettant de chiffrer un supplément de travaux induit par une difficulté rencontrée en forage. Il est cependant tentant de donner, en guise de conclusion, une estimation grossière du coût du forage en France à partir des médianes de la [figure 6](#). L'avantage de la médiane comme mesure de tendance centrale est qu'elle n'est pas influencée par les valeurs extrêmes. Les ordres de grandeurs des coûts de forage hors « amenée-replis » sont les suivants :

- Pour un forage d'exploitation d'eau potable, 1250 € du mètre de forage.
- Un forage de reconnaissance : 470 € du m
- Pour un forage d'observation (piézomètre) : 180 € du mètre
- Pour un forage de géothermie utilisant la ressource en eau : 1160 € du mètre
- Pas d'estimation pour les forages d'irrigation ou industriels.

La base de données des coûts de forage qui est encore en évolution ambitionne d'observer l'évolution des prix du marché. Cependant, certains postes de facturation des devis de forage sont actuellement inutilisables. Afin d'améliorer cette base de données, le passage sur un autre support du type Access pourrait être plus adapté pour l'utilisation de requêtes spécifiques. Dans le même but, il pourrait être envisagé une collecte annuelle et nationale afin d'étoffer année après année la base de données. Cela permettrait ainsi de garantir la mise à jour de celle-ci.