

Document à accès différé



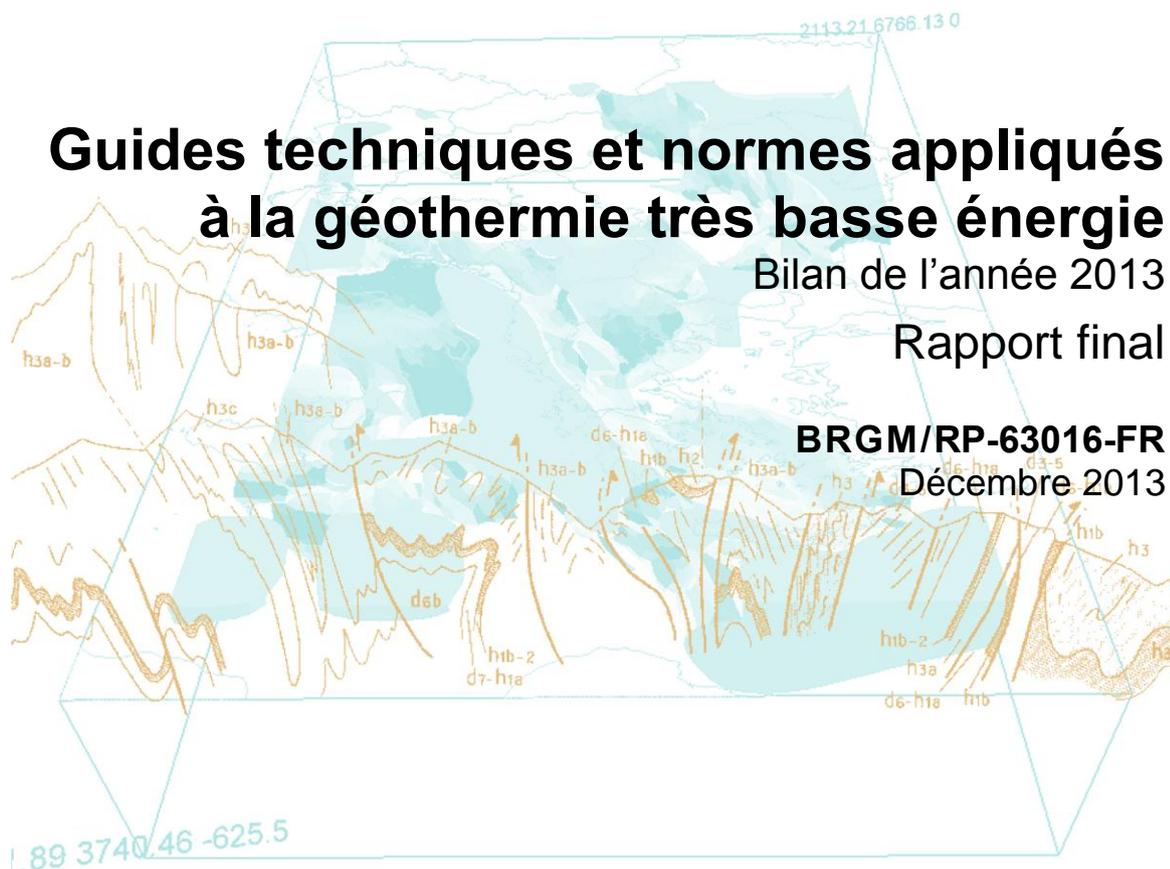
Guides techniques et normes appliqués à la géothermie très basse énergie

Bilan de l'année 2013

Rapport final

BRGM/RP-63016-FR

Décembre 2013



Document à accès différé

Guides techniques et normes appliqués à la géothermie très basse énergie

Bilan de l'année 2013

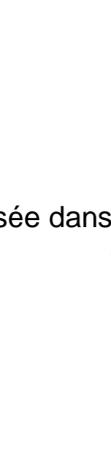
Rapport final

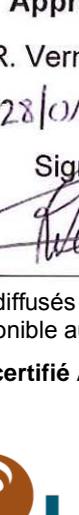
BRGM/ RP-63016-FR

Décembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM
et de la convention ADEME-BRGM 12 05 C0131

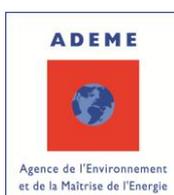
P. Monnot

Vérificateur :
Nom : A. Desplan
Date : 27/01/14
Signature : 

Approbateur :
Nom : R. Vernier
Date : 28/01/14
Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Avertissement

*Ce rapport est adressé en recommandé avec accusé de réception, en communication exclusive au demandeur : **ADEME**, en 1 exemplaire conformément au cahier des charges.*

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire. Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978.

Passé ce délai, ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le BRGM ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : Norme, Guide, Géothermie, Pompe à chaleur, Sonde géothermique verticale, Boucle de sonde, Forage d'eau, Coulis géothermique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

P. Monnot (2013) - Guides techniques et normes appliqués à la géothermie très basse énergie – Bilan de l'année 2013 – Rapport final. BRGM/RP-63016-FR.

Synthèse

La géothermie très basse énergie, c'est-à-dire qui nécessite l'utilisation d'une pompe à chaleur, se découpe en différentes techniques en fonction du type d'échangeurs géothermiques utilisés : en circuit fermé (sondes géothermiques verticales, champ de sondes, corbeilles, capteurs horizontaux, capteurs à détente directe), en circuit ouvert (forages d'eau). Ces solutions techniques sont plus ou moins bien maîtrisées, mais en revanche, pas toujours encadrées par des référentiels techniques (DTU), règles de l'art (guides), normes ou certification. On pouvait encore constater il y a 7 ans qu'un vide normatif existait pour l'ensemble des techniques susmentionnées.

Pour répondre à ce besoin et vu l'ampleur du développement des sondes géothermiques verticales en France, le BRGM a lancé en 2007, en collaboration avec le Syndicat des Foreurs d'Eau et Géothermie (SFEG), une démarche de normalisation sur la mise en œuvre de la sonde géothermique verticale (norme **NF X10-970** homologuée le 30 août 2010 et révisée en janvier 2011). Dans la poursuite de cette action, une démarche visant la normalisation « produit » sur la boucle de sondes géothermiques a été mise en route fin 2009 et homologuée le 27 mars 2013 (**NF X10-960**).

En 2012, ont été lancés, d'une part un groupe de travail sur la révision de la norme **NF X10-999** sur le forage d'eau de géothermie en collaboration avec le SFEG (homologation prévue pour début 2014) et d'autre part un groupe de travail, qui associe de nombreux partenaires (CETE EST/LRPC, IDTE/IFSTTAR, IUT Rennes, HERMES TECHNOLOGIE, IDEMIX, SCHWENK, MCCF / Soletanche-Bachy, SUD-CHEMIE), sur le coulis géothermique de scellement des sondes géothermiques en vue de réaliser un projet de norme (**PR NF X10-950**) sur le coulis géothermique et une homologation visée pour 2016.

L'objectif global de cette action de normalisation est de mieux contraindre la profession en lui donnant des référentiels techniques et juridiques. Les normes sont des documents vivants qui nécessitent une révision permanente.

Pour répondre à cette attente, trois catégories d'actions ont été menées en 2013 :

- boucle de sondes (PR NF X10-960) : finalisation du projet de norme, et homologation (27 mars 2013) ;
- forages d'eau et géothermique (NF X10-999) : révision avec mise à enquête publique le 23 août 2013 (homologation prévue début 2014) ;
- coulis géothermique très basse énergie (PR NF X10-950) : poursuite des travaux avec pour objectif de proposer pour fin 2013 à AFNOR un document sur lequel la commission X10 M pourra s'appuyer pour rédiger la future norme PR NF X10-950.

Les actions qui ont été menées en 2013 dans le cadre des travaux de normalisation témoignent d'une forte mobilisation de la profession et devraient permettre de mieux structurer les différentes filières associées.

Au niveau européen, des travaux sont en cours dans ce domaine, notamment en ce qui concerne la normalisation des tests de réponse thermique (TRT), norme prEN ISO 18674 (enquête publique clôturée le 8 janvier 2014). Par contre, aucune norme produit n'existe sur la boucle de sonde ni sur le coulis géothermique. Les actions menées en France dans ce domaine représentent donc une première initiative. Le BRGM se rapproche actuellement d'AFNOR afin d'étudier les opportunités de développement de la normalisation à l'Europe et à l'International.

Le présent rapport synthétise les actions qui ont été menées en 2012 dans le cadre de la Convention ADEME-BRGM n° 12 05 C0131.

Sommaire

1. Introduction	7
2. NF X10-960 : Boucle de sondes	7
2.1. CONTEXTE.....	7
2.2. INTERET DE NORMALISER LA BOUCLE DE SONDE.....	7
2.3. TRAVAUX RÉALISÉS	8
2.4. DATES CLÉS :.....	8
3. NF X10-999 : Forage d'eau et de géothermie	9
3.1. CONTEXTE.....	9
3.2. TRAVAUX RÉALISÉS	9
3.3. DATES CLÉS :.....	9
4. PR NF X10-950 : Coulis géothermique	11
4.1. CONTEXTE.....	11
4.2. OBJECTIFS	11
4.3. DATES CLÉS :.....	12
4.4. DÉFINITION D'UNE MÉTHODOLOGIE NORMALISÉE POUR LA MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE SUR LES COULIS GÉOTHERMIQUES	12
4.4.1. Eprouvettes de coulis : première série de mesure des conductivités thermiques (avant étalonnage inter-laboratoires).....	12
4.4.2. Etalonnages des appareils de mesures en laboratoire.....	13
4.4.3. Eprouvettes de coulis : deuxième série de mesure des conductivités thermiques (après étalonnage inter-laboratoires).....	15
4.5. RÉDACTION DU PROJET DE TEXTE DE LA FUTURE NORME SUR LE COULIS GTH (PR NF X10-950)	16
4.6. RECENSEMENT DES ESSAIS DE CARACTERISATION DES COULIS VENDU SUR LE MARCHÉ	16
5. Conclusions	17

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 NF X10-960 : page de garde et membres actifs de la commission X10-M pour la rédaction de la norme.....	19
Annexe 2 NF X10-999 : membres actifs de la commission X10-M pour la révision de la norme.....	27
Annexe 3 NF X10-999 : état de la révision suite à l'enquête publique et à la réunion de dépouillement du 4 décembre 2013	31
Annexe 4 PR NF X10-950 : participants au groupe de travail.....	117
Annexe 5 Résultats de la première série de mesure de la conductivité thermique sur le coulis Thermocem	121
Annexe 6 Résultat de la première série mesures de conductivité sur les éprouvettes de matériau (LRPC).....	145
Annexe 7 Résultat du contre étalonnage réalisé par Thermoconcept	147
Annexe 8 Résultat de la deuxième série de mesures de conductivité sur les éprouvettes de matériau (LRPC).....	155
Annexe 9 Résultat de la troisième série de mesures de conductivité thermique sur les éprouvettes de matériau (synthèse)	158
Annexe 10 Résultat de la deuxième série de mesures de conductivité thermique sur les coulis Thermocem et Füllbinder (synthèse).....	160
Annexe 11 PR NFX10-950 : projet de texte de support à l'avant-projet de <i>norme</i> (V11)	162
Annexe 12 Tableau des essais de caractérisation réalisés par les fabricants de coulis sur le Marché	175
Annexe 13 Tableau spécifiant les caractéristiques des appareils de mesures utilisés par les laboratoires	179

1. Introduction

La géothermie très basse énergie, c'est-à-dire qui nécessite l'utilisation d'une pompe à chaleur, se découpe en différentes techniques en fonction du type d'échangeurs géothermiques utilisés : en circuit fermé (sondes géothermiques verticales, champ de sondes, corbeilles, capteurs horizontaux, capteurs à détente directe), en circuit ouvert (forages d'eau). Ces solutions techniques ne sont pas toujours encadrées par des référentiels techniques (DTU), règles de l'art (guides), normes ou certification. On pouvait encore constater il y a 7 ans qu'un vide normatif existait pour l'ensemble des techniques susmentionnées.

Pour répondre à ce besoin, le BRGM a lancé en 2007, en collaboration avec le Syndicat des Foreurs d'Eau et Géothermie (SFEG), une démarche de normalisation.

Le présent rapport décrit les travaux qui se sont portés en 2013 sur la normalisation de la boucle de sonde (**NF X10-960**), sur la révision de la norme sur le forage d'eau (**NF X10-999**) et sur le projet de norme sur le coulis géothermique (**PR NF X10-950**).

2. NF X10-960 : Boucle de sondes

2.1. CONTEXTE

Le BRGM a mis en place, en juin 2007, un groupe de travail constitué de représentants de fabricants de boucles de sondes en vue de l'élaboration d'un cahier des charges fixant les critères de conception des boucles de sondes géothermiques verticales pour les rendre conforme aux exigences qualité de la démarche foreurs QUALIFORAGE.

Les travaux ont repris en janvier 2010 avec la création d'un **groupe de travail spécifique** pour participer à la rédaction de l'avant-projet de norme sur la boucle de sonde.

2.2. INTERÊT DE NORMALISER LA BOUCLE DE SONDE

Afin de combler le vide normatif de la géothermie très basse énergie et pour venir en appui de la norme NF X10-970 sur la sonde géothermique verticale qui traite de la mise en œuvre de l'ouvrage dans sa globalité, le BRGM a étendu la portée de son action de normalisation aux produits intégrés dans le forage : boucle de sonde, coulis géothermique.

La normalisation de la boucle de sonde a permis en outre de réunir, à travers la commission AFNOR X10M, les principaux constructeurs, de prendre en compte leur procédé de fabrication et d'aboutir ainsi à un référentiel commun.

2.3. TRAVAUX RÉALISÉS

En 2013, les travaux ont consisté à finaliser la norme en vue de l'homologation effective (27 mars 2013).

La première page de la norme homologuée ainsi que la liste des membres de la commission X10 M qui ont participé à la rédaction de cette norme sont donnés à l'annexe 1.

Le document a été finalisé à la fin de l'année 2010 et remis en début 2011 à la commission X10M pour la rédaction de la norme NF X10-960. Sa rédaction s'est poursuivie en 2011 et 2012 à travers 14 réunions de commission.

2.4. DATES CLÉS :

- juin 2007 : élaboration du premier cahier des charges fixant les critères de conception et de performances d'une boucle de sonde (mise en place d'un groupe de travail) ;
- début 2010 : reprise des travaux et rédaction de l'avant-projet de norme sur la boucle de sonde ;
- début 2011 : remise de l'avant-projet à la commission X10M pour la rédaction de la norme NF X10-960 ;
- 15 octobre 2012 : mise à l'enquête publique du projet de norme ;
- **27 mars 2013 : homologation.**

3. NF X10-999 : Forage d'eau et de géothermie

3.1. CONTEXTE

La norme préexistante sur le forage d'eau et de géothermie homologuée en avril 2007 (NF X10-999) abordait assez peu les problématiques propres à la géothermie très basse énergie sur forages d'eau, en particulier la réinjection et la maintenance.

Suite à la réunion de lancement du 17 octobre 2011, une définition plus précise des révisions à effectuer sur la norme NF X10-999 a été validée.

3.2. TRAVAUX RÉALISÉS

Pour ce faire, les réunions de travail avec la commission X10M ont débuté dès mars 2012 et se sont poursuivies en 2013 par trois réunions de commission de rédaction ainsi que deux réunions de dépouillement suite à l'enquête publique (lancée le 23 août 2013). Les membres actifs de la commission sont donnés à l'annexe 2.

Cette révision (cf. annexe 3) intègre en particulier **un nouveau chapitre spécifique pour les forages d'eau à usage géothermique** (chapitre 19), ainsi qu'une mise en conformité des diamètres théoriques des tubages avec ceux couramment utilisés par les professionnels du forage (tableau 1 p. 19).

3.3. DATES CLÉS :

- 20 avril 2007 : homologation de la NF X10-999 ;
- 17 octobre 2011 : lancement de la révision (intégration des aspects liés la géothermie très basse énergie) ;
- 23 août 2013 : enquête publique ;
- **début 2014 : homologation (date à confirmer).**

4. PR NF X10-950 : Coulis géothermique

4.1. CONTEXTE

La cimentation d'une sonde géothermique verticale représente une phase primordiale durant la phase des travaux car elle permet d'assurer la protection de l'environnement, en évitant notamment les infiltrations de surface ou la mise en connexion plusieurs aquifères, d'assurer l'équilibre des contraintes mécaniques dans le forage et d'optimiser le transfert de l'énergie (chaud et/ou froid) entre le sous-sol et l'échangeur.

Le choix du ciment et de ses caractéristiques, en particulier sa conductivité thermique et sa résistance aux agressions chimiques du milieu dans lequel il est injecté, représente un enjeu majeur pour garantir la bonne performance de l'échangeur et sa pérennité dans le temps.

Pour combler le vide normatif sur ce type de produit, le BRGM a lancé en 2010 et formalisé en début 2011 un groupe de travail principalement constitué de fabricants de coulis ou d'organismes impliqués sur les travaux de recherche dans le domaine du ciment (annexe 4). Les travaux ont été menés en 2013 à travers huit réunions de travail.

Le domaine d'application de cette future norme s'applique aux « **coulis géothermiques pour échangeurs très basse énergie en circuit fermé mis en œuvre par forage** ».

4.2. OBJECTIFS

Le principal objectif est de réaliser un avant-projet de norme sur les coulis géothermiques utilisés pour la très basse énergie. En particulier, il s'agit de définir les critères de performance (thermique, mécanique, durabilité, ouvrabilité) du coulis géothermique ainsi que les essais de caractérisation à mener en laboratoire. Les objectifs visés en amont de la norme sont la protection de l'environnement, les performances des installations géothermiques et l'offre des ciments géothermiques sur le Marché.

Les travaux sont menés à travers **trois axes** :

- définition d'une méthodologie pour la mesure de la conductivité thermique sur les coulis géothermiques en vue d'une normalisation¹ ;
- rédaction de l'avant-projet de texte de la future norme sur le coulis géothermique PR NF X10-950 ;

¹ Les laboratoires qui ont participé aux mesures de conductivité thermique sur les coulis et les étalons sont les suivants : LRPC, ANTEA, HEIDELBERG, GCGM RENNES

- recensement des essais de caractérisation des coulis pratiqués par les fabricants.

4.3. DATES CLÉS :

- septembre 2011 : réunion de lancement ;
- mai - juin 2012 : premières mesures de conductivité thermique par les laboratoires sur le coulis Thermocem ;
- octobre 2012 : choix des étalons ;
- février – avril 2013 : mesures sur étalons et étalonnage des appareils de mesure ;
- avril – mai 2013 : deuxième série de mesures sur les coulis Thermocem et Füllbinder ;
- septembre 2013 : fin de la rédaction du projet de texte sur la PR NF X10-950 ;
- 2014 : création de la commission AFNOR et rédaction du projet de norme ;
- **fin 2016 : homologation (date à confirmer).**

4.4. DÉFINITION D'UNE MÉTHODOLOGIE NORMALISÉE POUR LA MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE SUR LES COULIS GÉOTHERMIQUES

Les travaux ont été menés avec pour objectif de définir une méthodologie pour la mesure de la conductivité thermique sur les coulis géothermiques à prendre en compte dans la future norme PR NF X10-950.

4.4.1. Éprouvettes de coulis : première série de mesure des conductivités thermiques (avant étalonnage inter-laboratoires)

Conditions de mesure

Une première série de mesures de conductivité thermique a été réalisée le 27 juin 2012 par 4 laboratoires (Heidelberg, Antea, Université Rennes, LRPC) sur des éprouvettes de Thermocem coulées par Heidelberg (éprouvettes coulées le même jour pour tous les laboratoires), en tenant compte de la géométrie des éprouvettes fixées par les laboratoires. Ces mesures ont été réalisées en se basant sur le protocole de mesure établi par ANTEA.

Résultats (annexe 5)

Les résultats ont mis en évidence d'une part des écarts inter-laboratoires qui pouvaient être attribués à des problèmes d'étalonnage des appareils de mesure et d'autre part des variabilités (~ 20 %) entre les mesures réalisées sur les différentes éprouvettes au sein d'un même laboratoire.

Les mesures faites sur les mêmes éprouvettes (répétition de la mesure), avaient par contre montré une variabilité faible de la conductivité, de l'ordre de

5 %. Les écarts ne sont en revanche pas attribués à des problèmes de coulage (géométries d'éprouvettes, vibration) car les densités et masses volumiques des éprouvettes paraissent cohérentes.

4.4.2. Étallonages des appareils de mesures en laboratoire

Pour répondre aux problèmes d'étalonnage des différents appareils de mesure rencontrés lors de la première série de mesures sur le coulis Thermocem et obtenir des mesures de conductivité thermique fiables, il a été décidé :

- d'étalonner les appareils de mesure (LRPC, ANTEA, HEIDELBERG, GCGM RENNES) avec des étalons communs (voir ci-dessous), sélectionnés pour représenter 3 gammes de conductivité thermiques (valeur basse, moyenne, haute) ;
- de réaliser une deuxième série de mesure de conductivité sur deux types de coulis : Thermocem (Heidelberg) et Füllbinder (Schwenk).

Choix des étalons

Notes :

- un étalon représente, dans nos essais, un échantillon témoin (éprouvette de matériau) utilisé pour étalonner l'appareil de mesure en laboratoire ;
- pour étalonner les appareils de mesures, trois gammes de valeurs ont été retenues (proches de la valeur moyenne de la conductivité thermique du Thermocem de 2 W/mK). Elles sont représentées dans le tableau ci-dessous par trois types de matériaux (étalons) :

	Étalon	Conductivité thermique (W/mK)	Fournisseur	Commentaire
Valeur basse	PEHD	0.4 - 0.5	PIC Olivet	Barreau coupé en cylindre
Valeur moyenne	Granite Lanhélin	2.5 - 2.8	La Générale du Granite - 35420 Louvigne du Désert	
Valeur haute	Marbre blanc Carrare	4.3 - 4.4	COULEAU Ingré	cube de 10 cm d'arrête

Étalons retenus le 25/01/13

Étalons : première série de mesure des conductivités thermiques réalisées par le LRPC

Le LRPC a réalisé une première série de mesures de conductivité sur les éprouvettes de matériau (soit 5 paires d'éprouvettes pour chaque matériau (annexe 6) : PEHD, Granite Lanhélin, marbre de Carrare) en vue de contrôler la variabilité des mesures et sélectionner une paire pour chaque matériau à envoyer chez Thermo-concept pour contrôle de l'étalonnage (contre étalonnage).

Résultat des mesures de conductivité sur les éprouvettes de matériau :

- Granite : 2.51 W/mK - 2.83 W/mK ;
La variabilité peut s'expliquer par la variabilité minéralogique du granite.
- Marbre : 4.31 – 4.34 W/mK ;
Ces valeurs sont jugées hautes par rapport à la bibliographie (1.3 – 3.5 W/mK). La masse volumique calculée par le LRPC est de 2.8 g/cm³.
- PEHD : 0.39 – 0.42 W/mK ;
Ces valeurs sont homogènes (matériau de synthèse).

Contre étalonnage par Thermoconcept

Suite à cette première série de mesures, ANTEA a envoyé 3 paires d'éprouvettes représentatives du lot chez Thermo-concept pour vérifier l'étalonnage. Il en ressort les résultats suivants (annexe 7) :

- Granite : 2.95 W/mK (écart LRPC : 4 % - 17 %) ;
- Marbre : 4.71 W/mK (écart LRPC : 8.5 – 9 %) ;
- PEHD : 0.46 W/mK (écart LRPC : 0.9 % - 1.8 %)

Étalons : deuxième série de mesure des conductivités thermiques réalisées par le LRPC

A la suite des résultats fournis par Thermoconcept, le LRPC a réalisé une deuxième série de mesure sur les étalons en utilisant cette fois-ci la même sonde que celle utilisée par Thermoconcept. L'objectif était d'une part de caler les mesures LRPC avec celles de Thermoconcept pour obtenir de valeurs de référence pour les différents étalons, puis d'autre part de définir une tolérance de variabilité acceptable des mesures réalisées par les laboratoires par rapport aux étalons.

Il en ressort les résultats suivants (annexe 8) :

- Granite : 2.76 W/mK (écart 5.64 % Thermoconcept)
- Marbre : 4.25 W/mK (écart 8.75 % Thermoconcept)
- PEHD : 0.40 W/mK (écart 1.50 % Thermoconcept)

Sur la base de ces résultats, on pourrait par exemple fixer un objectif de valeur de tolérance limite de 10 % au-delà de laquelle les valeurs ne seraient plus acceptables.

Étalons : troisième série de mesure des conductivités thermiques réalisées par les laboratoires (synthèse)

Une troisième série de mesure des conductivités thermiques sur les étalons a été réalisée par les laboratoires. Elles ont été réalisées d'une part sur les étalons attribués aux différents laboratoires et d'autre part sur la paire d'étalons de référence (envoyée à Thermoconcept). Ainsi cette même paire a été mesurée par tous les laboratoires. L'objectif était de caler les différents appareils de mesures et de définir les valeurs de tolérance pour chaque appareil. La technologie de mesure utilisée par les laboratoires était identique (hot disk), mais avec deux méthodes différentes : échantillon pris en sandwich (Rennes, LRPC), échantillon mesuré sur une seule surface plane (Antea, Heidelberg).

Résultats (annexe 9) :

- les valeurs mesurées sont généralement homogènes, avec un écart observé inférieur à 10 % ;
- les valeurs mesurées par le laboratoire de Rennes sont élevées. Explications envisagées : les mesures ont été réalisées en fond de moule. Phénomène probablement lié à une sédimentation au sein de l'échantillon, à des problèmes de ressusage de surface ou à la préparation de l'éprouvette (vibration lors du coulage).

4.4.3. Éprouvettes de coulis : deuxième série de mesure des conductivités thermiques (après étalonnage inter-laboratoires)

Conditions de mesure

Une deuxième série de mesures de conductivité thermique sur des éprouvettes de coulis (Thermocem + Füllbinder) a été réalisée courant le mois de mai 2013 par les 4 laboratoires (Heidelberg, Antea, Université Rennes, LRPC). La préparation et le coulage des éprouvettes de coulis ont été réalisés dans les mêmes conditions que la première série. Les mesures de conductivité thermiques ont été réalisées en suivant le nouveau protocole de mesure établi par le LRPC, mais adapté aux spécificités de chaque appareil de mesure.

Résultats (annexe 10)

Les valeurs de conductivité thermique inter-laboratoires sont relativement homogènes (excepté les valeurs du laboratoire de Rennes qui sont plus élevées). On obtient les valeurs suivantes² (moyennes) :

² Les résultats du Laboratoire de Rennes ne sont pas pris en compte dans ces valeurs

- Thermocem : **2.16 - 2.39 W/mK** (écart ~ 10 %) ;
Rennes : 2.82 W/mK (écart ~ 25 %) ;
- Füllbinder : **1.76 - 1.89 W/mK** (écart ~ 7 %) ;
Rennes : 2.15 W/mK (écart ~ 18 %).

Les explications des valeurs plus élevées mesurées par le laboratoire de Rennes devront encore être trouvées : plusieurs mesures complémentaires ont été faites par la suite sur les surfaces inférieure, verticale et supérieure de l'éprouvette de coulis pour voir l'influence de l'homogénéité de l'échantillon sur les mesures. On remarque que les valeurs les plus basses sont celles mesurées sur la surface supérieure de l'échantillon (phénomènes de sédimentation).

4.5. RÉDACTION DU PROJET DE TEXTE DE LA FUTURE NORME SUR LE COULIS GTH (PR NF X10-950)

Le projet de texte V11 (rédigé par le BRGM avec l'appui d'IDEMIX et ANTEA) est présenté en annexe 11.

Le BRGM prévoit de soumettre en début 2014 cette version à différents experts (notamment AFNOR) préalablement à la rédaction en commission.

4.6. RECENSEMENT DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES COULIS VENDU SUR LE MARCHÉ

Un tableau présentant les essais de caractérisation des coulis vendus sur le Marché est présenté en annexe 12. Ces essais sont réalisés dans les propres laboratoires des fabricants ou par des laboratoires sous-traitants.

Ce tableau a été établi à partir du recensement des données gracieusement fournies par les fournisseurs ou fabricants de coulis présents dans le groupe de travail :

- SCHWENK (Füllbinder) ;
- SOVEMA (Calidutherm) ;
- MPC (Thermoplast) ;
- IDEMIX (Lambdamix) ;
- HERMES TECHNOLOGIES (Thermocem) ;
- BENTOFRANCE (Prestobent G) ;
- MCCF (MCCF).

5. Conclusions

Les actions qui ont été menées en 2013 dans le cadre des travaux de normalisation (boucle de sondes, révision NF X10-999, coulis géothermique) témoignent d'une forte mobilisation de la profession et devraient permettre de mieux structurer les différentes filières associées.

En 2013, trois catégories d'actions ont été menées avec les principaux résultats suivants :

- boucle de sondes (PR NF X10-960) : finalisation du projet de norme, et homologation (27 mars 2013) ;
- forages d'eau et géothermique (NF X10-999) : révision avec mise à enquête publique le 23 août 2013 (homologation prévue début 2014) ;
- coulis géothermique très basse énergie (PR NF X10-950) : validation d'un protocole de mesure de la conductivité thermique qui pourra être repris dans la future norme NF X10-950 et rédaction d'un projet de texte et un recensement des essais de caractérisation pratiqués par les constructeurs sur leur propre coulis.

Pour parvenir à la définition du protocole pour la mesure de la conductivité thermique sur les coulis, les travaux spécifiques suivants ont été réalisés :

- deux séries de mesure sur éprouvettes de coulis, la première sur du coulis ThermoCem et la deuxième sur les coulis ThermoCem et Füllbinder ;
- trois séries d'étalonnage (étalons Granite Lanhélin, marbre de Carrare, PEHD), les deux premières réalisées par le LRPC et la troisième par l'ensemble des laboratoires ;
- un contre étalonnage réalisé par Thermoconcept (étalons témoins) ;
- la rédaction de protocoles spécifiques adaptés aux appareils de mesures de chaque laboratoire (ANTEA, LRPC, HEIDELBERG, GCGM RENNES) ;
- la réalisation d'un tableau spécifiant les caractéristiques des appareils de mesures utilisés par les laboratoires (annexe 13).

La suite des travaux sur la normalisation des coulis géothermiques sera reprise en début 2014, avec la constitution d'une commission de rédaction AFNOR pour rédiger le projet de norme NF X10-950.

Le BRGM tient à remercier les laboratoires ayant participé aux mesures de conductivité thermique ainsi que Heidelberg et Schwenk pour leur implication dans ces travaux et le coulage des éprouvettes de coulis.

Au niveau européen, des travaux sont en cours dans le domaine de la normalisation en géothermie très basse énergie, notamment en ce qui concerne la normalisation des tests de réponse thermique (TRT), norme prEN ISO 18674 (enquête publique clôturée le 8 janvier 2014).

Par contre, aucune norme produit n'existe sur la boucle de sonde ni sur le coulis géothermique. Les actions menées en France dans ce domaine représentent donc une première initiative. Le BRGM se rapproche actuellement d'AFNOR afin d'étudier les opportunités de développement de la normalisation à l'Europe et à l'International.

Annexe 1

NF X10-960 : page de garde et membres actifs de la commission X10-M pour la rédaction de la norme

Norme

NF X 10-960-1

Mars 2013

1^{er} tirage : 2013-03

X 10-960-1

www.afnor.org

Forage d'eau et de géothermie — Sonde géothermique verticale — Partie 1 : Généralités



**DOCUMENT PROTÉGÉ
PAR LE DROIT D'AUTEUR**

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans accord formel.

Contacteur :
AFNOR – Norm'Info
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél : 01 41 62 76 44
Fax : 01 49 17 92 02
E-mail : norminfo@afnor.org

afnor

Norme

NF X10-960-2

Mars 2013

1er tirage

X10-960-2

www.afnor.org

Forage d'eau et de géothermie

Sonde géothermique verticale

Partie 2 : boucle de sonde en polyéthylène 100 (PE 100)



**DOCUMENT PROTÉGÉ
PAR LE DROIT D'AUTEUR**

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans accord formel.

Contacteur :
AFNOR – Norm'Info
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél : 01 41 62 76 44
Fax : 01 49 17 92 02
E-mail : norminfo@afnor.org

afnor

Imprimé par AFNOR le
08 Avril 2013

avec l'autorisation de l'Editeur

afnor

Norme

NF X10-960-3

Mars 2013

1er tirage

X10-960-3

www.afnor.org

Forage d'eau et de géothermie

Sonde géothermique verticale

Partie 3 : boucle de sonde en polyéthylène réticulé (PE-X)



**DOCUMENT PROTÉGÉ
PAR LE DROIT D'AUTEUR**

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans accord formel.

Contacteur :
AFNOR – Norm'Info
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél : 01 41 62 76 44
Fax : 01 49 17 92 02
E-mail : norminfo@afnor.org

afnor

Imprimé par AFNOR le
08 Avril 2013

avec l'autorisation de l'Editeur

afnor

Norme
NF X10-960-4
Mars 2013

1er tirage X10-960-4

www.afnor.org

Forage d'eau et de géothermie

Sonde géothermique verticale

Partie 4 : boucle de sonde en polyéthylène de meilleure résistance à la température (PE-RT)

Imprimé par AFNOR le
08 Avril 2013

avec l'autorisation de l'Editeur

afnor **afnor**



**DOCUMENT PROTÉGÉ
PAR LE DROIT D'AUTEUR**

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans accord formel.

Contacteur :
AFNOR – Norm'Info
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél : 01 41 62 76 44
Fax : 01 49 17 92 02
E-mail : norminfo@afnor.org

NF X10-960 – boucle de sonde**AFNOR X10M**

Membres de la commission de normalisation actifs pour la rédaction de la norme

Président : M MONNOT – BRGM

Secrétariat : MME CHAGUÉ – AFNOR

M	BONIFACE	SARL BONIFACE
M	BOULANGER	ERBOTECH GMBH
MR	BRIES	BRIES & FILS SARL
MME	COLLAS	PLASSON FRANCE SA
M	DUMAS	GEOTECH MEDITERRANEE
M	GAUDRIER	AFNOR
M	GENTY	BUREAU DE NORMALISATION DES PLASTIQUES ET DE LA PLASTURGIE
M	GESER	GESER
M	GOURET	DUQUAIT GEOSONDE SARL
M	MAILLARD	REHAU INDUSTRIE SA
M	MONNOT	BRGM
M	PALOMARES	RYB
M	SCHULTHESS	HAKAGERODUR AG
MME	THOMAS	STR PVC
M	VOLANT	SOTRA SEPEREF

Annexe 2

NF X10-999 : membres actifs de la commission X10-M pour la révision de la norme

Captage d'eau et de géothermie
AFNOR X10M

Membres de la commission de normalisation actifs pour la révision de la NF X10-999

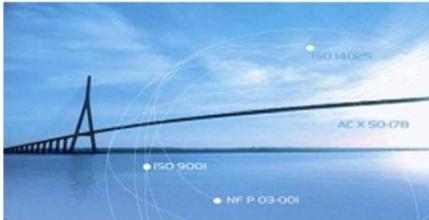
Président : M MONNOT – BRGM

Secrétariat : MME CHAGUÉ – AFNOR

MR	BRIES	BRIES & FILS SARL
M	CHIGOT	EAU ET INDUSTRIE
M	COHEN-SKALI	HYDROMINES
M	GARROUSTET	SFE
M	GRIERE	G2H CONSEILS
M	GUTIERREZ	BRGM
M	HERVE	DIRECTION DE L'EAU
M	LE BIDEAU	TERRE ET HABITAT
M	MONNOT	BRGM
M	PRADURAT	SFE
MR	VAN INGEN	VAN INGEN FORAGES
M	VAUTHRIN	SFE

Annexe 3

NF X10-999 : état de la révision suite à l'enquête publique et à la réunion de dépouillement du 4 décembre 2013

Unité AFNOR-NORMALISATION Département Construction et Cycle de l'Eau	Forage d'eau et de géothermie
	X10G
Date : 2013-12-11	Numéro du document: N 70
Assistante: Anaïs LUBAKI Ligne directe : + 33 (0)1 41 62 82 55 anaïs.lubaki@afnor.org	Responsable: Claire CHAGUÉ Ligne directe : + 33 (0)1 41 62 84 04 Claire.chague@afnor.org

PROJET DE NORME NF X10-999 « « Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de

Objet	Cher membre, Comme vu lors de la réunion de dépouillement du 4 décembre 2013, vous trouverez ci-dessous le projet de norme NF X10-999 « Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages » avec les modifications effectuées en jaune .
Diffusion	Membres du groupe de travail X10G
Suite à donner	Pour information
Source	AFNOR

surveillance des eaux souterraines réalisés par forages » AVEC MODIFICATIONS

Norme française

NF X 10-999

Indice de classement : X 10-999

ICS :

T1 Forage d'eau et de géothermie

T2 Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages

T3

E : Water wells and geothermal drilling — Construction, monitoring and dismantling of catchworks and wells to tap into underground water

D :

Norme française homologuée par décision du Directeur Général d'AFNOR.

Correspondance

[Le présent document reproduit (statut, indice:année) avec des modifications détaillées dans l'avant-propos national]

[Le présent document n'est pas équivalent (statut, indice:année) traitant du même sujet.]

[A la date de publication du présent document, il existe un projet de (filère) traitant du même sujet.]

[A la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux de normalisation internationaux ou européens traitant du même sujet.]

Résumé

Descripteurs

Thésaurus International Technique :

Modifications

Corrections

M:\dp\PPN\Equipe\HP\MISES EN FORME - NF - EN - ISO\2013\07 - JUILLET\NF X 10-999\NF_X_10-999_(F).doc

NF X 10-999

Forages d'eau

AFNOR X10G

Composition de la commission de normalisation

Président : M MONNOT

Secrétariat : MME CHAGUÉ - AFNOR

M	ARCHAMBEAU	PIPELIFE FRANCE (ALPHACAN)
MME	BONNEVILLE	DGALN - DG AMENAGEMENT LOGEMENT NATURE
M	BRETTE	ANTEA
MR	BRIES	BRIES & FILS SARL
MR	BRULE	SARL BRULE LATHUS FORAGE
M	CHIGOT	EAU ET INDUSTRIE
M	COHEN-SKALI	HYDROMINES
M	COUDERC	SFEG
M	CUNY	VAUTHRIN FORAGES (SFEG)
M	GARROUSTET	COTRASOL
M	GOBICHON	AQUASSYS DOL FORAGE
M	GRIERE	GEOENERGIE
M	GUTIERREZ	BRGM
M	HERVE	DION DE L EAU ET DE LA BIODIVERSITE
M	LE BIDEAU	TERRE ET HABITAT
MME	LEDUNOIS	DION GENERALE DE LA SANTE
MME	MARTIN	DION DE L EAU ET DE LA BIODIVERSITE
MME	MEUR	AFNOR
M	MINO	FORACO MANAGEMENT
M	MONNOT	BRGM
M	POINTET	BRGM
M	PRADURAT	SARL PRADURAT FORAGES (SFEG)
M	QUERBES	ROBERT QUERBES
M	REMY	SOLVIN FRANCE
M	REMY	AFNOR
M	SQUARCIONI	HYDRO INVEST

4

NF X 10-999

M	VAN INGEN	VAN INGEN FORAGES
MR	VAN INGEN	VAN INGEN FORAGES
M	VAUTHRIN	VAUTHRIN FORAGES (SFEG)
M	VERNIER	BRGM
M	VOLANT	SOTRA SEPEREF

Document de travail

NF X 10-999

Sommaire

	Page
Avant-propos.....	7
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives	8
3 Termes, définitions et abréviations	9
4 Préparation contractuelle et administrative.....	26
5 Installation de chantier.....	27
6 Forage	28
7 Matériaux et équipements.....	30
8 Cimentation	35
9 Contrôles en cours de réalisation de l'ouvrage	38
10 Développement	40
11 Pompage d'essais	43
12 Protection	52
13 Réception.....	55
14 Rapport de fin de travaux	55
15 Exploitation	58
16 Surveillance et maintenance de l'ouvrage d'exploitation	59
17 Réhabilitation	61
18 Fermeture temporaire ou définitive (abandon).....	63
19 Prescriptions pour les forages d'eau à usage géothermique.....	65
20 Forage eau minérale et eau de source	67
Annexe A (informative) Liste non exhaustive des contrôles de l'ouvrage en cours de foration.....	74
Annexe B (informative) Exemple de feuille de pompage.....	78
Annexe C (informative) Exemple de formulaire de réception de travaux	80
Annexe D (informative) Liste indicative et non exhaustive d'analyses	82
Annexe E (informative) Argile gonflante	83

Avant-propos

Il s'agit de mettre à disposition des acteurs concernés : Maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'études et entreprises un référentiel sous forme d'**une norme française homologuée**.

Il est rappelé qu'un forage est envisagé pour répondre à certains objectifs et que sa conception commence donc par une réflexion préalable sur l'usage et la fonction dévolue à ce point d'eau (exploitation, échantillonnage pour une surveillance, piézométrie, etc.). Quel que soit l'usage du forage à réaliser, le maître d'ouvrage doit préciser ses besoins, lesquels conditionnent les caractéristiques de l'ouvrage.

Les objectifs de ce référentiel sont :

- de faire en sorte que les ouvrages mis en place pour connaître ou exploiter les eaux souterraines y compris les ouvrages pour usage thermique soient réalisés dans les règles de l'art visant à la protection des eaux souterraines tant en terme de qualité que de quantité **et à la protection de l'environnement et du bâti**;
- d'afficher des spécifications en termes de performance ; à charge pour tous les acteurs de mettre en œuvre les moyens adéquats ;

afin :

- d'énumérer les démarches administratives à suivre et les organismes à qui s'adresser ;
- de rassembler les règles à appliquer pour réaliser un forage de qualité : spécifications, conception, réalisation ;
- de donner les préconisations dans la phase de rédaction du marché ;
- d'assurer l'exploitation et le maintien de l'ouvrage ;
- de procéder à son abandon dans des conditions respectueuses de la qualité de la ressource.

Ces objectifs pourront être référencés dans les pièces du marché pour décrire les besoins du maître d'ouvrage en terme de niveau de prestations liées à la réalisation d'un ouvrage, sans pour autant créer d'obstacles injustifiés à la concurrence entre les entreprises.

Le présent document vient en complément de la réglementation en vigueur.

NF X 10-999

1 Domaine d'application

Le présent document décline des préconisations techniques et des méthodes à employer pour la conception, la réalisation, l'exploitation, le suivi, la maintenance, la réhabilitation et l'abandon d'ouvrages de reconnaissance, d'exploitation et de surveillance (qualité et quantité) des eaux souterraines, réalisés par forage.

Il s'applique à tous types d'ouvrages de reconnaissance, de surveillance et d'exploitation (captage ou ré-injection) des eaux souterraines, y compris, les forages d'eau à usage géothermique et couvre tous les types d'usages : publics ou domestiques, alimentation en eau potable, agricoles, industriels, d'embouteillage et d'eaux thermales et minérales.

Ce document est destiné aux maîtres d'ouvrage publics ou privés (particuliers, exploitants agricoles, industriels, collectivités locales/territoriales, etc.), aux maîtres d'œuvres, aux bureaux d'études, aux hydrogéologues, aux foreurs, aux fournisseurs de matériel et d'équipement de forage, aux associations de consommateurs et aux pouvoirs publics.

2 Références normatives

Les documents ci-après, dans leur intégralité ou non, sont des références normatives indispensables à l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

FD X 31-614:1999, *Qualité du sol — Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions — Réalisation d'un forage de contrôle de la qualité de l'eau souterraine au droit d'un site potentiellement pollué.*

FD X 31-615:2000, *Qualité du sol — Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions — Prélèvements et échantillonnage des eaux souterraines dans un forage.*

NF EN 60068-2-74, *Essais d'environnement — Partie 2 : Essais — Essai Xc : Contamination par des fluides* (indice de classement : C 20-774).

ISO 14951-13, *Systèmes spatiaux — Caractéristiques des fluides — Partie 13 : Air respirable.*

ISO 14951-10, *Système spatiaux — Caractéristiques des fluides — Partie 10 : Eau.*

3 Termes, définitions et abréviations

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

Les Figures sont uniquement données à titre indicatif.



Légende

- 1 Niveau de la nappe au repos (niveau statique)
- 2 Ciment (injecté à la base du tube plein)
- 3 Niveau de l'eau dans le forage (niveau dynamique)
- 4 Tube dépassant du sol (0,50 m au minimum)
- 5 Dalle béton en pente vers l'extérieur (hauteur de 0,30 m minimum hors sol)
- 6 Centreurs
- 7 Tubage plein
- 8 Crépine adaptée à la formation aquifère et sous le niveau de l'eau en pompage
- 9 Tube plein à la base de la crépine ou tube décanter
- 10 Aquifère
- 11 Massif filtrant (gravier calibré)
- 12 Joint d'étanchéité (argile) évite l'invasion de l'aquifère et du gravier par le ciment
- 13 Cône de rabattement du forage en production

Figure 1 — Exemple de forage en nappe libre (réalisé en une étape, en un diamètre unique)
(Source documentaire : BRGM)

3.1.0

acidification : injection d'acide, le plus souvent chlorhydrique. Il peut permettre l'accroissement du débit du forage en roches carbonatées

3.1.1

adjuvant

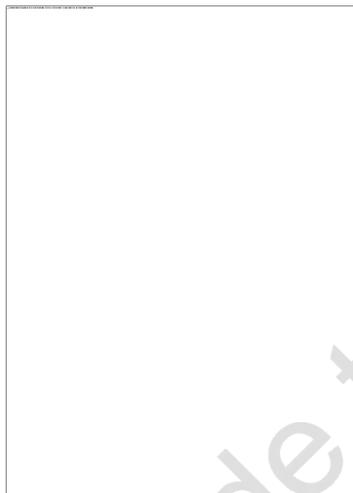
additif modifiant les caractéristiques chimiques ou physiques d'un produit ou d'une substance

NF X 10-999

3.1.2

air lift

méthode qui consiste à descendre un tube d'exhaure vertical immergé dans le forage puis à injecter de l'air comprimé par un second tube de plus faible diamètre. L'émulsion ainsi créée s'élève dans le tube d'exhaure vertical à partir duquel elle remonte en surface, entraînant avec elle les fines



Légende

- 1 Presse étoupe
- 2 Injection d'air
- 3 Sortie de l'émulsion
- 4 Niveau statique
- 5 Niveau rabattu
- 6 Crépines
- 7 Pied du tube d'air
- 8 Longueur d'immersion
- 9 Rabattement
- 10 Tubage (casing)
- 11 Hauteur de refoulement

**Figure 2 — Exemple de schéma à l'air lift
(Source documentaire : BRGM)**

3.1.3

atelier de forage

ensemble du matériel permettant de réaliser les travaux

3.1.4

annulaire (espace)

au niveau d'un forage équipé, l'annulaire concerne la zone située entre le tubage et le terrain naturel

NF X 10-999

3.1.5**aquifère**

milieu souterrain qui contient de l'eau en partie mobilisable par gravité. Ce milieu, constitué de roches perméables et/ou fissurées ou fracturées est suffisamment conducteur d'eau souterraine, pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Un aquifère comporte une zone saturée en eau et peut comporter une zone non saturée en eau (zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface de la zone saturée pour une nappe libre)

Sa limite supérieure est appelée « toit de l'aquifère » et sa base est appelée « mur de l'aquifère ».

3.1.6**battage**

consiste, par des mouvements alternatifs, à soulever un outil lourd (trépan) et le laisser retomber pour briser la roche. Consiste également à remonter les déblais avec **une soupape (ou une cuillère)** et à descendre de façon concomitante un tubage provisoire. La hauteur de chute et la fréquence des mouvements dépendent de la dureté de la roche

3.1.6b "boues de forage"

injectées en continu en cours de foration, les différents types de boues, depuis la bentonite jusqu'aux boues biodégradables ont des rôles de lubrification, refroidissement de l'outil, tenue des terrains traversés, remontée des cuttings. Les caractéristiques rhéologiques sont les propriétés liées à leur écoulement. Celles couramment mesurées sont la viscosité, la densité, le filtrat et la teneur en sable.

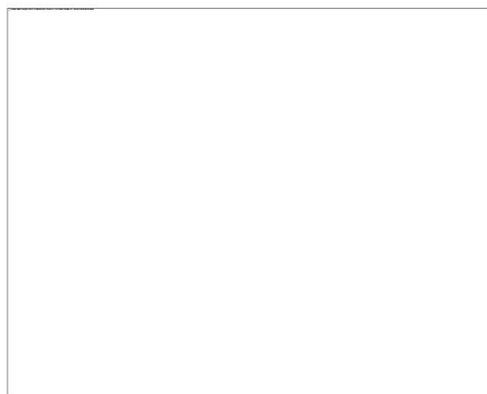
3.1.7**captage thermique vertical**

forage équipé de sondes permettant d'extraire des calories du sous-sol

3.1.9**cimentation**

opération consistant à remplir de coulis de ciment un espace déterminé

NF X 10-999



Légende

- | | |
|--|---------------------------------|
| 1 Sol | 8 Joint de décrochage des tiges |
| 2 Pompe | 9 Sabot de cimentation |
| 3 Coulis de ciment (laitier) | 10 Bille anti-retour |
| 4 Centreur | 11 Formation aquifère |
| 5 Tubage de protection | 12 Banc imperméable |
| 6 Tige d'injection du ciment | 13 Formation à occulter |
| 7 Remontée de ciment dans l'espace annulaire | |

Figure 3 — Exemple de cimentation sous pression par le pied de tubage
(Source documentaire : BRGM)

3.1.10

circulation directe

le fluide de forage injecté à l'intérieur des tiges remonte par l'espace annulaire

3.1.11

circulation inverse

le fluide de forage, passe par l'espace annulaire et remonte avec les cuttings par l'intérieur des tiges ou du tube central

3.1.12

coefficient d'emmagasinement

valeur sans dimension notée S qui représente le rapport du volume d'eau libéré par unité de surface de l'aquifère sous une charge hydraulique égale à l'unité. Il correspond dans le cas d'une nappe libre à la porosité efficace

3.1.13

colonne captante

ensemble de tubes, (bouchon de fond, tube décanteur, crépines, tube d'extension) destinés à capter l'eau de l'aquifère

3.1.14

chambre de pompage

partie du forage constituée de tubes pleins, destinée à recevoir l'équipement de pompage

NF X 10-999

3.1.15**complétion**

opération de mise en place dans un forage des équipements destinés à assurer sa pérennité et la mise en production des niveaux aquifères souhaités (voir Article 7). Ces équipements sont d'une part le bouchon de fond et le tube décanteur de fond d'ouvrage, d'autre part les crépines, le gravier filtre et les tubes pleins. Dans certains cas particuliers de roches dures et saines, les parties captantes des ouvrages sont laissées en « trou nu », et exploitées telles quelles. Elles ne font l'objet d'aucune complétion

3.1.16**corrosion galvanique (pile électrochimique)**

une pile électrochimique est créée lorsque deux métaux de natures différentes sont mis en contact. Un des métaux s'oxyde et se dissout (anode), tandis que sur l'autre métal a lieu une réduction (cathode), et éventuellement formation d'une couche de produits de réaction (des espèces chimiques de la solution se réduisent et se déposent). On parle de corrosion galvanique. Pour avoir une corrosion galvanique, trois conditions sont nécessaires :

- des métaux de nature différente : c'est une différence de potentiel électrique entre les deux métaux qui provoque le phénomène. L'expérience montre qu'il faut une différence de potentiel de 100 mV pour voir apparaître la corrosion ;
- la présence d'un électrolyte en général aqueux : la présence d'ions dans le milieu aqueux (exemple : eau minéralisée), accélère le phénomène ;
- la continuité électrique entre les deux métaux : le phénomène diminue très rapidement en éloignant les deux métaux. Il faut qu'il y ait transfert de charges électriques pour avoir le phénomène de corrosion

3.1.XXX**Slot**

Définit la largeur des ouvertures des crépines à fentes

NF X 10-999

3.1.17

crépine

tube ajouré mis en place dans un forage lors des opérations de complétion. La crépine (ou tubage crépiné) permet le passage de l'eau tout en maintenant la formation productrice

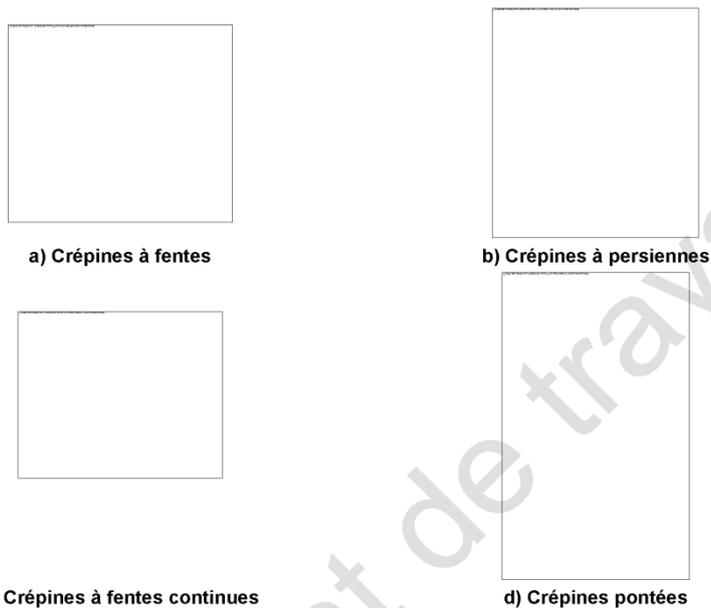


Figure 4 — Exemples d'ouverture de crépine
(Source documentaire : SFEG)

3.1.18

cross over

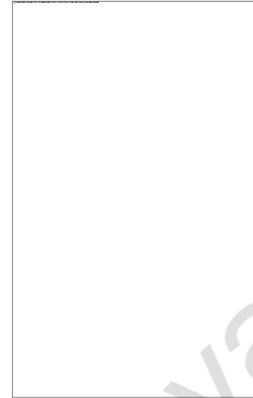
outil spécialisé, fréquemment utilisés dans les opérations de mise en place du gravier en forage profond, qui permet la mise en place d'un massif de gravier par l'intérieur du train de tige dans l'espace annulaire à gravillonner, ainsi que la remontée de la boue chassée par la mise en place du gravier de l'intérieur des crépines à l'extérieur du train de tige

NF X 10-999



Légende

- 1 Casing
- 2 Cimentation
- 3 Crépine témoin
- 4 Wash pipe
- 5 Trou ouvert Release
- 6 Circulation Inverse



Légende

- 1 Packer
- 2 Crossover
- 3 Crépine témoin
- 4 Crépine de production

Méthode de la circulation inverse

Méthode du CROSS OVER

FIGURE Mise en place du massif de gravier filtrant au droit des crépines

3.1.19

cuvelage

revêtement généralement en tubes acier ou PVC ou PEHD (parfois en béton), constituant le soutènement des parois des forages en partie supérieure

3.11 XXX

Cuttings

Débris solides provenant de la destruction des terrains traversés par le forage et évacués en surface

3.1.20

débit critique (Qc)

débit pompé au-delà duquel le rabattement n'augmente plus en fonction linéaire du débit

3.1.21

débit spécifique (Qs)

le débit spécifique (en m³/h/m) définit le débit pompé dans un ouvrage rapporté à la hauteur de rabattement selon un durée de pompage donnée.

NOTE Il convient d'être très prudent sur l'interprétation d'une mesure de débit spécifique. En effet, s'agissant d'une valeur obtenue sur un essai ponctuel très limité dans le temps, l'extrapolation à un comportement sur la longue durée est très délicate.

NF X 10-999

3.1.22

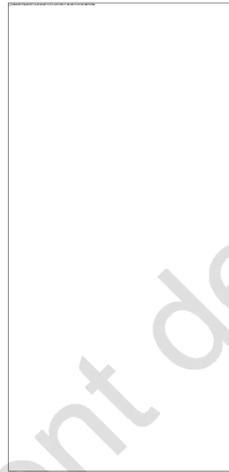
degré sexagésimal

unité de mesures scientifiques des angles, le terme sexagésimal est utilisé par opposition au degré centésimal (grade) ; 360° sexagésimal équivaut à 400° centésimal (grade)

NF X 10-999

3.1.23**développement**

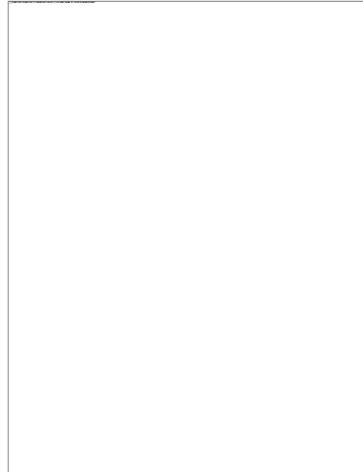
action de développer un forage : augmenter la perméabilité du milieu aquifère à proximité de la paroi de l'ouvrage par divers procédés appropriés (air-lift, pistonnage, jet sous pression etc...) en vue de réduire les pertes de charge et d'améliorer l'efficacité de l'ouvrage, en général avant sa mise en exploitation. Pratiquement le développement, réalisé pour des valeurs de débit supérieures au débit d'exploitation, permet d'organiser la mise en place des massifs de graviers et de nettoyer l'aquifère autour de l'ouvrage, avec évacuation des fines, d'assurer des conditions d'exploitation optimales. Dans le cas de l'acidification et de la fracturation, on parle également de stimulation de l'aquifère

**Légende**

- 1 Robinet de décharge
- 2 Robinet 3 voies
- 3 Air
- 4 Eau
- 5 Joint plein
- 6 Casing
- 7 Tube d'air
- 8 Tube d'eau
- 9 Extension
- 10 Crépine

**Figure 5 — Exemple de développement à «forage fermé»
(Source documentaire : SFEG)**

NF X 10-999



Légende

- 1 Jeu : 20 mm maxi
- 2 Jet
- 3 Formations
- 4 Gravier additionnel
- 5 Crépine

**Figure 6 — Exemple de développement par lavage au jet
(Source documentaire : SFEG)**

3.1.24

diagraphies

mesures et/ou enregistrements de la distribution d'un paramètre dans le forage (équipé ou non). Le domaine d'application des diagraphies est très large :

- hydraulique (micro-moulinet, vitesse, etc.) ;
- physico-chimique (température, conductivité, oxygène, etc.) ;
- électrique (polarisation spontanée, image électrique, etc.) ;
- radioactivité (gamma-ray, neutron, etc.) ;
- acoustique (vitesse d'onde, imagerie acoustique, etc.) ;
- technique (diamètre, inclinaison, cimentation, vidéo, etc.) ;

Les mesures sont réalisées à l'aide de sondes descendues dans le forage.

Une liste non-exhaustive de diagraphie est donnée en Annexe A.

3.1.25

diamètres de foration/équipement

diamètre du forage réalisé par la machine de forage et du tubage mis en place. Le choix du diamètre dépend de l'objectif fixé pour l'ouvrage à réaliser et des risques géologiques encourus lors de la foration. En effet, le diamètre de foration initial doit permettre la mise en place d'un tubage de maintien des niveaux forés en cas d'avarie (éboulement, etc.)

NF X 10-999

À titre indicatif les diamètres usuels employés pour des ouvrages n'excédant pas quelques centaines de mètres sont :

Tableau 1 - FORAGES TÉLESCOPÉS (en 2 DIAMETRES ou plus)

Diamètre de foration 1 En pouces (en mm)	Diamètre extérieur du tubage cimenté en mm	Épaisseur min. de cimentation minimale en mm	Diamètre de foration 2 En pouces (en mm)	Diamètres extérieurs de la colonne captante acier-en mm	Diamètres extérieurs de la colonne captante PVC en mm
32" (812mm)	710	50	26" (660mm)	508/457 mm	-
26" (660mm)	540/560	50	20" (508mm)	355/406 mm	315/400 mm
24" (610mm)	508	50	17" ^{1/2} (445mm)	273/323 mm	280/315 mm
22" (559mm)	473	50	17" ^{1/2} (445mm)	273/323 mm	280/315 mm
20" (508mm)	406	50	14" ^{3/4} (375mm)	219/244 mm	225/250mm
17" ^{1/2} (445mm)	323/340	50	12" ^{1/4} (311mm)	168/178/193/203 mm	180/200 mm
14" ^{3/4} (375mm)	273	50	9" ^{7/8} (251mm)	101/114/127/152 mm	140/170 mm
12" ^{1/4} (311mm)	219	40	8" (203mm)	89/101/139 mm	90/125 mm
9" ^{7/8} (254mm)	140 à 170	40	4" ^{1/2} -6" (114-152mm)	60/90/102 mm	60/90 mm
8" ^{1/2} (216mm)	114/140	40	4"-4" ^{1/2} (102-114mm)	-	50/60 mm

NOTE : 1 pouce = 2.54 centimètres

Tableau 2 - FORAGES MONO DIAMETRE

FORAGE MONO DIAMETRES			
Diamètre de foration En pouces (en mm)	Diamètre extérieur de la colonne captante acier en mm	Diamètre extérieur de la colonne captante PVC	Épaisseur minimale de cimentation en mm
32" (812mm)	610/660	-	50
26" (660mm)	508	-	50
24" (610mm)	457/508	-	50
22" (559mm)	406	400 mm	50
20" (508mm)	355/406	315/400 mm	50
17" ^{1/2} (445mm)	323	280/315 mm	50
14" ^{3/4} (375mm)	244/273	225/250/280 mm	50
12" ^{1/4} (311mm)	168/178/193/219	180/200 mm	40
9" ^{7/8} (254mm)	101/114/127/140	125/140/160/170 mm	40
8" ^{1/2} (216mm)	102/114/125	90/110/125 mm	40
6" (152mm)	-	50/60 mm	40

NOTE : 1 pouce = 2.54 centimètres

3.1.26**équipement d'exploitation**

constitué de la pompe et de ses accessoires, de la colonne d'exhaure, des sondes thermiques, d'un tube guide sonde, etc.

NF X 10-999

3.1.27

forage

ouvrage réalisé, c'est-à-dire le trou et son équipement

3.1.28

forage artésien

forage captant une nappe dont le niveau **piézométrique** est supérieur au niveau du sol

3.1.29

forage domestique

l'usage domestique de l'eau est défini par l'article R214-5 du code de l'environnement

3.1.30

forage pour ré-injection

forage destiné à ré-injecter l'eau prélevée dans un autre forage mais dans le même aquifère

3.1.31

foration

action (stricte) de forer un trou avec un outil adapté, sans connotation avec l'ouvrage réalisé

3.1.32

havage

méthode qui consiste à mener en parallèle, le creusement des terrains au moyen d'une benne preneuse et leur soutènement au fur et à mesure de l'avancement

Le soutènement peut être **notamment réalisé au moyen de tubages acier ou de cuvelages béton descendus par leur propre poids**

3.1.34

Marteau Fond de Trou (MFT)

méthode de foration à l'air **comprimé** qui utilise la percussion assortie d'une poussée sur l'outil qui se trouve lui-même en rotation ; le marteau étant placé à la base du train de tige

3.1.34

Massif filtrant

Graviers calibrés, souvent siliceux et arrondis, adaptés à la granulométrie des terrains de la formation et conditionnant la taille d'ouverture (s₁₀) de la crépine

NF X 10-999



Légende

- 1 Embout supérieur
- 2 Clapet anti-retour
- 3 Tube central
- 4 Bouchon d'étranglement
- 5 Piston
- 6 Douille
- 7 Douille d'entraînement
- 8 Taillant

**Figure 7 — Exemple de marteau fond de trou
(Source documentaire : SFEg)**

Document de travail

NF X 10-999

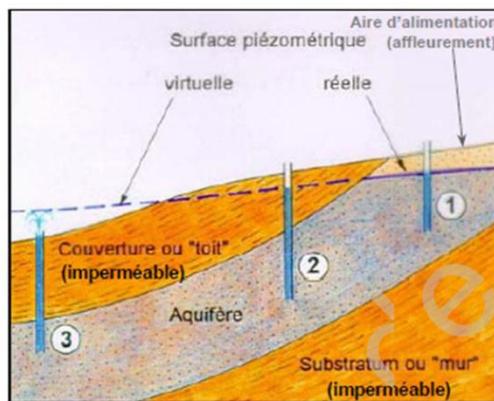
3.1.35

nappe captive

nappe ou partie d'une nappe soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et dont la surface piézométrique est supérieure à la cote du toit de l'aquifère, à couverture moins perméable, qui la contient

3.1 Types de nappes

Selon les conditions morphologiques et géologiques, une nappe peut être libre (système aquifère « libre »), captive (système aquifère « captif »), être libre puis devenir captive (illustration 36) ou inversement être captive puis devenir localement libre par dénoyage de l'aquifère (pompages intenses).



En 1 la nappe est libre, en 2 elle est captive en 3, elle est captive et artésienne. (jaillissante)

Illustration 36 - Nappe libre et captive
Source documentaire inconnue

FIGURE 9 : nappe libre et nappe captive

3.1.36

nappe libre

nappe dont la surface piézométrique est à la pression atmosphérique (surface libre). Le niveau de cette nappe peut fluctuer et on distingue ainsi une zone saturée et une zone non saturée

3.1.37

nappe superficielle ou nappe phréatique

première nappe rencontrée en descendant verticalement depuis le terrain naturel. Il s'agit d'une nappe généralement libre à surface proche du sol dont l'alimentation et la qualité de l'eau sont dépendantes des activités de surface

3.1.38

niveau dynamique

niveau piézométrique influencé — rabattu ou relevé — par opposition au niveau d'eau au repos au même point ; plus particulièrement, plan d'eau rabattu ou relevé, stabilisé ou non, dans un puits de pompage ou un ouvrage d'injection

3.1.39

niveau piézométrique

niveau libre de l'eau mesuré dans un ouvrage en communication avec un aquifère

3.1.40**niveau statique (niveau naturel)**

niveau piézométrique dans un forage non influencé par un prélèvement ou par une injection d'eau

3.1.41**numéro BSS**

le numéro de la Banque du Sous-Sol (BSS) est celui attribué par le BRGM qui gère la banque du sous-sol. Il permet de localiser l'ouvrage sur le fond topographique IGN au 1/50 000^{ème} ou au 1/25 000^{ème}

3.1.42**PAC pompe à chaleur**

dispositif thermodynamique qui prélève la chaleur présente dans un milieu (par exemple air, eau ou terre) pour la transférer vers un autre (par exemple un logement pour le chauffer)

3.1.43**perméabilité (coefficient de Darcy)**

propriété d'un corps, d'un milieu solide — notamment un sol, une roche — à se laisser pénétrer et traverser par un fluide, notamment l'eau, sous l'effet d'un gradient de potentiel. Paramètre exprimant quantitativement cette propriété, relativement aux caractéristiques du fluide, notamment l'eau : flux pouvant passer à travers une section unitaire du milieu considéré, sous l'effet d'une unité de gradient de charge hydraulique, dans des conditions déterminées de pression et de température (grandeur homogène assimilée à une vitesse, notée K)

3.1.44**piézomètre**

dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un point donné d'un système aquifère, qui indique la charge hydraulique en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement des variations d'un niveau d'eau libre ou d'une pression. Il sert entre autres à connaître l'état quantitatif de la ressource en eau souterraine

3.1.46**pompage d'essai**

pompage opéré dans un ouvrage, avec contrôle de l'évolution du débit pompé et des rabattements observés dans l'aquifère, pendant et après le pompage, pour évaluer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, d'après l'analyse de ces données

3.1.47**qualitomètre**

point de surveillance de la qualité des eaux souterraines

3.1.48**rabattement**

baisse du niveau d'eau dans un ouvrage sous l'effet d'un pompage dans la nappe (= niveau statique – niveau dynamique)

3.1.49**rechemisage**

action de mettre en place un nouveau tubage à l'intérieur d'un ancien tubage qui reste en place

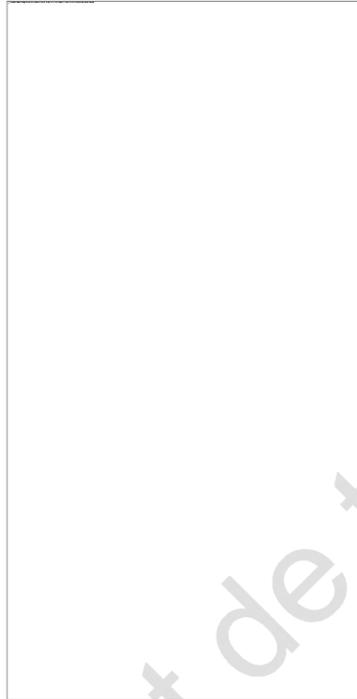
3.1.50**réhabilitation**

action de redonner à l'ouvrage sa fonction initiale

3.1.51**rotary**

méthode de foration qui utilise un outil (tricône), animé d'un mouvement de rotation par les tiges de forage et de translation verticale sous l'effet du poids de la garniture de forage (tiges et masses tiges)

NF X 10-999



Légende

- | | |
|---------------------------|---------------------|
| 1 Bloc de tête | 9 Tiges |
| 2 Plateforme d'accrochage | 10 Masses-tiges |
| 3 Mouffle-crochet | 11 Outil |
| 4 Tête d'injection | 12 Tamis vibrant |
| 5 Tige carrée | 13 Pompe à boue |
| 6 Table de rotation | 14 Dynamomètre |
| 7 Treuil | 15 Colonne montante |
| 8 Moteurs | 16 Flexible |

**Figure 8 — Exemple schématique d'un atelier de forage rotary «grande profondeur»
(Source documentaire : SFEG)**

NOTE L'exemple proposé est une version avec table de rotation et tour pour manœuvre de tiges de grande longueur. Un modèle plus compact (sur camion) est utilisé pour des profondeurs moyennes. La disposition est alors la suivante :

- train de tiges actionné soit par la table, soit par tête de rotation ;
- circuit de boue avec pompe à l'amont et unité de séparation des cuttings à l'aval.

3.1.52

Transmissivité (notée T et exprimée en m²/s)

paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur, d'un aquifère, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. Elle est le produit de la perméabilité par la hauteur mouillée de l'aquifère

3.1.53

tricône

outil de forage à trois molettes, à dents ou à picots, spécifique à la technique du rotary

24

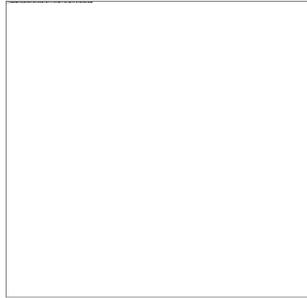


Figure 9 — Exemple de tricône
(Source documentaire : SFEG)

3.1.54

tubage plein

tubage non ajouré (à l'opposé d'un tubage crépiné) mis en place dans un forage. Ce type de tubage peut permettre d'**occulter** un niveau aquifère particulier (avec cimentation de l'espace annulaire). Il peut être utilisé également pour maintenir la stabilité des terrains traversés

3.1.55

eau minérale naturelle

une eau minérale naturelle est définie dans le code de la santé publique à l'article R1322-2,

3.1.56

eau de source

une eau de source est définie dans le code de la santé publique à l'article R1321-84

3.2 Abréviations

ACS Attestation de Conformité Sanitaire

PVC Polychlorure de Vinyle

DBO5 Demande Biologique en Oxygène

PAC Pompe à Chaleur

NPSH Net Positive Suction Head

PEHD Polyéthylène Haute Densité

BSS Banque du Sous-Sol

CE Communauté Européenne

IADC International Association of Drilling Contractors

API American Petroleum Institute

CSP Code de la Santé Publique

IGN Institut Géographique National (informations géographiques et forestières)

NGF ou NG Nivellement Général de la France

AEP **Adduction** en Eau Potable

ICPE Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

NF X 10-999

CBL Cement Bond Logging

BET Bureau d'Étude Technique

GTH Géothermie

SFEG Syndicat des Foreurs d'Eau et de Géothermie

BRGM Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CLP Conformité aux Listes Positives

4 Préparation contractuelle et administrative

4.1 Procédures administratives

Tous les acteurs doivent se conformer à la réglementation en vigueur (tant nationale que locale) et aux codes en vigueur (en particulier le code de l'environnement, le code de la santé publique et le code minier).

Avant la réalisation de tout forage, le maître d'ouvrage doit engager les démarches administratives en conformité avec la législation applicable en France.

L'entreprise doit s'assurer de la présence ou non de réseau(x) par l'intermédiaire d'une Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT). Un repérage des réseaux doit être fait avant l'engagement des travaux.

Le maître d'ouvrage doit veiller notamment à obtenir les autorisations nécessaires (le cas échéant).

La déclaration des travaux conformément au code minier est effectuée par le maître d'ouvrage ; l'entrepreneur doit s'assurer que cette dernière a été effectuée et si cela n'est pas le cas, il doit la présenter lui-même avant le début des travaux.

Le maître d'ouvrage doit se rapprocher du service en charge de la Police de l'Eau, ou du service qui gère son installation classée, pour connaître les démarches à entreprendre. Les services de la préfecture peuvent utilement être consultés pour préciser le service compétent.

En fin de travaux et pour les forages relevant de la Loi sur l'Eau, un rapport conformément aux textes en vigueur doit être transmis à la préfecture dans les deux mois (après la fin des travaux).

4.2 Contrat/Marché

L'entreprise de forage n'a que des obligations de moyens et de conseils. Lors de la réalisation des travaux, toute modification significative fera l'objet d'un accord préalable entre l'entreprise et le maître d'ouvrage.

Deux situations peuvent se présenter selon que le maître d'ouvrage dispose des compétences techniques ou pas en matière de travaux de forage.

NF X 10-999

- a) Dans le premier cas, un contrat doit être rédigé par le maître d'ouvrage précisant les modalités de réalisation de l'ouvrage. Ce contrat doit comprendre au minimum :
- un cahier de clauses techniques avec l'usage et la description des travaux à réaliser ;
 - un cahier des clauses administratives fixant les obligations, les contraintes environnementales, les délais et les relations contractuelles ;
 - un bordereau des prix et un détail estimatif.

Le contenu des prescriptions doit être conforme au présent document. En cas de désaccord, le foreur se doit d'émettre des réserves.

- b) Dans le second cas, l'entreprise de forage sollicitée par le maître d'ouvrage a une obligation de conseil et d'information. Elle doit impérativement proposer des travaux conformément à la réglementation, aux règles de l'art et au présent document. Le devis doit comporter un descriptif des moyens que l'entreprise met en œuvre pour atteindre les objectifs assignés ainsi que le détail des matériaux et des prestations proposées. En l'absence de cahier des charges l'entreprise de forage se doit de détailler le programme technique qu'elle propose de mettre en œuvre.

La proposition de l'entreprise de forage est établie après avoir pris connaissance de la demande du client (*type d'utilisation, débit espéré, localisation du forage, etc.*) et/ou des conditions techniques du marché (*qualité des matériaux, délai, contraintes diverses techniques/environnementales, etc.*).

La proposition de l'entreprise de forage doit :

- prendre en considération le programme de forage et de pompage en vue de définir les conditions d'exploitation, ainsi que le détail des prestations comprises dans le contrat ;
- préciser les spécifications des matériaux entrant dans la composition du forage (nature, qualité et dimensionnement des crépines, tubages, ciment, massif filtrant, etc.) et en conséquence assurer les approvisionnements des matériaux répondant aux exigences. Le cas échéant, vérifier que la résistance à l'écrasement du tubage et des crépines a été prise en compte.

Les différentes parties doivent se concerter en vue de réaliser les travaux et :

- prévoir un moyen d'accès au chantier (passage, plate-forme) ;
- sélectionner le diamètre des outils de forage selon le diamètre des tubes, afin d'assurer l'espace annulaire de cimentation et gravillonnage (si nécessaire) suffisant et des équipements d'exploitation ;
- définir les moyens pour la mise en œuvre ;
- définir les conditions d'évacuation et du devenir des déblais (par exemple : régilage, évacuation, etc.), du fluide de forage, de l'eau résultant de la foration quand celle-ci est réalisée au marteau fond de trou et du pompage d'essai ;
- prévoir des graisses et produits respectant l'environnement et la santé publique (par exemple : graisse biodégradable, etc.) ;
- prévoir du matériel adapté tant au cahier des charges, qu'au site.

5 Installation de chantier

5.1 Sécurité et protection de l'environnement

Le chantier doit être clôturé ou balisé pour en interdire l'accès aux personnes extérieures.

Les consignes de sécurité en relation avec la Propreté, l'Hygiène et la Sécurité du chantier doivent être respectées, pour ce faire, mettre en place :

27

NF X 10-999

- une signalétique de chantier (entrée interdite, port du casque, consignes de sécurité, etc.) ;
- un dispositif de stockage, de rétention, de protection et de collecte des éventuelles fuites d'hydrocarbures et autres produits potentiellement polluants ;
- un dispositif de neutralisation des additifs chimiques utilisés lors du développement du forage ;
- les moyens d'une évacuation éventuelle des déblais, des fluides de forage, des eaux des pompes d'essais.

L'ouvrage doit être implanté à distance de toute source de pollution conformément à la réglementation en vigueur.

Du matériel conforme CE (ou mis en conformité) doit être utilisé, entretenu et en bon état de propreté.

Un cahier de chantier doit être ouvert pour consigner les événements et/ou incidents survenus pendant la durée des travaux.

5.2 Réception des matériaux

Les livraisons doivent être conformes aux besoins du chantier (bon de livraison conforme au bon de commande, vérification des dimensions, des quantités, etc.).

Les conditions de stockage doivent permettre d'éviter toute dégradation (*pollution, dommage par engin, etc.*).

6 Forage

La méthode de forage doit être adaptée à la nature géologique du terrain.

6.1 Techniques de forage

Le foreur a obligation de conseil dans le choix de la technique de forage.

NOTE Dans certains cas, il est possible d'associer plusieurs techniques de forage pour la réalisation d'un ouvrage en fonction de la nature géologique du terrain.

L'entreprise de forage doit mettre en œuvre tous les moyens nécessaires et appliquer la méthode de forage adéquate afin que, pour chaque tranche de 30 m, la déviation de la colonne de tubes mesurée par rapport à la verticale ne dépasse pas un angle de 1° sexagésimal, sauf disposition particulière énoncée dans le cahier des charges pour respecter cette exigence.

- Un relevé des avancements, des arrivées d'eau, des incidents de forage (chute d'outils, perte de fluide, éboulement, etc.) et un relevé de la coupe géologique (foreur) avec prise d'échantillons tous les mètres et à chaque changement de faciès doivent être effectués.
- Les déblais de forage ne doivent en aucun cas avoir un impact sur l'environnement et la santé publique; en cas d'un quelconque risque, une évacuation des matériaux doit être entreprise conformément à la législation en vigueur.

La technique de forage retenue doit :

- préserver la qualité de l'eau de l'aquifère capté et des niveaux traversés, sans mélanger les nappes entre-elles et sans mettre en communication les nappes avec les eaux de surface ;
- éviter l'introduction de contaminants dans le forage ;
- limiter les risques de pertes du fluide de forage ;
- limiter autant que possible le colmatage de l'aquifère capté (exemple cake bentonitique) pour éviter ensuite l'utilisation de produits chimiques pendant la phase de développement (exemple : polyphosphates).

6.1.1 Rotary

Le rotary est recommandé pour des terrains peu consolidés.

Le choix du tricône est fonction des formations géologiques (cf. classification IADC) et les tiges, les masses tiges ainsi que les stabilisateurs doivent être adaptés en conséquence.

6.1.2 Marteau fond de trou

Cette technique est recommandée pour les terrains durs, mais est à proscrire dans le cas de terrains non consolidés ou plastiques.

La pression d'air nécessaire au fonctionnement du marteau est de 10 bars au minimum ; une fois dans la nappe, il faut augmenter la pression d'air pour compenser le poids de la colonne d'eau.

6.1.2.1 Marteau fond de trou tubé à l'avancement

Cette technique est recommandée pour les terrains non cohérents.

6.1.3 Battage et havage**6.1.3.1 Battage à paroi nue (trépan)**

Pour forage en gros diamètre et n'excédant pas 100 m de profondeur. Méthode réservée à la traversée de terrains compacts ne nécessitant pas de soutènement en dehors de la tête de forage.

6.1.3.2 Havage (benne)

Pour forage en gros diamètre exécuté en terrains alluvionnaires et nécessitant un soutènement des terrains soit provisoire (tubes acier récupérés), soit définitif (tubes acier ou cuvelages béton).

6.1.3.3 Havage/battage (bennes + trépan)

Pour forage de gros diamètre exécuté en terrains mixtes, meubles et compacts et nécessitant un soutènement provisoire ou définitif au droit des zones instables.

6.2 Fluides de forage

Les fluides (eau, air, boue, etc.) utilisés doivent répondre aux exigences de la sauvegarde et de la protection de l'environnement et également être conformes aux normes en vigueur.

6.2.1 Forage à la boue

La remontée des sédiments dans l'espace annulaire est assurée par la boue, le foreur doit mettre en place les moyens nécessaires pour assurer cette bonne remontée. La vitesse moyenne de remontée sera fonction du diamètre de forage, des sédiments, elle est de l'ordre de 15 m/min.

De plus, la viscosité qui régit les conditions d'écoulement de la boue doit être maintenue à environ 30 s à 60 s Marsh, par dessablage (pourcentage de fines inférieur à 1 %) et adjuvants en cas de dégradation des caractéristiques rhéologiques de la boue par le terrain.

L'utilisation des boues de forage pouvant accroître le développement bactérien, il est fortement recommandé de procéder à une désinfection de l'ouvrage en fin de travaux.

6.2.2 Forage à l'air

Afin d'évacuer les déblais dans l'espace annulaire, la vitesse ascensionnelle préconisée est de l'ordre de 15 m/s.

6.2.3 Forage à la mousse

En présence de cavités, de karst ou lorsque la remontée d'air est insuffisante (inférieure à 15 m/s).

NF X 10-999

6.2.4 Circulation directe ou inverse

En général, la circulation directe est utilisée.

Lorsque le diamètre du forage est important ou en terrain karstique, la circulation inverse permet de conserver une vitesse ascensionnelle suffisante, sans augmenter la puissance de la pompe à boue ou du compresseur.

7 Matériaux et équipements

Le matériel, les matériaux et les produits entrant dans la composition des ouvrages doivent être conformes aux normes françaises en vigueur et doivent répondre aux exigences du cahier des charges.

Le matériel, les matériaux et les produits entrant dans la composition des ouvrages et les équipements d'exploitation doivent être conformes à la réglementation, aux normes françaises en vigueur et doivent répondre aux exigences du cahier des charges. L'ensemble des composants (tubes, manchons, colles, revêtement intérieur, ...) entrant dans la constitution de l'ouvrage de forage doivent être compatibles avec un contact eau potable et être notamment titulaires d'une attestation de conformité sanitaire (ACS) ou d'une CLP ou d'une attestation sur l'honneur en cours de validité.

7.1 Tubes

La qualité (matériau compris) des tubages doit être appropriée à l'usage de l'ouvrage ainsi qu'au contexte où il est réalisé. Le tube doit avoir obligatoirement son ACS.

Le tubage provisoire ou définitif doit résister aux contraintes chimiques, thermiques et mécaniques :

- de traction lors de sa mise en place ; c'est l'élément le plus haut qui subit l'effort maximal dû au poids de l'ensemble de la colonne ;
- d'écrasement ;
- de flexion ;
- de corrosion ;
- et au flambage.

Il est rappelé que la réaction exothermique de la cimentation est susceptible de diminuer temporairement la résistance mécanique du tube en place. Une attention particulière doit être apportée au domaine d'application du tube sélectionné, celui-ci doit être en adéquation avec les contraintes de mises en œuvre (opération de cimentation, cf paragraphe 8.4.2) et géologiques. Cette vérification se fait sur la base de la résistance au collapse déclarée par le fabricant.

7.2 Raccords des tubages

Les raccords des tubages doivent répondre aux exigences suivantes :

- étanchéité lors de la cimentation ;
- le raccord entre deux tubes de même diamètre ne doit pas être constitué par un manchon intérieur ;
- la résistance aux contraintes du raccord doit être au moins égale à celle du corps des tubes ;
- l'assemblage des tubes PVC de diamètre extérieur supérieur à 125 mm doit être réalisé par un assemblage par filetage (par l'usage de tubes filetés ou de tubes tulipés et fileté) ; pour les diamètres extérieurs inférieurs à 125 mm les assemblages par collage peuvent être utilisés (manchon à coller ou tube tulipé à coller), se reporter aux consignes/précautions de montage du fabricant ;

NF X 10-999

- lors des opérations d'assemblage de tubes métalliques, une attention particulière doit être portée :
 - aux consignes de montage du fabricant (opérations de soudure, passivation, ...)
 - aux risques de corrosions (chimique, bactériologiques, électriques, dénoyage des crépines)
 - aux phénomènes électriques induits par les différences de comportement des tubes (phénomène de « pile » entre tubes pleins et tubes crépinés).

7.3 Crépine

Le type de crépine, la forme et la dimension des fentes doivent être adaptés au terrain pour permettre le passage de l'eau sans entraînement de particules fines du terrain après développement du forage. La dimension des ouvertures peut être utilement déterminée par interprétation de l'analyse granulométrique du terrain.

La mise en place d'arceaux de centrage le long des crépines est obligatoire dans le cas de massif de graviers, sauf dans le cas de tubage à l'avancement. L'écartement entre deux centreurs doit être au maximum de 12 m.

Il existe des crépines pré-gravillonnées qui évitent la mise en place d'un massif filtrant.

Le dimensionnement mécanique de ces éléments prend en compte :

- la contrainte verticale maximale appliquée lors de la mise en place de la colonne captante dans le forage : résistance à la traction ;
- la contrainte horizontale maximale générée par la pression hydrostatique (collapse) liée à la profondeur et aux conditions de pression du réservoir.

Pour chaque forage, les crépines sont dimensionnées en prenant en compte :

- le contexte hydrogéologique qui définit le type de crépine ;
- les performances hydrauliques qui dépendent du débit, du pourcentage de vide et des vitesses d'entrée de l'eau dans les crépines ;
- la capacité de filtration qui est reliée au slot des crépines et au massif filtrant.

7.4 Colonnes de tubes pleins

Le diamètre intérieur des tubes doit être fonction du débit d'exploitation et de la vitesse de circulation d'eau autour du moteur de la pompe immergée (cf. les données constructeur).

7.5 Colonne captante

Dans le cas où une colonne captante est requise, celle-ci comprend un ensemble composé de :

- une crépine, continue ou discontinue lorsqu'elle alterne avec un ou plusieurs éléments de tube plein, sous réserve de ne mobiliser qu'un seul et même aquifère ;
- une colonne de tubes pleins ;
- un bouchon de fond (sauf en cas de tube suspendu) ;
- un massif de graviers éventuellement

7.6 Massifs de graviers

On distingue ici le massif de gravier dont le but principal est de filtrer l'eau de la formation à capter (massif filtrant) et celui dont l'objectif est principalement de soutenir les terrains (massif de soutènement) pour permettre un aménagement spécifique du forage (tel que la cimentation dans un forage à un seul diamètre).

31

NF X 10-999

7.6.1 Massif filtrant autour de la crépine

Le massif filtrant a pour but de retenir l'essentiel des grains constituant la formation à capter, tout en laissant passer les grains les plus fins afin d'augmenter la perméabilité autour de l'ouvrage.

Le massif filtrant peut être constitué de graviers siliceux de préférence roulés, calibrés, lavés ou de billes de verre ou de céramique, et de plus désinfectés pour les usages alimentaires et le thermalisme.

La dimension des grains est définie en tenant compte de l'analyse granulométrique du terrain et de l'ouverture des crépines. Le volume théorique de gravier nécessaire doit être calculé et affiché dans le cahier des charges.

Pour être efficace dans les formations sableuses, l'épaisseur du massif filtrant ne doit pas être inférieure à 75 mm. Dans le cas des piézomètres et des tubages inférieurs à 165 mm de diamètre extérieur, l'épaisseur du massif filtrant peut être réduite à 50 mm.

La mise en œuvre du massif doit garantir une répartition homogène du gravier sur le périmètre et sur toute la hauteur de la colonne captante équipée de centreurs, en maintenant une circulation de fluide constante et en contrôlant la remontée du gravier à la sonde.

Le massif doit être placé de telle manière que son niveau supérieur soit nettement au-dessus du toit de la hauteur crépinée afin de constituer une réserve à gravier. En effet, à l'usage le gravier se tasse et est susceptible de remplacer les vides laissés par le volume des grains fins évacués. Le sommet du gravier dans l'espace annulaire est contrôlé lors de sa pose et sa position doit dépasser d'au moins 10% de la hauteur de colonne captante présente dans l'ouvrage sans toutefois risquer de mettre en communication plusieurs aquifères (Figure). Dans le cas où plusieurs niveaux de granulométries différentes sont captés par un même ouvrage, le massif de gravier est constitué d'une succession de massifs de plusieurs granulométries.

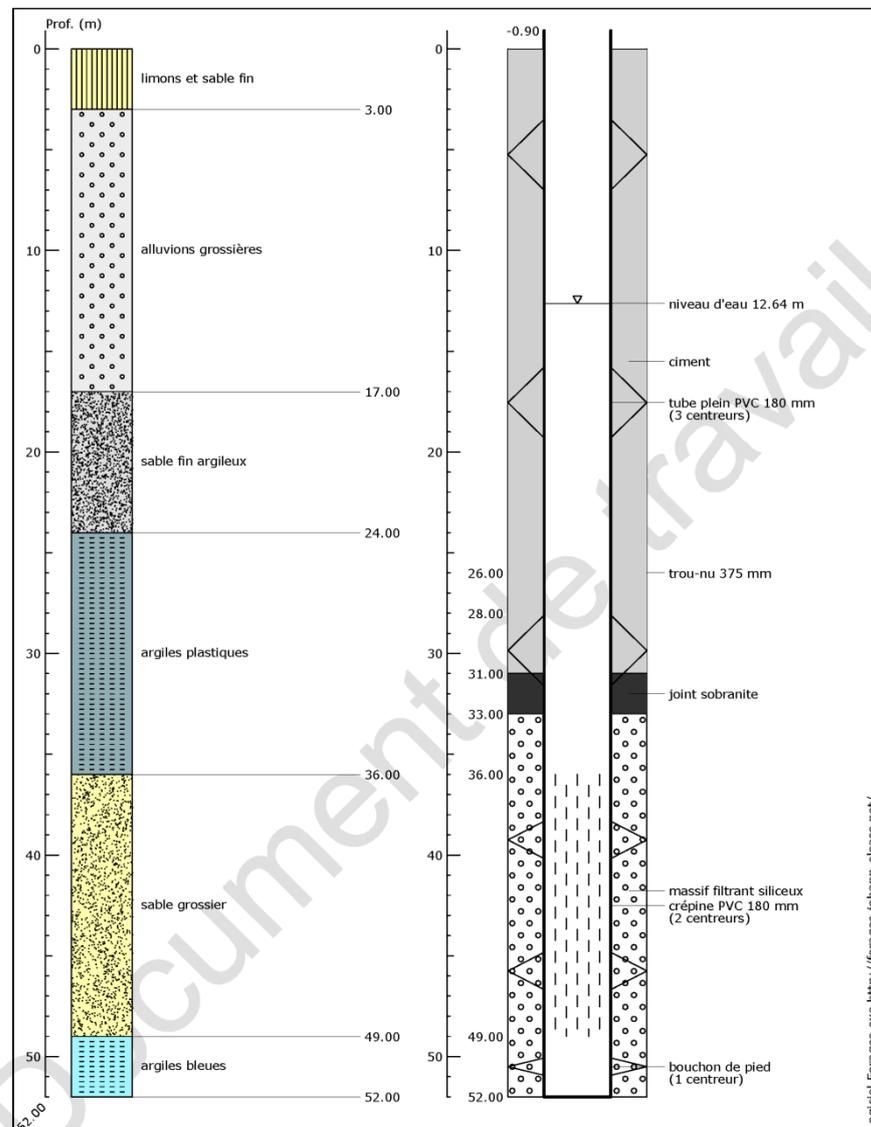


Figure 10 — Exemple de disposition du massif filtrant

Le massif filtrant est facultatif lorsque la granulométrie est grossière ($80\% > 0.5 \text{ mm}$) ou hétérogène avec des éléments grossiers abondant. Dans ces deux cas le massif de gravier va se mettre en place de manière naturelle, par autodéveloppement. Dans un tel cas, l'ouverture de la crépine doit permettre l'élimination des éléments fins.

Le massif de gravier n'est pas nécessaire lorsque les formations sont consolidées, sans risques de produire des particules fines. La présence d'un massif de gravier dans ces formations, si elle n'est pas justifiée pour des raisons de stabilisation des terrains, doit être évitée car elle entraîne des pertes de charges supplémentaires.

NF X 10-999

Le massif filtrant peut être remplacé par des doubles colonnes comprenant un espace rempli de billes calibrées.

7.6.2 Massif de soutènement autour des tubes

Le massif de soutènement doit être constitué de graviers calibrés ou de billes de verre ou de céramique, lavés et de plus désinfectés pour les usages alimentaires et le thermalisme.

Sa mise en place est indispensable lorsqu'il y a des risques d'éboulement. Il joue le rôle de stabilisateur de formation.

Sa présence est nécessaire lorsque le forage est de diamètre unique. Il sert de support au joint d'argile qui supporte à son tour la cimentation obligatoire en tête.

7.7 Ciment

Les ciments commercialisés sont de nature et d'aptitude très variables selon leur utilisation.

Les ciments doivent être choisis en fonction de leurs aptitudes à résister aux éventuelles agressions tant chimiques que mécanique du terrain et des formations des eaux souterraines traversées, tout en assurant la meilleure étanchéité annulaire du tubage.

8 Cimentation



Légende

- A 1^{re} étape
- B 2^e étape
- 1 Tube dépassant du sol
- 2 Ciment (injecté sous pression par le bas), il assure l'étanchéité entre les deux aquifères
- 3 Niveau de la nappe au repos
- 4 Margelle en pente vers l'extérieur
- 5 Tube plein à la base de la crépine
- 6 Massif filtrant (gravier calibré si nécessaire)
- 7 Crépine (adaptée à la formation aquifère)
- 8 Espace annulaire
- 9 Tubage de protection
- 10 Centreur
- 11 Nappe inférieure captive à capter
- 12 Toit de l'aquifère captif
- 13 Formation imperméable
- 14 Nappe supérieure à occulter (par exemple eau polluée)
- 15 Terrain dénoyé

**Figure 11 — Schéma type en présence de deux nappes
(Source documentaire : BRGM)**

La cimentation consiste à remplir l'espace annulaire entre le tubage et le terrain foré, avec un laitier de ciment, sur toute la partie supérieure du forage et jusqu'au niveau du terrain naturel. Elle est obligatoire pour tous les ouvrages couverts par le présent document.

NF X 10-999

8.1 Objectifs de la cimentation

La cimentation a pour objectifs :

- de préserver la qualité des eaux de la nappe en empêchant :
 - les infiltrations des eaux de ruissellement de surface vers la nappe ;
 - les communications entre nappes d'eau de qualités différentes ;
- d'assurer la stabilité du forage par le scellement du tubage au terrain ;
- d'assurer la durée de vie du forage en le protégeant des eaux agressives.

8.2 Définition de la partie à cimenter

La hauteur à cimenter est définie par les conditions rencontrées, nature et état des terrains traversés, qualité des différentes arrivées d'eau.

Si un avant-tubage, en tête de forage, est mis en place sur les premiers mètres afin d'éviter les risques d'éboulement ou de cavitation par les fluides de forages, il convient de prévoir une cimentation de tête à l'extrados de ce tubage pour éviter toute percolation des eaux de surface, excepté lorsque cet avant-tubage est provisoire. S'il est définitif, il sera cimenté au minima sur 2 m.

L'espace annulaire doit avoir une épaisseur minimale de « 5 cm » pour les diamètres de tube supérieur à 219 mm hors manchon.

Pour des tubes de diamètre inférieur à 219 mm son épaisseur pourra être réduite à 4 cm minimum.

Les forages doivent être cimentés a minima à partir du toit de l'aquifère captée sur toute la hauteur jusqu'au niveau du sol. En région de socle, lorsque l'horizon altéré n'est pas la cible du forage il faut cimenter la hauteur altérée, pour éviter toute percolation des eaux de surface et afin d'occulter les arrivées d'eau de mauvaise qualité. En cas de présence de nappes intermédiaires captives ou de qualité différente ou polluée, il est indispensable de les isoler en général en procédant à un ou plusieurs télescopages de diamètre avec cimentations successives.

Ces dispositions sont complétées pour les cas suivants.

8.2.1 Captage de la nappe phréatique

Il convient de prévoir une cimentation au minimum de 2 m afin d'empêcher toute infiltration aux abords immédiats du forage. Dans les milieux fissurés ou milieux karstiques, la profondeur de la cimentation doit être adaptée au contexte géologique.

8.2.2 Captage d'une nappe captive

Il est indispensable d'isoler par cimentation la partie supérieure depuis le toit de la nappe captive jusqu'en surface ou jusqu'au chevauchement entre tubages.

En présence d'aquifère(s) au-dessus de la nappe captive, il(s) devra(ont) être isolé(s) correctement par cimentation afin d'interdire tout mélange.

8.2.3 Nappe libre en présence d'un aquifère superficiel ou d'arrivées d'eau de mauvaise qualité au droit de failles supérieures dans le socle

Il est nécessaire d'isoler par cimentation l'aquifère à capter de l'aquifère superficiel (ou de la dernière arrivée d'eau de mauvaise qualité), soit par :

- a) pose d'un tubage descendu légèrement en dessous du mur de l'aquifère superficiel, et cimentation à l'extrados de ce tubage avant poursuite de la foration (télescopage) ;
- b) par cimentation à l'extrados du tubage (forage mono-diamètre) après pose du massif de gravier et du bouchon d'étanchéité, ou sur ombrelle.

Cette solution nécessite de disposer de suffisamment de place pour descendre les cannes de cimentation à la profondeur voulue (dans la pratique cette solution est limitée aux ouvrages peu profonds).

8.2.4 Utilisation de la technique du tubage à l'avancement

Le tubage à l'avancement est un tubage provisoire qui doit être retiré pour assurer la cimentation.

- a) En vue du captage d'une nappe captive :

Le tubage à l'avancement sera descendu jusqu'à un terrain consolidé ou à défaut jusqu'au toit de l'aquifère, afin de permettre l'isolation par cimentation.

REMARQUE : L'utilisation de la technique du tubage à l'avancement, lorsqu'il existe plusieurs niveaux aquifères, nécessite la mise en place de cimentations successives pour interdire tout mélange d'eau. Dans ce cas il est alors nécessaire de procéder par télescopage.

- b) En vue du captage d'une nappe libre :

Il est nécessaire de retirer le tubage de soutènement de façon concomitante à la mise en place du gravier, du bouchon en argile gonflante ou de l'ombrelle, et de la cimentation de la partie supérieure.

8.3 Le laitier

Le laitier est composé d'eau et de ciment soigneusement mélangés. La densité est supérieure à 1.7, sauf pour le cas particulier des forages profonds (voir 8.4.3). La qualité du ciment doit être adaptée à la qualité du terrain, de l'eau et à la nature de l'aquifère, **en particulier en cas de présence d'évaporites.**

Exemple pour obtenir une densité de 1.8 : 100 kg de ciment et 50 l d'eau et peut être complété d'éventuels adjuvants neutres par rapport à l'eau ; donne 80 l de laitier.

L'utilisation du ciment à «prise rapide» est déconseillée.

Les mélanges ciment-bentonite peuvent être utilisés, sous réserve d'utiliser des produits commercialisés prévus à cet effet. La bentonite doit être hydratée 24 h avant la cimentation et dans le but d'assurer une bonne fluidité de la cimentation. La proportion de bentonite ne doit pas dépasser 5 % de la masse de ciment. Dans le cas des piézomètres, la proportion de bentonite peut atteindre 10 % de la masse de ciment.

Le volume du laitier à fabriquer est calculé en ajoutant un coefficient minimum de 30 % par rapport au volume théorique. Ce coefficient doit être modulé suivant la connaissance des terrains plus ou moins faillés.

8.4 L'injection

L'injection est à effectuer sous pression par le bas dès l'achèvement de la mise en place du tubage définitif et en continu.

Le temps de prise est de 24 h minimum, avec contrôle de la dureté du ciment sur un échantillon de laitier prélevé à l'injection ; un temps d'au moins 48 h est souhaitable avant de continuer les travaux.

NF X 10-999

8.4.1 Pour une profondeur de cimentation inférieure à 5 m

Une cimentation gravitaire est acceptée.

8.4.2 Pour une profondeur de cimentation < 40 m

- a) Avec une ou plusieurs cannes de 1" à 2" voire plus suivant l'annulaire : elles sont placées de chaque côté du tube et descendues à la cote requise pour l'injection et retirées par tranche de 5 m à 6 m. Ce procédé ne peut pas excéder 40 m sans pompe.
- b) Sur ombrelle, fixée sur le tube à cimenter : L'injection se fait par volumes successifs avec un temps de prise de 2 h minimum entre chaque injection.
- c) sur massif de graviers : Assurer l'étanchéité avec des produits appropriés (argile gonflante, etc.) et exécuter l'injection avec des cannes dans l'annulaire.

8.4.3 Pour une profondeur de cimentation \geq 40 m

- a) Par bouchon de laitier : profondeur \leq 100 m. Prévoir un bouchon de 2 m de hauteur au fond du forage déposé par des cannes de diamètre adapté puis planter le tube de soutènement d'une profondeur d'au moins 1 m dans le laitier. Attendre la prise et le complément est fait suivant la méthode décrite au 8.4.2 c).
- b) Par l'intérieur du tube avec bouchon destructible : tubage étanche avec une tête d'injection (amovible) munie d'une vanne et d'un manomètre (coté forage). Pose du tubage en suspension d'environ 1 m du fond. Injecter dans le tube le volume de laitier calculé auparavant puis envoyer le bouchon destructible. Poser la tête étanche. Injecter le volume d'eau correspondant au volume intérieur et à la nature du tube et à sa longueur avec une pompe à pression. Bloquer la vanne et vérifier la pression du manomètre qui ne doit pas chuter de 15 % en 1 h. Attendre la prise du laitier au moins 24 h. Cette méthode peut être employée pour des volumes moyens et une profondeur \leq 100 m. Si le laitier n'est pas remonté à la cote souhaitée, il est conseillé de compléter par gravité avec des cannes d'injection descendues dans l'espace annulaire.
- c) Injection avec pose sur sabot de cimentation à bille : souder ou visser au bout du tube de soutènement un sabot à bille approprié au diamètre du tube. Descendre le tubage à la cote désirée. Descendre et poser sur sabot la canne d'injection (tige de forage) en continuité. Confectionner et injecter le laitier en continu le plus rapidement possible. Assurer l'étanchéité du sabot et sortir la canne. Attendre la prise du laitier au moins 24 h. Cette méthode est recommandée pour les grands volumes et les grandes profondeurs (au-delà de 100 m). Si le laitier n'est pas remonté à la cote souhaitée, il est conseillé de compléter par gravité avec des cannes d'injection descendues dans l'espace annulaire.

8.4.4 Pour une profondeur de cimentation au-delà de 500 m

Pour des cimentations d'un forage à très grande profondeur, il convient d'employer les techniques pétrolières.

9 Contrôles en cours de réalisation de l'ouvrage

Le maître d'ouvrage, ou son représentant, est tenu de signaler au préfet dans les meilleurs délais tout incident ou accident, survenu lors du chantier, susceptible de porter atteinte à l'environnement et à la santé publique (notamment la qualité des eaux souterraines, superficielles et les sols), et de lui préciser les mesures mises en œuvre pour y remédier.

Il convient de distinguer les contrôles en cours de réalisation effectués en continu, de ceux spécifiquement effectués à certaines phases de la réalisation.

Les données mesurées sont portées sur le rapport journalier de chantier et dans le rapport de forage.

9.1 Les différents contrôles

Les principaux points nécessitant un contrôle portent sur :

- l'appareillage de forage et matériel annexe qui doivent être en adéquation avec les objectifs prévus ainsi qu'avec la proposition élaborée par l'entreprise de forage ;

NF X 10-999

- la nature des terrains traversés ;
- les profondeurs forées ;
- la conformité des équipements (tubes pleins, crépines, etc.) ;
- l'exécution et la nature du développement ;
- l'exécution et les résultats des pompages d'essai.

a) Contrôles en continu de la réalisation de l'ouvrage :

- la profondeur ;
- le diamètre de foration ;
- le prélèvement d'échantillon des terrains ;
- la vitesse d'avancement ;
- la rhéologie des boues ;
- les pertes ;
- les arrivées d'eau, débit cumulé.

b) Contrôles spécifiques réalisés lors de certaines phases d'exécution de l'ouvrage, lors :

- de la pose des tubages : longueur et diamètre des tubes, qualité des soudures, ouverture des crépines, certificat des fournisseurs. Voir 7.1 ;
- de la cimentation : Contrôle des volumes, prise d'échantillon de laitier. Voir Article 8 ;
- du développement. Voir Article 10 ;
- du pompage d'essai. Voir Article 11 ;
- de la réception des travaux. Voir Article 13.

c) Contrôles supplémentaires éventuels :

Il est possible de prévoir des contrôles supplémentaires portant sur :

- la verticalité du forage et des colonnes de tubes ;
- l'étanchéité des tubages pleins ;
- la qualité de la ou des cimentations ;
- l'analyse qualitative (in-situ) de l'eau (par exemple : conductivité, température, nitrates, fer, etc.) ;
- des diagraphies.

9.2 La mise en œuvre

En matière de forage d'eau, la direction des travaux nécessite une parfaite connaissance des techniques de forage, d'équipement ainsi que des connaissances hydrogéologiques et géologiques. De plus, des adaptations en cours de forage peuvent se révéler nécessaires notamment d'un point de vue géologique.

39

NF X 10-999

Un suivi continu des travaux est souhaitable ; en cas d'impossibilité, il est néanmoins nécessaire de suivre les phases importantes telles que pose des tubages et des crépines (après vérification du calage géologique), cimentation, développement.

Pendant les travaux de forage :

NOTE En cas de forage à la boue, il convient de contrôler les caractéristiques rhéologiques de la boue (viscosité, densité, teneur en sable, etc.) et de noter les pertes partielles ou totales (profondeur et volume).

Des échantillons des terrains traversés doivent être prélevés, avant passage dans un éventuel dessilteur ou dessableur, à chaque mètre de forage et à chaque changement de terrain.

Le volume de chaque échantillon sera, sauf spécifications mentionnées dans le cahier des charges, de l'ordre de 0,5 dm³ à 1 dm³.

Ces échantillons doivent être entreposés sans avoir été préalablement lavés, à l'abri des intempéries soit dans des sacs étanches ou des casiers fermés portant l'indication des profondeurs forées et des références du forage (ces indications doivent être indélébiles).

L'entrepreneur est responsable de ces échantillons jusqu'à la remise de ceux-ci au maître d'ouvrage.

L'entrepreneur doit consigner dans un rapport journalier les avancements, les outils utilisés ainsi que leurs caractéristiques dimensionnelles et tout fait significatif, tels que :

- la cote de la perte de circulation et son importance ;
- la ou les venue(s) d'eau avec une estimation des débits et de la qualité, en particulier de la teneur en nitrates ;
- les tubages mis en place : nature, diamètre intérieur et extérieur ;
- les cimentations : volume, densité, méthode de mise en place ;
- la complétion (colonne captante : crépines, massif filtrant, etc.) ;
- les travaux de développement ;
- les pompages d'essai, type de pompe, profondeur d'installation, point de rejet, méthode de contrôle des débits et des niveaux d'eau.

10 Développement

10.1 Généralités

Le développement a pour objet de :

- stimuler voire améliorer la perméabilité naturelle de la formation en accentuant la capacité spécifique ;
- éliminer le restant des fluides de forage (cake) et les éléments fins et, si besoin après contrôle, compléter le massif de gravier ;
- produire une eau exempte de matières solides avec un débit optimal. En fin de développement, la teneur en sédiment ne doit pas dépasser 10 mg/l en cas d'usage pour consommation humaine.

Pour les forages à la boue, le développement d'un forage ne peut être réalisé qu'une fois l'ouvrage équipé de sa crépine et de son massif de gravier.

Pour les autres forages en terrain consolidés, le développement peut être réalisé avant l'équipement des forages.

Le gain de chaque phase de développement doit être calculé à partir du débit et du rabattement dans des conditions expérimentales identiques entre chaque phase.

NF X 10-999

10.2 Méthodes de développement

Préalablement, la mise en eau claire est nécessaire.

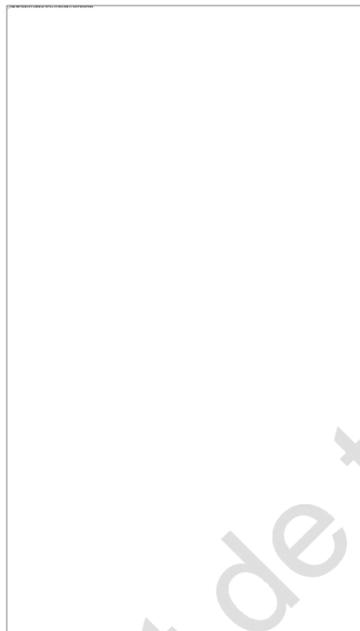
De très nombreux protocoles techniques permettent de procéder au développement d'un forage. Le choix du protocole suppose une bonne connaissance du contexte hydrogéologique et technique du forage.

- a) AIR LIFT.
- b) DÉVELOPPEMENT À LA POMPE : une des méthodes courantes consiste à réaliser des paliers de pompage à débit constant jusqu'à l'obtention d'eau claire : démarrer impérativement à petit débit puis augmenter progressivement le débit jusqu'à une valeur légèrement supérieure au débit d'exploitation envisagé.
- c) POMPAGE ALTERNÉ : différentes méthodologies peuvent être mises en œuvre pour obtenir de brefs et puissants chocs de pression.
- d) PISTONNAGE : création d'un mouvement de «va et vient» par l'emploi d'un piston actionné verticalement.

Document de travail

NF X 10-999

Dimensions en millimètres



Légende

- | | |
|-----------------|---|
| 1 Filetage API | 6 Plaque en caoutchouc (épaisseur 6-8 mm) |
| 2 Tube ou tige | 7 Rondelle |
| 3 Manchon | 8 Manchon |
| 4 Rondelle | 9 Disque soudé |
| 5 Corps en bois | 10 Diamètre intérieur du casing |

**Figure 12 — Exemple de piston de développement
(Source documentaire : SFEG)**

- e) JETTING : projection d'un puissant jet d'eau (éventuellement d'air) horizontal à travers la crépine, généralement associé à l'Air Lift.
- f) SURPOMPAGE : à utiliser par tranche successive de crépines ou pour des débits d'exploitation beaucoup plus faibles que le débit de surpompage.
- g) AGENTS CHIMIQUES : utilisation de différents agents chimiques (acide, polyphosphates etc.) sélectionnés en fonction des caractéristiques lithologiques des formations.

NF X 10-999

- h) SURFRACTURATION : dans le cas de forage en terrain consolidé (granite, calcaire, grès, etc.) — hydrofracturation, fracturation à l'explosif.
- i) TRAITEMENT PAR ONDE DE CHOC : génération d'impulsion par l'expansion soudaine d'un gaz ou d'un fluide comprimé

Chaque développement doit donner lieu au contrôle régulier de trois paramètres :

- la teneur en fines ;
- le contrôle du débit spécifique ;
- la comparaison des rabattements pour un même débit avant et après développement.

11 Pompages d'essais

11.1 Généralités

Le pompage d'essais concerne tous les ouvrages en vue d'une exploitation des eaux souterraines et notamment ceux nécessitant la connaissance des paramètres hydrodynamiques ; il consiste en deux phases :

- essai de puits : pompage par paliers ;
- essai de nappe : pompage de longue durée à débit constant.

Les objectifs des pompages d'essais sont les suivants :

- établir la fiche d'identité de l'ouvrage et évaluer ses capacités de production : par un pompage par paliers de débit ;
- évaluer la capacité de production de l'ouvrage et évaluer l'influence des prélèvements sur les ressources en eau : par un pompage longue durée ;
- apprécier la qualité de l'eau : par une analyse appropriée selon le lieu et l'usage.

11.2 La mise en œuvre

11.2.1 Équipement minimum de l'ouvrage à soumettre à essai

- Chambre de pompage tubée pour sécuriser la pompe en cas d'éboulement de terrain.
- Tube(s) guide sonde (de diamètre approprié aux outils de mesure et de préférence solidaire(s) de la colonne d'exhaure).

11.2.2 Dispositif de pompage

Le dispositif de pompage comporte :

- une pompe adaptée au débit d'exploitation souhaité avec un clapet anti-retour si nécessaire. Elle doit prendre en compte les pertes de charges liées au refoulement, à la profondeur du niveau statique sous le sol et au rabattement dans le forage ;
- une colonne d'exhaure devant être adaptée au débit, à la profondeur et au refoulement ;
- une vanne de réglage du débit.

NF X 10-999

Par ailleurs, il faut veiller à :

- conserver, si besoin, une marge par rapport au fond de l'ouvrage lors de mise en place de la pompe ;
- positionner l'aspiration de la pompe au-dessus de la cote à ne pas dénoyer ; par exemple le toit d'un aquifère captif, ou conserver 1/3 de l'épaisseur mouillée pour une nappe libre, etc. ;
- nettoyer voire désinfecter tout équipement descendu dans le forage ;
- rejeter les eaux pompées à une distance suffisante en aval hydraulique de la nappe et hors du cône d'appel du forage pour éviter tout recyclage de l'eau ;
- éviter toute nuisance par les rejets de l'eau pompée (température, turbidité, pollution) en prévoyant un dispositif adapté ;
- éviter, si l'alimentation de la pompe se fait par un groupe électrogène, toute pollution par déversement d'hydrocarbures. Il faut mettre en place une cuve de rétention sous le groupe, permettant de confiner en cas d'incident l'ensemble du carburant contenu dans le groupe et le réservoir associé. A titre de précaution, il est recommandé de placer le groupe en aval topographique du forage.

11.2.3 Matériel

- Sonde graduée lumineuse et/ou sonore pour le suivi des niveaux piézométriques.
- Si besoin, centrale d'acquisition automatique et capteurs de niveaux adaptés aux rabattements escomptés et contrôle périodique de la fiabilité des mesures à la sonde manuelle.
- Échelle limnimétrique pour les eaux de surface proches du pompage et susceptibles de participer à l'alimentation du forage.
- Principaux dispositifs utilisables pour la mesure du débit :
 - bac étalonné et chronomètre : adapter le volume du réservoir pour obtenir un débit précis, soit un temps de remplissage > 15 s et conserver une hauteur de refoulement constante pour l'alimentation du réservoir ;
 - compteur volumétrique, débitmètre électromagnétique ou tube de Pitot en veillant à ce que l'écoulement soit laminaire selon les prescriptions du fabricant du compteur. S'assurer de la validité des mesures à l'aide d'une capacité jaugée ;
 - bac de jaugeage avec déversoir en V ou rectangulaire ;
 - dans le cas de forage artésien pour la mesure de pression : rehausse si $P < 0,2$ bar, manomètre si $P > 0,2$ bar

11.3 Protocole de suivi

La profondeur du niveau d'eau dans le forage sera mesurée au centimètre près par rapport à un repère fixe, référencé par rapport au sol.

- Niveau statique à mesurer sur tous les points à suivre avant le démarrage du pompage (forage, éventuels piézomètres et repères en eau de surface).

NF X 10-999

— Mesures de niveaux en cours de pompage sur l'ouvrage pompé suivant la cadence précisée au Tableau 1 :

Tableau 1

Temps (t) écoulé depuis le début du pompage ou de la remontée	Fréquence des mesures
de 0 min à 15 min	1 min
de 15 min à 30 min	5 min
de 30 min à 60 min	10 min
de 1 h à 2 h	15 min
de 2 h à 4 h	30 min
de 4 h à 8 h	1 h
> 8 h	2 h

La remontée de l'eau dans le forage après l'arrêt du pompage est également suivie avec la même cadence.

NOTE En cas d'utilisation d'enregistreur, le pas de temps d'acquisition peut être réduit. Le débit est contrôlé régulièrement en cours de pompage à la même fréquence que les mesures de niveaux pour $t > 15$ min. Si le dispositif de mesure consiste en une simple lecture (compteur volumétrique, débitmètre électromagnétique ou tube de Pitot, bac jaugé), on adopte les mêmes fréquences que pour les mesures de niveau dès le début du pompage.

Des caractéristiques physiques sont observées visuellement (turbidité, venue de sable, etc.) par exemple par prélèvements dans des bouteilles transparentes, que l'on comparera à un échantillon témoin (eau potable), puis que l'on quantifie après décantation (taille des grains et mesure de la taille de la pastille résultant d'un vortex appliqué dans la bouteille).

Suivant le type de nappe, une surveillance chimique peut être demandée dans le protocole de pompage (conductivité, nitrate, fer, turbidité, etc.).

Les cadences des suivis des piézomètres et des eaux de surface seront adaptées en fonction du type de nappe (une nappe libre réagit par exemple moins vite qu'une nappe captive) et de la distance forage pompé/piézomètre selon le modèle présenté au Tableau 2 à titre indicatif :

Tableau 2

Distance du piézomètre par rapport au forage pompé	Temps (t) écoulé depuis le début du pompage ou de la remontée	Fréquence des mesures
Nappe libre < 25 m Nappe captive < 500 m	de 0 min à 10 min de 10 min à 30 min de 30 min à 60 min de 1 h à 4 h > 4 h	2 min 5 min 10 min 20 min idem forage
Nappe libre 25 m — 100 m Nappe captive 500 m — 1 000 m	de 0 min à 60 min de 1 h à 4 h > 4 h	15 min 30 min idem forage
Nappe libre > 100 m Nappe captive > 1 000 m	de 0 min à 60 min de 1 h à 4 h > 4 h	30 min 1 h idem forage

45

NF X 10-999

11.4 Réalisation et interprétation des pompages d'essai

a) Essai de puits

Les pompages d'essais doivent être réalisés une fois le forage correctement développé et après une période minimale de 12 h.

Les paliers de pompages doivent avoir une durée identique et minimale de 1 h. Ils doivent être au nombre minimum de 3 (de préférence non enchainés ou enchainés).

b) Essai longue durée

Le pompage longue durée doit être réalisé à un débit supérieur ou égal au débit de prélèvement envisagé.

Selon les contextes régionaux spécifiques (par exemple : socle, karst), des modalités d'essais en termes de durée doivent être adaptées.

11.4.1 Avant le démarrage des essais pour les forages non domestiques

- Préparer un programme de pompage en fixant les débits à tester en fonction des résultats obtenus en fin de développement.
- Dans la mesure du possible, pour la définition du débit d'exploitation du forage soumis à essai, il convient de tenir compte des débits des forages environnants pour estimer l'incidence sur la nappe.

11.4.2 Au démarrage

Un réglage du débit est admis pendant les cinq premières minutes du pompage.

Ensuite, le débit baisse naturellement en fonction du rabattement croissant. Il faut corriger le débit pour coller au débit théorique du programme de pompage. La pompe doit être choisie afin de limiter cette chute de débit inhérente à l'augmentation de la hauteur manométrique totale (HMT).

11.4.3 En cours d'essai

Le débit et les niveaux sont suivis à la fréquence précisée aux Tableaux 1 et 2 et notés sur une feuille de pompage prévue à cet effet dont on trouve un modèle en annexe.

Il convient d'y consigner également toute modification survenue en cours de pompage (manipulation de vanne de réglage du débit, pluie importante, qualité de l'eau, pompage sur un ouvrage voisin, etc.).

Si les niveaux sont stabilisés, on s'assurera que le niveau dynamique n'est pas rabattu à la cote d'aspiration de la pompe. Si tel est le cas, il convient de modifier le programme d'essai avec un débit plus faible, ou de descendre la pompe en respectant les cotes à ne pas dépasser (voir 11.2.2).

11.4.4 À la fin de l'essai

Suivre la remontée des niveaux selon le programme défini dans les Tableaux 1 et 2.

11.4.5 Les essais par paliers ou essai de puits

Les essais par paliers permettent de mettre en évidence les effets parasites qui se manifestent au voisinage ou dans le puits de pompage et de dimensionner en conséquence le débit optimum du forage. Celui-ci est basé sur le respect de trois contraintes :

- on veillera à éviter le dénoyage des crépines et des venues d'eau. En effet, l'aération des crépines due au rabattement lors du pompage favorise les phénomènes d'oxydation, précipitation chimique et de colonisation bactérienne pouvant donner lieu à une dégradation rapide des équipements ou de la qualité de l'eau. Le dénoyage des venues d'eau fait chuter la productivité de l'ouvrage ;

NF X 10-999

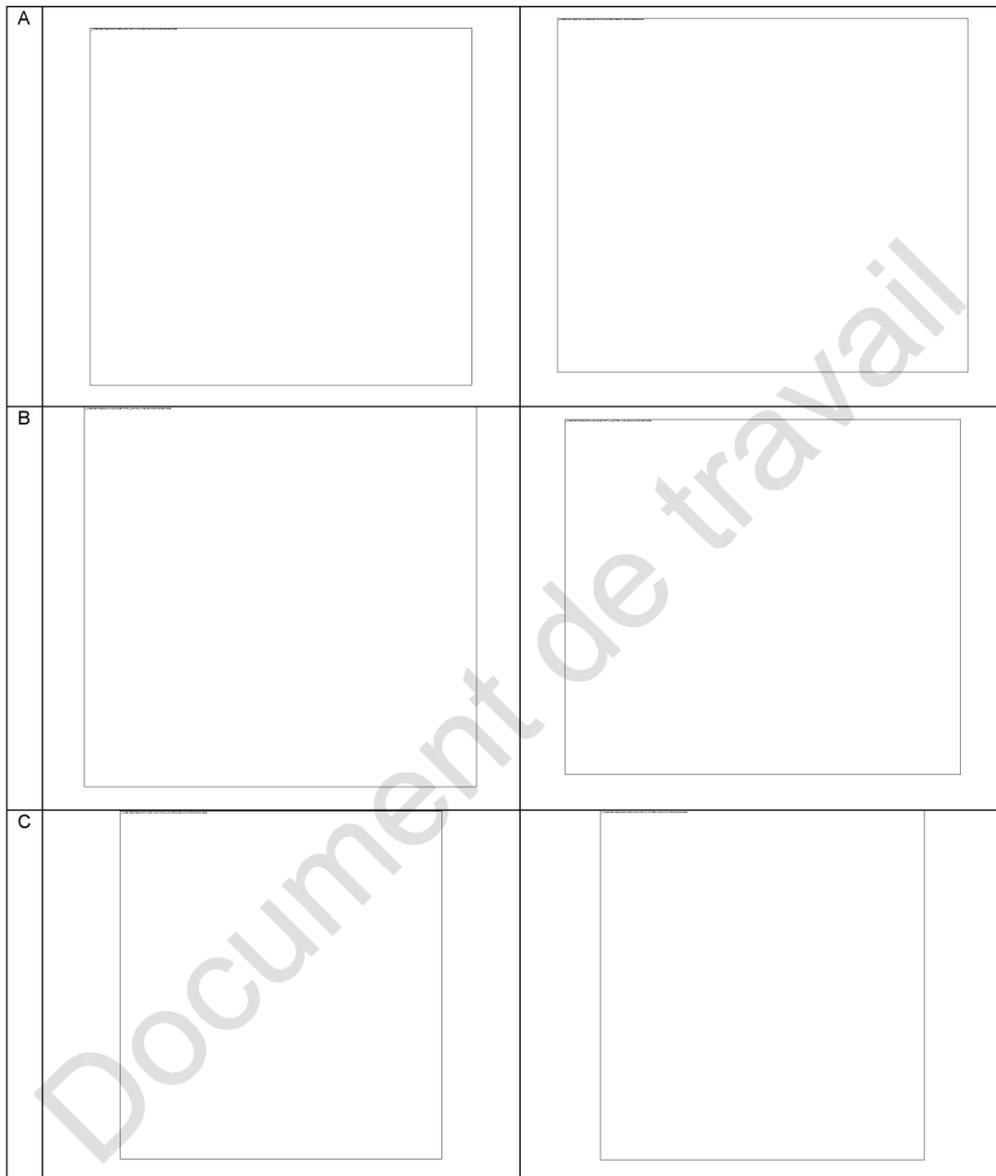
- le rabattement ne doit impérativement laisser au-dessus de la pompe une charge minimale absolue pour son fonctionnement (le Net Positive Suction Head, N.P.S.H., donné par le constructeur de la pompe). Idéalement, la pompe est située dans une chambre de pompage située au-dessus des crépines, ce qui permet de garantir le respect de la première condition ;
- les écoulements qui parviennent à la pompe ne doivent pas générer de pertes de charges excessives au niveau de l'ouvrage. Les pertes de charges sont le résultat du frottement de l'eau sur les parois des équipements et entre les molécules entre-elles. Des pertes de charge excessives se manifestent par une augmentation du rabattement éventuellement accompagnée de turbidité ou de particules en suspension. L'exploitation du forage avec des pertes de charges excessives est générateur de coûts de fonctionnement supplémentaires (l'énergie dépensée est supérieure à celle nécessaire pour pomper le même débit dans un ouvrage à faible perte de charge) et une dégradation plus rapide de l'ouvrage. L'exploitant a tout intérêt à minimiser ces pertes de charge lors de la conception de l'ouvrage puis en respectant les débits de pompage préconisés. Ceux-ci sont déterminés par l'essai par palier, ou essai de puits ;
- l'essai par paliers constitue une véritable fiche d'identité de l'ouvrage, qui atteste de ses performances et qu'il est recommandé de renouveler tous les ans pour apprécier le vieillissement de l'ouvrage.

Un palier constitue une phase de pompage, à débit constant, limitée dans le temps. Chaque palier est suivi d'une phase d'arrêt permettant à la nappe de recouvrer son niveau initial. Il est en effet préférable de ne pas enchaîner les paliers car le niveau dynamique en fin de palier dépend de la durée totale de pompage. En pratique la phase de remontée est de durée identique à la durée de pompage. Dans le cas où le niveau statique initial est recouvert avant la fin de cette durée, on peut passer au palier suivant. Une période d'arrêt supérieure n'est pas gênante.

Les débits de chacun des paliers sont de préférence croissants et atteignent ou dépassent la valeur de pompage maximal souhaitée ou présumée. La durée de pompage doit être identique pour chaque palier.

Les couples de valeurs (s, Q), s étant le rabattement observé en fin de palier et Q le débit constant du palier sont positionnés sur un graphe, Q étant en abscisse et s en ordonnée orientée vers le bas. Ce graphe est appelé courbe caractéristique du puits (voir exemple de graphique ci-après).

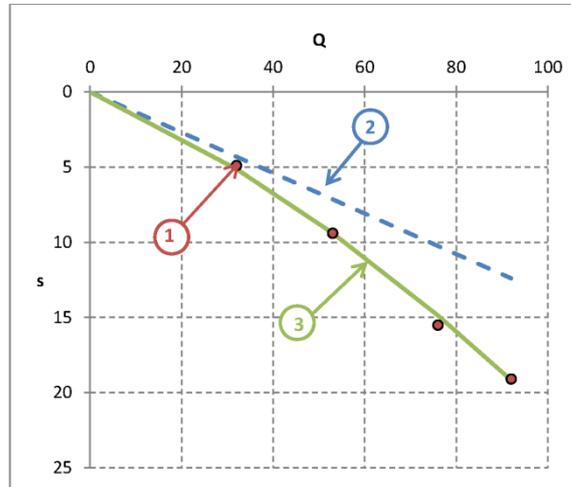
NF X 10-999



- A. Pas de détermination du débit critique. Courbe concave. Développement probable en cours d'essai.
- B. Débit critique supérieur au dernier palier
- C. Débit critique atteint lorsque $s_1=s_2$

Figure 13 — Exemples de courbes caractéristiques

NF X 10-999



Légende :

Q : débit (généralement en m³/h) ; s : rabattement (généralement en m)

- 1- Point d'observation
- 2- Droite des pertes de charge linéaire
- 3- Courbe caractéristique

Source : BRGM logiciel OUAIP (<http://ouaip.brgm.fr>)

Document de travail

NF X 10-999

L'interprétation de la courbe caractéristique se fait de manière qualitative :

- une courbe caractéristique concave signifie que l'ouvrage est en cours de développement, et l'essai par paliers n'est pas recevable. Il convient de le recommencer, après avoir mené à son terme le développement ;
- si la courbe est linéaire, le débit d'exploitation pourra être pris comme étant égal au débit maximal testé ;
- si la courbe est convexe, le débit critique est dépassé. Il est alors déterminé graphiquement comme étant l'intersection des tangentes de la première et de la seconde partie de la courbe (point d'inflexion).

L'idée de base sur laquelle repose la détermination du débit critique, est que, par analogie avec l'hydraulique classique, les pertes de charges (S) sont quadratiques en fonction du débit (Q) et que les rabattements mesurés dans le puits peuvent se décomposer en deux termes :

$$S=BQ + CQ^2$$

- Le premier caractérise la fraction du rabattement due à l'écoulement laminaire dans la formation selon la loi de Darcy.
- Le deuxième correspond à la fraction du rabattement imputable aux pertes de charges singulières qui résulte des effets parasites introduits par l'imperfection hydrodynamique du captage.

B et C sont les coefficients de perte de charge (respectivement coefficient de pertes de charge linéaire et coefficient de pertes de charge quadratique). B et C demeurent constants quand le débit varie.

La détermination du débit critique est dépendante du nombre et de la position des points de mesure.

Cette analyse graphique doit donc être complétée par un deuxième graphe exprimant le rabattement spécifique en fonction du débit (figure). La courbe obtenue est une droite d'équation $s/Q=B + CQ$. Les coefficients B et C peuvent ainsi être obtenus graphiquement : B étant l'ordonnée à l'origine et C la pente de la droite. De même, l'analyse qualitative du graphique permet de valider l'essai de puits : si la courbe obtenue n'est pas une droite de pente positive, l'essai par palier n'est pas correct (développement ou dégradation du puits en cours d'essai).

Afin de déterminer le débit critique, les coefficients B et C doivent donc être calculés, puis les rabattements associés à chacun de ces deux termes sont à leur tour calculés :

- rabattement induit par les pertes de charge linéaires : $s_1=BQ$;
- rabattement induit par les pertes de charge singulières ou quadratiques : $s_2=CQ^2$.

Lorsque $s_1>s_2$, l'écoulement dans le forage est majoritairement laminaire.

Lorsque $s_2>s_1$, l'écoulement dans le forage est majoritairement turbulent et le débit critique est dépassé.

Le débit critique peut donc être estimé à partir du moment où l'écoulement cesse d'être majoritairement laminaire, lorsque $s_1=s_2$.

Il est recommandé de ne pas exploiter l'ouvrage au-delà du débit critique.

Le débit de l'essai de longue durée est fixé au débit critique, ou en dessous si les rabattements attendus menacent de dénoyer les crépines ou la pompe.

11.4.6 Le pompage longue durée ou essai de nappe

Le pompage est réalisé à débit constant. Ce débit est la plus petite des deux valeurs :

- débit d'exploitation souhaité ;
- 90 % du débit critique.

NF X 10-999

NOTE 1 Pour les forages non domestiques (prélèvement > 1 000 m³/an), l'arrêté d'autorisation ou le récépissé de déclaration fixe un débit d'exploitation donné et toute modification doit faire l'objet au préalable d'une nouvelle demande de déclaration ou d'autorisation.

Cet essai permet entre autres de quantifier l'influence réelle du nouveau forage sur la ressource en eau, en observant directement la baisse des niveaux sur les points d'eau avoisinants.

En cas de baisse significative, il convient d'apprécier l'incidence du nouveau forage sur l'utilisation normale des ouvrages alentours (eau de surface également).

Enfin, le pompage d'essai de longue durée permet également de s'assurer, dans les conditions de l'essai, de la présence d'une réserve en eau suffisante pour couvrir les besoins demandés. L'interprétation des données permet de déterminer le débit d'exploitation.

NOTE 2 Il est conseillé de reporter les valeurs (rabattement, temps de pompage) sur un graphique semi logarithmique pour attester d'une évolution satisfaisante des niveaux.

Le calcul des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère à partir d'un pompage d'essai n'est pas développé ici (transmissivité et coefficient d'emmagasinement, etc.).

NOTE 3 Il n'existe pas de méthode d'interprétation universelle pour les déterminer et les données pourront toujours être interprétées ultérieurement par un hydrogéologue si besoin est (interférence avec des ouvrages voisins notamment).

11.4.7 Détermination du débit d'exploitation

Le débit d'exploitation est défini en fonction :

- du débit critique déterminé par les essais par paliers ;
- de la détermination des paramètres hydrogéologiques (transmissivité, coefficient d'emmagasinement, limites étanches, limites d'alimentation, le cas échéant des pompes voisins,...) ;
- du rabattement maximal acceptable ;
- des besoins de l'exploitant et du respect de la réglementation.

Le rabattement maximal acceptable est fixé par la plus contraignante des contraintes suivantes :

- la profondeur du niveau dynamique à ne pas dépasser pour le bon fonctionnement de la pompe (profondeur de la crépine d'aspiration de la pompe diminuée de son NPSH) ;
- la profondeur des crépines à ne pas dénoyer ;
- la profondeur des arrivées d'eau à ne pas dénoyer pour garantir le débit de pompage ;
- dans le cas des nappes libres, l'épaisseur de zone saturée à conserver (à titre indicatif 1/3 de l'épaisseur de l'aquifère).

Les fluctuations saisonnières de la nappe doivent être prises en compte dans l'estimation du rabattement maximal acceptable.

Le débit d'exploitation sera celui qui permettra de ne pas dépasser le rabattement maximal acceptable pendant la durée de pompage. Il sera au maximum égal au débit critique. Un coefficient de sécurité peut être appliqué selon la sensibilité de l'aquifère et la fiabilité des essais.

Dans certains cas (cas des pompes en milieu très transmissif, en karst notamment), les pertes de charge quadratique deviennent rapidement supérieures aux pertes de charge linéaire, mais l'ensemble des pertes de charge reste très faible. Dans ces cas, la notion de débit critique peut apparaître trop restrictive et le débit d'exploitation, peut, si cela est justifié, être supérieur au débit critique. Dans tous les autres cas, il faut savoir que le dépassement du débit critique fait courir un risque à l'installation de pompage et à la longévité de l'ouvrage.

NF X 10-999

11.4.8 Cas des forages domestiques

Le pompage d'essai doit figurer dans le devis de l'entreprise de forage. Si celui-ci n'est pas réalisé, par décision du client, l'estimation du débit obtenu lors du soufflage ne peut en aucun cas se substituer au pompage d'essai. Les paliers des pompages d'essai peuvent être enchaînés et l'essai longue durée doit être au minimum de trois heures.

11.5 Prélèvements d'eau et analyses

L'objectif des prélèvements d'eau et de leurs analyses est de vérifier la compatibilité de l'eau avec l'usage prévu. Les eaux destinées à la consommation humaine telle que définie par le Code de la Santé Publique sont soumises à des analyses réglementaires.

Le Tableau en Annexe D préconise une liste indicative et non exhaustive d'analyses.

12 Protection

La protection d'un forage concerne quatre objectifs principaux :

- 1) empêcher les eaux de surface, de ruissellement ou d'inondation, éventuellement polluées, de s'infiltrer le long de la face extérieure du tube ou de pénétrer à l'intérieur du tubage et d'entrer ainsi en contact avec la nappe ;
- 2) dissuader le vandalisme, en évitant l'introduction d'objets divers ou de substances dans le tube intérieur ;
- 3) protéger physiquement l'ouvrage pour éviter sa destruction et ainsi garantir, notamment, l'intégrité du tube intérieur ;
- 4) contenir les phénomènes d'artésianisme, le cas échéant.

NOTE 1 La protection peut aussi servir à repérer le forage.

NOTE 2 Le code de la santé publique prévoit, pour les captages d'eau destinée à l'alimentation des collectivités humaines la mise en place de périmètres de protection (article L. 1321-2 du CSP) notamment un périmètre de protection immédiate visant à protéger l'ouvrage de prélèvement.

Quelle que soit la protection retenue, il faut veiller à ce qu'elle soit compatible avec le type d'usage envisagé pour le forage et notamment que la tête du forage soit adaptée à l'outil d'exploitation ou de prélèvement ou de mesure envisagé des eaux souterraines (pompes mobiles, préleveur automatique à poste fixe, sonde piézométrique électrique ou sonde à air avec manomètre, etc.).

12.1 Protection vis à vis des eaux superficielles (ruissellement ou inondation)

Il s'agit ici d'empêcher les eaux superficielles de rejoindre la nappe, soit par le tube lui-même, soit par l'espace annulaire. Il faut donc veiller à ce que la tête du forage ne constitue pas un point bas de la topographie où les eaux de ruissellement pourraient se rassembler. Cet aspect doit être pris en compte dès l'implantation de l'ouvrage, qui ne sera pas placé dans un creux topographique, sauf si sa protection de tête est prévue en fonction de cette implantation (tube dépassant, etc.).

Dans tous les cas, le tube devra être correctement étanché et cimenté.

12.1.1 Cas général

Le tubage du forage doit être étanche, et scellé correctement dans une margelle bétonnée (dalle de propreté étanche). Cette dalle a une dimension de 3 m² minimum et une hauteur minimum de 30 cm au-dessus du terrain naturel. La dalle doit être sans fissure et présenter des faces dont les pentes permettent d'évacuer l'eau de pluie vers l'extérieur du tubage.

La hauteur du tubage au-dessus du sol est telle que la tête de forage ne pourra se trouver sous le niveau d'une lame d'eau superficielle due à un orage ou à une inondation (plus hautes eaux connues). La tête de forage est au moins de 50 cm au-dessus du terrain naturel et le capot en tête de forage est alors constitué d'un bouchon étanche.

NF X 10-999

Dans le cas de forage dont la tête de forage est située dans un local : la margelle en béton reste nécessaire. L'accès au local est cadenassé. Les autres recommandations présentées en 12.1.1 sont applicables.

12.1.2 Cas des ouvrages domestiques

Les têtes de forage peuvent être installées dans un regard de pompage dont le couvercle est au ras du sol. Le regard doit être adapté à l'environnement, en béton (préfabriqué ou non) et de taille suffisante. La tête de forage sera à 0,20 mètres au-dessus du fond de la chambre dans laquelle elle débouche, elle devra être totalement recouverte par un dispositif de protection équipé des passages nécessaires (colonne d'exhaure, câble électrique, tube guide sonde, ventilation, ...)

La protection des eaux souterraines repose à la fois sur le choix de l'implantation du forage (éloignement de toute source de pollution, de tout risque d'inondation, de tout risque d'impact [zone de roulage, racines]), sur la qualité du regard, l'étanchéité du forage (cimentation) et de sa tête qui doivent être particulièrement soignés.

12.2 Protection de la tête de forage

Afin d'éviter l'introduction d'objets divers, de substances ou des actes de vandalisme, il est indispensable de verrouiller les protections en tête de forage de telle sorte qu'elles ne puissent être ouvertes sans l'aide d'une clé ou d'un outil spécial.

Pour les forages en phase d'exploitation, la totalité de la tête de forage doit être recouverte par un dispositif de protection étanche et équipé des passages nécessaires (colonne d'exhaure, câble électrique, etc.) munis de presse étoupe. Une ouverture doit être prévue pour le passage du guide sonde et munie d'un bouchon vissé.

NF X 10-999



Figure 14 — Exemple de protection de la tête de forage
(Source documentaire : BRGM)

12.3 Protection physique de l'ouvrage

Le but est d'éviter que le tube ne soit endommagé lors d'un choc. Ce risque dépend hautement de l'implantation du forage, et de la possibilité d'accès du site. En règle générale, on ne peut se satisfaire de laisser simplement le tube du forage dépasser du sol, car même un tube métallique robuste et solidement ancré dans le sol peut s'avérer insuffisant et dans ce cas une protection physique adaptée devra être mise en œuvre.

12.4 Protection contre les eaux de remontées artésiennes

En cas d'artésianisme, le tubage de tête sera équipé d'un capot étanche sur brides comprenant un manomètre et une vanne de décharge, ainsi qu'un guide sonde.

Dans tous les cas, les recommandations décrites en 12.1, 12.2 et 12.3 sont applicables.

12.5 Protection contre la corrosion

La nature des matériaux doit être en adéquation avec le type de sols rencontrés et les caractéristiques physico-chimiques de l'eau.

13 Réception

La réception de l'ouvrage est un acte impératif car elle marque le transfert de propriété de l'ouvrage réalisé du foreur au maître d'ouvrage.

Il convient donc au terme des travaux tel que prévu dans le contrat que la réception soit prononcée et enregistrée par écrit après avoir vérifié la concordance des travaux avec le programme initial.

L'entreprise doit remettre un descriptif des travaux réalisés (voir Article 14).

Il convient au moins de vérifier :

- la cote de fond de l'ouvrage ;
- la cote du sommet du massif de graviers (si accessible) ;
- le diamètre intérieur et extérieur du tubage de tête (et sa nature) ;
- que le terrain et les accès ont été remis en état conformément au contrat ;
- que le forage est équipé d'un système de fermeture empêchant tout acte malveillant et empêchant l'introduction d'objets divers ou de substances.

Préalablement à la réception des ouvrages il est recommandé de procéder à :

- un contrôle par caméra sur toute la hauteur ;
- un contrôle de la cimentation dans le cas des nappes captives ;
- une localisation des arrivées d'eau ;
- une analyse d'eau adaptée à l'usage.

Un modèle de formulaire de réception de travaux est donné en Annexe C. Ce formulaire ne se substitue pas au rapport de fin de travaux. Néanmoins, selon le type de forage, ce formulaire peut être cumulatif avec le rapport de fin de travaux.

14 Rapport de fin de travaux

Un compte rendu circonstancié des travaux effectués et un descriptif de l'ouvrage réalisé sont nécessaires afin de formaliser la fin des travaux et de réceptionner les ouvrages.

NF X 10-999

Les informations à produire par le foreur ou par le bureau d'étude conseil doivent être au moins celles indiquées dans les paragraphes suivants. Par ailleurs, un compte rendu de travaux de comblement d'un forage abandonné doit aussi être réalisé.

- L'entreprise doit remettre.
- Une copie des ACS dans le cas de forages destinés à la consommation humaine.
- La fiche technique de toutes les fournitures utilisées.

14.1 Contenu du document de fin de forage remis par l'entreprise au maître d'ouvrage

Les informations du dossier à produire obligatoirement doivent être au moins celles ci-dessous (**points a à f**), à défaut d'un format imposé par le maître d'ouvrage.

Le maître d'ouvrage doit demander à l'entreprise de forage de préparer une deuxième copie de ce dossier minimal pour l'envoyer directement à l'administration compétente.

- a) Identification et adresse de l'entreprise de forage, du maître d'ouvrage, et du maître d'œuvre s'il y en a un.
- b) Adresse de l'ouvrage, plan de localisation général sur carte topographique IGN à 1/25 000 et/ou coordonnées Lambert (en précisant le système retenu), altitude appréciée selon le plan disponible (en précisant l'origine de la mesure : IGN à 1/25000 ou nivellement par un géomètre) et références cadastrales de la parcelle de l'implantation de l'ouvrage.
- c) Un compte rendu du déroulement des opérations, comportant notamment :
 - c1) les dates de début et fin du chantier ;
 - c2) la méthode de forage ;
 - c3) l'organisation du chantier, notamment celles relatives aux précautions mises en oeuvre pour éviter d'éventuelles pollutions ;
 - c4) le rapport d'avancement des travaux précisant les dates de chaque phase importante des travaux, les éventuels incidents survenus et les solutions engagées pour y remédier ;
 - c5) les caractéristiques techniques du forage : avant trou, tubage provisoire, diamètre de foration, diamètre, volume, dimensions et caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour l'équipement de la colonne de captage (tubages, crépines, massif filtrant, cimentation, etc.), leur mode de mise en place et contrôles réalisés à chaque étape, etc. (pour les forages géothermiques, la colonne de captage est remplacée par «une boucle thermique de captage») ;
 - c6) le mode de développement du forage (mise à l'eau claire, type de pompage, éventuels traitements à l'acide ou à l'hexamétaphosphate, etc.) ;
 - c7) les données intégrales des essais de débit (feuilles de pompage), avec les anomalies ou observations (couleur, présence de sables, arrêt ...) ;
 - c8) les modes de gestion des déblais, des boues et fluides usagés et des eaux pompées.
- d) Une coupe technique du forage réalisé, ainsi que la coupe terrain foreur associée, les profondeurs ou cotes NGF (si possible) des venues d'eau et des pertes de fluides, les cotes des différents équipements dans le forage et la profondeur totale.
- e) En cas d'absence de bureau d'étude conseil pour interpréter les données des pompages d'essais, par exemple pour les usages domestiques : une note du foreur préconisant les conditions d'exploitation du forage.
- f) Le système de protection et de repérage adopté s'il y en a un.

NF X 10-999

Pour les ouvrages spécifiques tels que les usages de thermalisme, les installations classées, les ouvrages de surveillance : les types et références des machines mis en œuvre sur le chantier (foreuse, pompes, outils divers, compresseur, etc.), nature et caractéristiques physico-chimiques des fluides utilisés (eau de ville ou autre, boues, carburants, huiles hydrauliques, lubrifiants, etc.) peuvent être également indiqués.

14.2 Pièces à conserver par le maître d'ouvrage

Le maître d'ouvrage doit conserver, pour toutes éventuelles interventions ultérieures relatives au forage (expertise, maintenance, réhabilitation, intervention sur pollution éventuelle, contentieux, abandon, etc.), tous les documents ci-après, pendant toute la vie de l'ouvrage jusqu'à son abandon déclaré (voir Article 18).

Tous les éléments du rapport du foreur (points a à f) présenté en 14.1, ainsi que tout ce qui peut permettre d'apprécier la pertinence des travaux engagés en fonction de l'objectif du forage, et d'interpréter les résultats des analyses doivent figurer dans le dossier à conserver.

Outre le dossier remis par le foreur, la liste des informations à conserver et/ou à produire en complément des points a à f précédents, doit être la suivante :

- g) les factures de tous les intervenants sur l'ouvrage ;
- h) l'historique des pompes d'exploitation, des colonnes d'exhaure et des interventions successives sur l'ouvrage ;
- i) les objectifs de l'ouvrage réalisé et l'usage envisagé de l'eau (exploitation agricole, industrielle, AEP collectif ou privatif, surveillance, etc.) ;
- j) le cahier des charges défini par le bureau conseil et/ou le maître d'ouvrage, ainsi que l'argumentaire justifiant les ajustements, modifications en cours de chantier et les choix retenus *in fine* ;
- k) une fiche signalétique comportant : numéro d'identification du forage, cote NG (NGF ou autre référentiel local pour les DOM-TOM) du rebord du tube repère et du sol, lorsque le forage a fait l'objet d'un nivellement ;
- l) le dossier administratif préalable à la réalisation des travaux de forage et de pompage ;
- m) pour les forages sur sites relevant de la réglementation des ICPE, un plan de localisation précis à grande échelle (type cadastre par exemple), prenant en compte les accès et tous les aspects d'occupation du sol et du sous-sol dans l'environnement proche de l'ouvrage ;
- n) les éventuelles mesures de déviations du forage si elles ont été souhaitées et réalisées ;
- o) le profil géologique, lorsqu'il a été établi par un géologue, associé à la coupe technique, ainsi que le(s) type(s) d'aquifère(s) traversé(s) ;
- p) les profils de productivité au micro-moulinet et des éventuelles diagraphies, instantanées ou différées, si elles ont été réalisées (voir Annexe A) ;
- q) les mesures des pompages d'essais (selon le type d'ouvrage) et leurs interprétations et l'évaluation de l'incidence du nouveau forage sur la ressource des eaux souterraines et sur la productivité des forages les plus proches ;
- r) si elle a été établie par un bureau d'étude conseil du maître d'ouvrage, une note argumentée précisant les conditions à respecter pour l'exploitation du forage ;
- s) les résultats d'une éventuelle inspection par vidéo caméra, si elle a été réalisée ;
- t) la liste des substances et paramètres analysés et les résultats analytiques faisant état de la qualité des eaux souterraines lors de la remise du forage ;
- u) toutes autres informations qui pourraient être utiles.

57

NF X 10-999

14.3 Rapport de fin de travaux pour les forages abandonnés

Un rapport de fin de travaux relatif à l'abandon définitif (article 18) d'un forage existant devant être abandonné est communiqué au préfet, pour chaque ouvrage concerné, deux mois maximum après les travaux de comblement. La liste des informations à produire par le maître d'ouvrage est la suivante :

- la référence de l'ouvrage abandonné (numéro BSS fourni par le BRGM et sa date de création) et sa localisation précise ;
- la date de la réalisation des travaux de comblement ;
- le ou les aquifères précédemment exploités ou surveillés, ainsi qu'une coupe géologique des formations lithologiques traversées par le forage ;
- une coupe technique du forage et des informations sur l'état des cuvelages, tubages, crépines, cimentation, etc., avant son abandon ;
- les techniques et les méthodes qui ont été utilisées pour le comblement ainsi que l'argumentaire des choix retenus ;
- une coupe technique montrant le forage après comblement.

Les forages qui ne sont pas conservés immédiatement après les travaux de foration et donc non équipés, doivent être comblés dès la fin de travaux. Les modalités de comblement figurent cependant dans le rapport de fin de travaux.

15 Exploitation

Le propriétaire de l'ouvrage ou son exploitant doit veiller à :

- conserver les documents caractérisant l'ouvrage (cahier des charges, rapport de réception, de fin de travaux, etc.) et rendant compte de son mode d'exploitation (registre, cahier de bord) ;
- exploiter l'ouvrage conformément aux préconisations (débit, rabattement, etc.) déterminées à l'issue des pompages d'essai ;
- positionner la pompe en dessous du rabattement final en prenant une marge de sécurité tenant compte des variations pluriannuelles de la nappe ;
- maintenir l'aspiration au-dessus de la cote à ne pas dénoyer ;
- éviter la création de courant de corrosion par mise en contact d'alliages différents entre le forage et les équipements de pompage ; à cet effet, un joint diélectrique doit être placé dans les zones à risque de contact ;
- éviter les utilisations «saccadées» en privilégiant des plages de pompage plus étendues (débit moindre sur un temps plus long).

15.1 Respect absolu du débit d'exploitation

Chaque forage est livré avec un débit d'exploitation qu'il ne faut jamais dépasser, même très temporairement. Il y a risque de détérioration à la fois de la pompe et de la colonne d'exhaure, mais aussi des crépines et du forage lui-même.

Il convient de tenir compte de ce débit d'exploitation pour la position et le dimensionnement de la pompe. Si les conditions d'exploitation de la nappe changent de façon significative, soit naturellement soit à la suite de prélèvements au voisinage, le débit d'exploitation peut être revu à la baisse.

15.2 La pompe immergée

Il est impératif de respecter les préconisations du constructeur, notamment :

- ne pas dépasser le nombre maximal de démarrages par heure ;
- ne pas chercher à se placer sous le débit minimal de fonctionnement préconisé ni, bien sur, au-delà du débit maximal ;
- ne pas faire fonctionner en eau trop chargée de particules.

Il est préconisé également d'effectuer les contrôles suivants :

- bon fonctionnement du clapet anti-retour de la pompe, au moins une fois par an ;
- paramètres électriques de la pompe, qui sont de bons indicateurs indirects de dysfonctionnements (consommation électrique, puissance, tension, intensité absorbée, résistance entre phases, fréquence en sortie de variateur, isolation électrique du câble et du moteur), au moins tous les trimestres ;
- bon fonctionnement des électrodes de niveau (basse et haute), au moins annuellement.

NOTE Dans le cas où la pompe est raccordée à un réservoir de pression (anti-bélier), il convient de vérifier le volume d'air, au moins tous les trimestres.

15.3 Suivi des volumes prélevés

L'exploitant doit noter sur un registre les volumes mensuels et annuels prélevés. Le suivi des volumes prélevés doit respecter les prescriptions du 16.1.

15.4 La colonne d'exhaure

L'exploitant doit contrôler visuellement l'état de la tête de colonne et à chaque remontée de pompe l'état des tubages (traces de corrosion, de dépôts intérieurs ou extérieurs), des brides ou des filetages. Le contrôle régulier de la pression en tête de forage peut permettre de déceler d'éventuels percements de la colonne d'exhaure.

16 Surveillance et maintenance de l'ouvrage d'exploitation

La surveillance de l'ouvrage appartient au maître d'ouvrage.

Les forages et sondages, qu'ils soient utilisés pour des prélèvements d'eau ou de chaleur ou pour effectuer la surveillance des eaux souterraines (en termes de qualité et de quantité) doivent être régulièrement surveillés et maintenus en bon état.

La maintenance du forage d'eau dépend essentiellement de la qualité physico-chimique de l'eau souterraine pompée.

Suivant sa qualité physico-chimique, il faut prévoir un nettoyage périodique plus ou moins rapproché : dessablage, dé colmatage... De plus, un soin particulier doit être apporté à la pompe immergée qui ne doit, en aucun cas, pomper du sable ou être dénoyée.

16.1 Généralités

L'ouvrage doit être surveillé et entretenu pour :

- garantir la protection de la ressource en eau souterraine vis à vis du risque de pollution par les eaux de surface ;
- empêcher le mélange des eaux de différents aquifères ;
- éviter tout gaspillage d'eau.

NF X 10-999

L'ouvrage doit être équipé d'un compteur volumétrique, ne disposant pas de possibilité de remise à zéro. Le gestionnaire de l'ouvrage doit consigner dans un registre, les données suivantes :

- les périodes d'exploitation si les prélèvements n'ont pas lieu en continu (dates de début et de fin pour chaque période d'exploitation) ;
- les volumes prélevés mensuellement et annuellement, ainsi que le relevé de l'index du compteur volumétrique.

Ce compteur doit être régulièrement entretenu, contrôlé et si nécessaire, remplacé, de façon à fournir en permanence une information fiable.

Chaque ouvrage d'exploitation doit faire l'objet de contrôles périodiques, portant sur les points suivants :

- a) suivi de la qualité de l'eau extraite

Selon l'utilisation de l'eau extraite, sa qualité doit être suivie par des analyses régulières et selon un programme adapté à l'usage.

- b) Le contrôle de la productivité du forage

Effectuer régulièrement une mesure du débit et du niveau d'eau en pompage (ou pression lue sur un manomètre placé en tête du forage), dans des conditions de test identiques (même durée de pompage, même durée d'arrêt préalable). La fréquence est à adapter si une diminution de la productivité est constatée.

Si la ressource diminue, naturellement ou à cause de prélèvements au voisinage, l'exploitant doit en tenir compte dans la gestion de son installation.

Dans le cas où la baisse de productivité est imputable à l'ouvrage, il doit être effectué des opérations réparatrices.

- c) Le pompage d'essai par paliers annuellement et comparaison avec l'ensemble des essais antérieurs.

- d) Le contrôle du sommet du gravier :

Si la configuration du forage le permet, effectuer au moins une fois par semestre le contrôle du sommet du gravier additionnel. Si ce niveau diminue régulièrement cela traduit soit la création de cavités dans le terrain, soit un entraînement de particules du terrain et/ou du massif filtrant.

- e) Le contrôle de l'intégrité de la tête de forage :

Il est recommandé de vérifier tous les ans l'état, la stabilité, l'étanchéité de la tête du forage ou de la cave de la tête du forage.

- f) Le contrôle du fond du forage :

Il est recommandé d'effectuer le contrôle du fond du forage régulièrement. Un comblement brutal ou progressif du forage traduit un dysfonctionnement qu'il faudra traiter. Le contrôle se fait généralement avec une sonde lestée.

Le gestionnaire de l'ouvrage doit tenir à jour un cahier de bord précisant pour chaque opération de contrôle : la date d'intervention, le type de contrôle effectué et les constats réalisés. Pour les interventions confiées à un tiers, il doit consigner en plus la raison sociale de l'entreprise.

Dans le cas où le contrôle révèle la nécessité d'effectuer une opération d'entretien, le cahier de bord doit également comporter les informations suivantes : la date d'intervention pour l'entretien, le type d'intervention.

Ce cahier doit également faire état de toute anomalie survenue en phase d'exploitation.

16.2 Mesures spécifiques à certains ouvrages

Cas particulier des forages inclus dans un périmètre de protection d'un captage servant à l'alimentation en eau potable ou de forages traversant plusieurs aquifères superposés :

Le contrôle de l'état intérieur du forage se fait par une inspection par caméra immergée et/ou par toute autre méthode adaptée. Il porte en particulier sur l'état et la corrosion des matériaux tubulaires. La périodicité du contrôle dépend de la situation et du type d'ouvrage. Elle est au minimum de 10 ans pour les forages situés dans un périmètre de protection de captage AEP ainsi que pour les forages traversant plusieurs aquifères superposés. Le préfet peut imposer d'autres périodicités.

Ces inspections doivent être enregistrées dans le cahier de bord.

Conformément à l'Article 11 de l'arrêté du 11 septembre 2003, un compte-rendu de chaque inspection doit être adressé au préfet dans un délai de trois mois à compter de la date d'intervention.

17 Réhabilitation

17.1 Les contrôles préalables

Avant toute intervention de réhabilitation de forage, il convient de définir précisément l'état de l'ouvrage, les problèmes dont il souffre et leurs causes.

Les rapports de chantier, les coupes géologiques et techniques, comme tout autre document pouvant apporter de précieux renseignements doivent être consultés et analysés.

Plusieurs techniques de diaggraphie permettent de réaliser une fiche signalétique d'un forage existant.

17.1.1 Le contrôle par caméra (obligatoire)

Le contrôle du forage par caméra immergée couleur représente l'étape préliminaire indispensable à toute intervention de réhabilitation.

Cette intervention permet de :

- définir l'état général du forage ;
- relever les cotes précises des différents éléments constitutifs de l'ouvrage ;
- repérer les zones fragilisées ou posant problème ;
- observer un développement de micro-organismes ;
- vérifier l'absence d'obstruction et/ou d'écrasement du tubage.

17.1.2 Les autres diaggraphies (non systématiques)

De nombreux contrôles peuvent être effectués afin de connaître la structure d'un forage existant. Ces diaggraphies doivent être effectuées lorsqu'elles permettent de lever un doute concernant l'origine de problèmes rencontrés sur un ouvrage.

Le contrôle de flux en pompage peut s'avérer utile notamment dans les régions à aquifères superposés.

NF X 10-999

Notons, de façon non exhaustive, les éléments contrôlables sur un forage existant :

- le diamètre intérieur de l'ouvrage ;
- la qualité et les cotes de la (ou des) cimentation(s) ;
- la nature des terrains traversés ;
- la position des différentes arrivées d'eau ;
- le débit et la qualité de chaque arrivée d'eau ;
- etc.

17.2 La réhabilitation

Suivant l'état et la conception d'origine du forage, plusieurs types de réhabilitation peuvent être proposés :

17.2.1 Réhabilitation sans modification de la structure du forage

Au cours du temps, différents phénomènes peuvent engendrer des problèmes sanitaires ou/et des baisses de débits sur des forages :

- développement de micro-organismes et de gels bactériens ;
- encroûtement des tubes (crépines et pleins) par dépôt de métaux tels que les hydroxydes de Fer et/ou de manganèse, etc. ;
- obturation des crépines par dépôts ;
- corrosion légère des tubages ;
- etc.

Traités à temps, ces problèmes peuvent être résolus avant que la structure du forage ne soit en danger.

Dans cette situation, la démarche de réhabilitation consiste en un traitement chimique, adapté à chaque cas, associé à un traitement mécanique (brossage et curage air lift).

L'efficacité des opérations devra être contrôlée par un test de pompage comparatif avant et après traitement, avec analyse d'eau pour le cas d'un développement de micro-organisme. La réception des travaux par caméra immergée couleur est recommandée.

17.2.2 Réhabilitation avec modification de la structure du forage

a) Rechemisage

Certains problèmes graves peuvent subvenir sur des forages mal conçus, mal entretenus, ou vieillissants :

- corrosion importante des tubages ;
- perforation de tubages pleins ou crépinés ;
- défaut de cimentation ;
- nécessité de séparer les aquifères mis en relation ;
- etc.

La résolution de ces problèmes nécessite la modification de la structure du forage.

NF X 10-999

Dans ce cas de figure, la démarche de réhabilitation peut consister (notamment lors de dépôts corrosifs) dans un premier temps à traiter la cause du problème avec un traitement chimique adapté à chaque cas, associé à un traitement mécanique (brossage et curage air lift).

En général, la réhabilitation proprement dite consiste à effectuer le rechemisage de l'ouvrage avec des tubages pleins et crépinés de diamètre inférieur à ceux existants. Ces nouveaux équipements permettront notamment la mise en place de nouveaux massifs de gravier et la réalisation de nouvelles cimentations.

L'efficacité des opérations peut être utilement contrôlée par caméra immergée couleur et par diagraphies, notamment de flux.

b) Rééquipement

Dans certains cas extrêmes l'ensemble de la structure du forage doit être remplacé, notamment lors :

- d'une impossibilité de réduire le diamètre utile du forage existant ;
- d'un état général trop critique ;
- etc.

Après avoir mis en sécurité le forage (protection de l'aquifère et assurer la stabilité du forage), on procède alors au surforage et/ou au fraisage et/ou à l'extraction du ou des tubages.

Le forage trou nu est ensuite reconditionné pour être rééquipé avec de nouveaux tubages.

Dans ce cas de figure, le contrôle des travaux s'effectue à chaque étape de façon similaire aux contrôles réalisés lors d'un nouveau forage.

18 Fermeture temporaire ou définitive (abandon)

Tout forage d'eau est un axe potentiel de pollution creusé dans le sol vers une nappe.

Au fil du temps, la structure d'un ouvrage abandonné va se détruire notamment par corrosion des tubages et mettre en communication toutes les formations géologiques au droit du forage. On risque des mélanges d'eaux de qualités différentes ainsi que des apports d'eaux de surface potentiellement polluées.

Lorsqu'un forage cesse d'être utilisé (arrêt du pompage pour les forages de prélèvement, arrêt d'exploitation des sondes géothermiques verticales, arrêt de la surveillance pour les piézomètres ou les qualitomètres) que ce soit pour des raisons techniques ou économiques, il doit être mis en sécurité.

18.1 Arrêt temporaire d'exploitation

18.1.1 Si l'arrêt temporaire d'exploitation est inférieur à deux ans :

La fermeture consiste à étancher et à sécuriser la tête de l'ouvrage, après si possible un retrait de la pompe et des accessoires placés dans le forage. Les carburants nécessaires au pompage et autres produits susceptibles d'altérer la qualité des eaux sont évacués du site ou stockés dans un local étanche.

Le dispositif est conservatoire et permet la reprise ultérieure de l'exploitation et/ou la pose ou l'utilisation d'appareils de mesures (piézomètres) ou de contrôle (prélèvements d'échantillons d'eau).

18.1.2 Si l'arrêt temporaire d'exploitation est supérieur à deux ans :

Après s'être conformé aux prescriptions du 18.1.1, l'intégrité de l'ouvrage devra être vérifiée par des moyens appropriés. En cas d'anomalie, le maître d'ouvrage devra procéder à la mise en conformité de son ouvrage. En cas d'arrêt supérieur à cette nouvelle période, l'intégrité de l'ouvrage devra être vérifiée au moins tous les 10 ans.

63

NF X 10-999

L'arrêt temporaire d'exploitation ne peut pas être envisagé si :

- l'ouvrage est endommagé (perforations du tubage par corrosion, écrasement des crépines, etc.) ;
- l'ouvrage n'est pas conforme à la réglementation : infiltration d'eaux de surface, mélange de deux nappes distinctes.

Dans ces deux cas, soit les ouvrages seront réhabilités, soit ils feront l'objet d'une fermeture définitive.

Le compte rendu de fin de travaux relatif à la fermeture temporaire d'un forage est à conserver par le maître d'ouvrage.

18.2 Fermeture définitive (abandon)

Si l'arrêt est définitif (abandon) ou si le forage est non conforme à la réglementation, son propriétaire doit le faire combler par des techniques appropriées, dont l'efficacité n'est pas remise en cause avec le temps et qui permettent de garantir l'absence de circulation d'eau et l'absence de transfert de pollution.

Le comblement vise à pérenniser l'étanchéité initiale entre les différents aquifères traversés ainsi qu'à prévenir toute pollution de ces aquifères à partir de la surface.

Les modalités de comblement varient avec la géométrie (profondeur, diamètre) et le type de forage, y compris les forages/sondages de reconnaissance.

18.2.1 Dispositions communes

Dans tous les cas, les pompes et tous accessoires situés dans le forage sont définitivement évacués du site, ainsi que tous les carburants et autres produits situés près de la tête du forage, susceptibles d'altérer la qualité des eaux.

Lorsque des présomptions existent sur des dégradations existantes de l'ouvrage ou sur la présence de produits ou matériaux potentiellement polluants dans le forage, il est préconisé d'effectuer des contrôles :

- contrôle du fond afin de vérifier dépôts et éboulements ;
- contrôle vidéo afin de vérifier l'état des tubages et crépines ainsi que la présence éventuelle d'objets dans le forage ;
- vérification de la qualité de la cimentation annulaire par diagraphie (de type CBL).

Si des objets sont tombés dans le forage, ils devront être extraits. De même pour les dépôts, s'ils peuvent présenter un risque environnemental.

Le ciment doit être compatible avec la qualité chimique de l'eau.

L'exploitant informe le préfet et l'agence de l'eau concernée, le BRGM au plus tard dans le mois suivant la décision de cessation définitive des prélèvements.

Pour les forages situés à l'intérieur d'un périmètre de protection de captage utilisé pour l'alimentation en eau potable, les travaux prévus pour la remise en état des lieux sont portés à la connaissance du préfet trois mois avant leur démarrage.

Pour tous les forages, un rapport de travaux est adressé au préfet dans un délai de deux mois suivant la fin des travaux de comblement, avec les références de l'ouvrage comblé, l'aquifère précédemment surveillé ou exploité à partir de cet ouvrage, les travaux de comblement effectués. Cette formalité met fin aux obligations d'entretien et de surveillance de l'ouvrage.

Il faut conserver les coordonnées x,y de la localisation de l'ouvrage abandonné.

18.2.2 Comblement d'ouvrages conformes au présent document

Les ouvrages réalisés selon les prescriptions du présent document doivent être comblés sur toute la hauteur aquifère avec des sables et graviers siliceux, désinfectés, surmontés d'un bouchon d'argile gonflante ou d'un lit de sable puis d'une cimentation jusqu'à la surface du sol sauf nécessité particulière (usage agricole par exemple).

La hauteur du bouchon de cimentation ne doit pas être inférieure à 5 m ou à la hauteur du tube plein s'il fait moins de 5 m.

18.2.3 Comblement d'ouvrages non conformes au présent document

Dans ce cas, leur comblement doit permettre de respecter la protection de la ressource et éviter toute pollution ; par exemple pour séparer durablement les aquifères entre eux pour les ouvrages captant plusieurs nappes.

Le programme d'abandon sera défini selon les résultats du diagnostic (voir 18.2.1).

19 Prescriptions pour les forages d'eau à usage géothermique**19.1 Présentation d'un système type pour une opération de géothermie sur aquifère**

Le forage d'eau, dans un système géothermique permet le prélèvement de chaleur ou de froid depuis l'aquifère vers des locaux à chauffer ou à refroidir, avec l'assistance ou non d'une PAC. Il existe différentes configurations de systèmes d'exploitation (forage(s) avec ou sans rejet en nappe, doublet/ triplet et forages multiples).

NOTE 1 Pour des questions de développement durable, le rejet en nappe est privilégié par rapport aux autres types de rejets prévus actuellement par la loi.

NOTE 2 La réglementation relative à la géothermie est en cours de modification. Les changements envisagés sont importants, en particulier concernant le code minier. Il est recommandé aux maîtres d'ouvrage de se rapprocher des services locaux (départementaux et régionaux) en charge de l'instruction des dossiers de déclaration et d'autorisation.

19.2 Rôle des acteurs

On peut distinguer deux intervenants principaux sur la mise en œuvre d'un doublet de forages, chacun ayant des tâches bien spécifiques ou transverses, raison pour laquelle le cahier des charges doit être clair sur le rôle de chacun :

- **le bureau d'études techniques (BET)**, spécialiste du sous-sol :
 - conçoit l'installation souterraine ;
 - définissent la nature du sous-sol, la ressource en eau exploitable et les risques potentiels liés à la protection de l'environnement ;
 - rédigent les documents administratifs et les cahiers des charges ;
 - Contrôlent la bonne réalisation des travaux ;
 - remplit et signe le procès-verbal de réception (modèle annexé) au présent document.

NOTE Un BET spécialiste du génie climatique devra déterminer les besoins énergétiques du projet ainsi que la définition des installations de surface.

- **l'entreprise de forage** :
 - réalise les travaux de forage ;
 - en l'absence de BET, il conçoit l'installation souterraine (nombre de forages, profondeur, diamètre, zones à capter) ;

NF X 10-999

- assure la procédure de déclaration du forage au titre de l'article L411.1 du code minier et s'assure que le Maître d'Ouvrage a bien respecté la procédure de déclaration ou d'autorisation du forage ;
- prend en compte le cahier des charges fourni par le BET sous-sol ;
- met en œuvre les techniques de forage adaptées aux terrains et à la profondeur à forer ;
- réalise un rapport de forage, signe un procès-verbal de réception (modèle annexé).

19.3 Prescriptions pour la réinjection (puits, dimensionnement, essai injection, pompe, tête de puits)

Le dimensionnement du doublet est dépendant de la ressource et des paramètres hydrodynamiques et thermique de l'aquifère. Il doit s'efforcer de minimiser le recyclage thermique pouvant induire une dégradation de la performance énergétique du système.

Il est nécessaire de calculer la distance entre les puits afin d'éviter une interférence thermique et hydraulique (temps de percée) entre le puits de production et le puits de réinjection. Le puits d'injection se situe à l'aval du puits de prélèvement, suivant le sens d'écoulement de la nappe.

Indépendamment de la réalisation, les données hydrogéologiques peuvent indiquer les risques de difficultés de réinjection (niveau statique proche du sol, perméabilité faible, qualité de l'eau). Il est toutefois impératif de réaliser un essai de réinjection afin de contrôler la capacité d'infiltration des terrains et de dimensionner le dispositif de pompage-réinjection.

Cet essai peut être réalisé soit au terme de la réalisation des deux forages, soit après le premier forage sous réserve d'avoir un approvisionnement en eau suffisant pour le réaliser.

Cet essai définit les éléments complémentaires de dimensionnement de l'installation suivants :

- pression d'injection et dimensionnement de la pompe ;
- tête de réinjection ;
- colonne d'injection.

La colonne d'injection doit être descendue en dessous du niveau statique.

19.4 Surveillance et maintenance

Les ouvrages du sous-sol (forage, équipement de pompage, colonne d'exhaure, appareillages de mesure et de régulation, etc.) doivent faire l'objet d'une surveillance adaptée et régulière, et d'entretien.

19.4.1 Paramètres de surveillance à prendre en compte

Le programme de surveillance doit être défini en fonction d'un certain nombre de paramètres tels que :

- les conditions d'utilisation des forages (périodicité, débit, volumes totalisés) ;
- les niveaux d'eau ;
- la qualité de l'eau prélevée ;
- la température de l'eau prélevée et réinjectée ;
- la pression de réinjection.

NF X 10-999

19.4.2 Équipements nécessaires

L'installation doit être équipée à minima :

- des systèmes de mesure et d'enregistrement en continu des niveaux (puits producteur et injecteur) et du débit de prélèvement ;
- des sondes de température placées sur les circuits primaire, en entrée et en sortie ;
- robinet de prélèvement placé sur le forage de production pour contrôler la qualité de l'eau (analyse chimique) ;
- d'un filtre dimensionné en fonction de l'analyse chimique de l'eau.

19.4.3 Contrôles et mesures périodiques à effectuer

Pour chaque installation géothermique, une surveillance et des mesures périodiques doivent être effectuées (a minima annuellement) sur les points suivants :

- dépouillement des données enregistrées en continu sur l'année. Il doit être réalisé a minima annuellement ;
- retracer impérativement chaque année les nouvelles courbes « débit-rabatement » et « débit-réinjection » et ce, dès la mise en service de l'installation (État zéro). Leur analyse permet de détecter les colmatages éventuels des ouvrages et d'engager les actions préventives et curatives. En cas d'anomalies suspectées, un pompage d'essai ou un test d'injection sera réalisé ;
- vérification du filtre placé sur le forage avant le compteur d'eau et nettoyage si nécessaire ;
- vérification de la perte de charge de l'échangeur placé entre le forage et la PAC ;
- vérification du bon fonctionnement de la pompe du forage ;
- contrôle visuel de la qualité de l'eau (échantillon prélevé avant filtration) et contrôle de la présence de dépôts dans le filtre ;
- dans des cas particuliers, en fonction des risques identifiés, contrôle des paramètres physico-chimiques des eaux pompées et rejetées (mesure de la température, du pH et de la conductivité électrique, analyse bactériologique, fer, manganèse, sulfates, hydrogénocarbonate...).

En complément de ces mesures, il est préconisé pour les installations hors particulier, de prévoir des inspections endoscopiques des forages ponctuelles a minima tous les 10 ans. Pour plus de facilité, ces inspections doivent être réalisées lors des opérations de remplacement des pompes.

19.4.4 Entretien

Les opérations d'entretien sur des forages de captage et de réinjection sont déterminées en fonction des observations réalisées lors des opérations de surveillance (chute du débit spécifique, colmatage du filtre...).

20 Forage eau minérale et eau de source**20.1 Préparation administrative**

- a) Si les travaux de sondage ou travaux souterrains se situent dans le périmètre de protection d'une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public, ils sont soumis à une procédure d'autorisation préfectorale préalable, prévue aux articles L.1322-4 et R.1322-23 et suivants du code de la santé publique.

67

NF X 10-999

- b) Si les travaux peuvent altérer une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public, les travaux peuvent être suspendus en application des articles L.1322-5 du code de la santé publique.
- c) Dans le périmètre de protection d'une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public, l'exploitant de la source peut être autorisé à effectuer les travaux dans le terrain d'autrui dans les conditions prévues aux articles L.1322-8 à L.1322-12 du code de la santé publique.

NOTE La composition des dossiers de demande d'autorisation est précisée par un arrêté du 26 février 2007, 5 mars 2007 et par arrêté du 20 juin 2007.

20.2 Installation de chantier - Sécurité et protection de l'environnement

La zone de travail doit être clôturée pour des raisons de sécurité et pour en limiter l'accès aux animaux. En cas d'implantation d'un vestiaire (cabane) de chantier, celui-ci ne doit pas se situer à moins de 25 m des travaux de réalisation du forage.

Toute installation sanitaire ne doit pas non plus être implantée à une distance de moins de 50 m du lieu de la réalisation du forage.

L'utilisation de toilettes chimiques doit respecter les normes en vigueur.

Le stationnement des véhicules de transport doit être prévu à une distance sécurisée du lieu de forage. Une plate-forme de chantier doit être aménagée et une voie d'accès prévue permettant à la fois un accès facilité à l'approvisionnement de matériel et au positionnement de l'équipement nécessaire à la réalisation du forage.

Il est recommandé de réaliser une plate-forme sur géotextile ou feutre étanche, avec une pente permettant l'évacuation des fluides, un fossé drainant étanche en pourtour avec raccordement sur bac dégraisseur.

Une attention particulière devra être portée sur la plate-forme de chantier lors de la manutention des hydrocarbures, lubrifiants et graisses, pour éviter tout déversement accidentel. Il est recommandé de stocker ces produits chimiques sur des zones de rétention appropriées et de disposer sur chantier d'une réserve de papier oléophile absorbant en quantité suffisante.

La maintenance du matériel (par exemple de la machine de forage, des groupes électrogènes) est à éviter sur la plate-forme.

À titre de précaution, il convient de ne pas réaliser les travaux en cas de contextes climatique ou hydrologique pouvant être néfastes ou engendrer des risques potentiels de pollution. Il est recommandé de veiller à l'absence de nuisance de pollution de voisinage (par exemples : brûlis en cours, incinération de déchets, etc.).

20.3 Précautions d'hygiène

Toutes les mesures possibles doivent être mises en œuvre pour limiter les risques de contamination de la ressource pendant l'exécution d'un nouveau forage. Il convient au minimum de :

- désinfecter avant utilisation tous les équipements de forage participant à la circulation du fluide de forage ou au creusement (outils, tiges, flexibles, câbles, pompes, réservoirs, tubes provisoires...) ;
- y compris les équipements permanents tels que les casings, tubes, crépines, massif filtrant, accessoires (centreurs, cône, ...) ;
- et de les stocker proprement, soit sur des tréteaux, soit sur des aires adaptées ;
- fournir des vêtements et des gants propres aux ouvriers sur site qui manipulent le matériel ;
- le creusement de borbier n'est envisageable qu'en cas d'absence d'impact sur les ressources. Il est préférable d'utiliser des bacs étanches et d'évacuer les boues et produits chimiques vers un centre spécialisé.

Les méthodes de désinfection doivent avoir été spécifiées dans le cahier des charges.

20.4 Techniques de forage

Les dispositions du paragraphe 6.1 s'appliquent.

En fonction du contexte hydrogéologique, il est recommandé de prévoir une évaluation des arrivées d'eau en cours de forage incluant :

- leur localisation en profondeur ;
- leur quantification avec une mesure du débit de toute nouvelle arrivée d'eau ;
- des prélèvements d'échantillons pour réaliser des analyses qualitatives.

Toutes ces informations recueillies en cours de forage permettront une meilleure définition de la coupe technique finale de l'ouvrage (niveaux à cimenter, positionnement des crépines).

Les principales techniques de forage utilisées dans ce domaine sont l'Odex, le marteau fond de trou, le battage et le rotary à l'eau/air.

Quelque soit la technique de forage retenue et lorsque cela est approprié, il est préconisé l'utilisation de lubrifiants compatibles à l'usage alimentaire (par exemple pour le graissage des tiges).

20.5 Fluides de forage

20.5.1 Forage à base d'eau

Dans certaines formations il peut être intéressant d'utiliser un fluide de forage à base «d'eau claire» en utilisant de l'eau potable du réseau AEP ou, si possible, une eau de mêmes caractéristiques physico-chimiques que celles recherchées, produites par un forage existant.

Si un additif est nécessaire pour améliorer les propriétés de la boue (densité, viscosité, filtrat), alors il est plutôt recommandé d'employer une base minérale telle que la bentonite.

L'utilisation des boues avec polymères n'est pas adaptée aux forages en vue de capter de l'eau minérale naturelle ou de l'eau de source du fait de l'introduction possible d'une contamination bactériologique.

Le programme boue et les moyens de contrôles doivent être détaillés dans le cahier des charges.

20.5.2 Forage à l'air

Cette technique présente l'avantage de remonter des cuttings propres ainsi que celui de faciliter l'analyse qualité des venues d'eau, à condition que l'air comprimé soit filtré pour limiter les risques de contamination par les lubrifiants.

Il doit être pris en considération que l'air n'étant pas exempt de pathogènes, cette technique présente également des risques, même si ces éléments ne sont pas maîtrisables par le foreur (exemple : problèmes liés à une proximité de cultures, feu, de gaz d'échappement, etc.).

20.5.3 Forage à la mousse

La technique du forage à la mousse n'est pas adaptée aux forages en vue de capter de l'eau minérale naturelle ou de l'eau de source, du fait de l'introduction possible d'éléments bactériologiques.

NF X 10-999

20.6 Matériaux et équipements

20.6.1 Généralités

La qualité des tubes et des crépines de l'ouvrage d'exploitation doit être adaptée à l'usage et à la chimie des eaux prélevées, impliquant généralement :

- l'usage d'équipements en acier inoxydables appropriés ;
- le contrôle et la prévention de la corrosion par des traitements tels que le décapage / passivation et éventuellement le traitement thermique ;
- le nombre de soudures doit être limité autant que possible et leur qualité doit assurer une bonne tenue mécanique ainsi qu'une faible rugosité ;
- la surface des équipements doit être propre, avec une rugosité faible adaptée à l'usage alimentaire.

Les caractéristiques techniques des équipements doivent être précisées dans le cahier des charges :

- procédé de fabrication ;
- diamètre, longueur unitaire, épaisseur, et les tolérances associées ;
- type de connexion ;
- résistance à la traction et collapse ;
- certificat matière.

20.6.2 Tubes

Les tubes "roulés-soudés" en éléments courts ne sont pas conseillés du fait du nombre important de soudures circulaires. Les tubes "soudés longs" du commerce (en 6 ou 9 ou 12 m) sont préférables, avec une seule soudure longitudinale réalisée au plasma avec une pleine pénétration et une surface plus lisse. Ces tubes de normes EN ou ASTM sont décapés et passivés et peuvent être recuits.

L'épaisseur des tubes doit être compatible avec :

- la contrainte verticale maximale appliquée lors de leur mise en place dans le forage : résistance à la traction ;
- la contrainte horizontale maximale générée lors de la phase cimentation : collapse.

Ces valeurs doivent être précisées dans le cahier des charges, ainsi que le coefficient de sécurité considéré.

20.6.3 Crépines

Les caractéristiques du paragraphe 7.3 s'appliquent.

Toutes ces caractéristiques doivent être mentionnées dans le cahier des charges.

20.6.4 Raccords des tubes et des crépines

Afin d'éviter tout risque de micro-cavités favorable à l'agglomération de bactéries, la soudure à l'argon est recommandée.

La technique de type TIG (soudure à l'arc avec électrodes non fusibles) sous argon est recommandée, mais en fonction de l'épaisseur des éléments, elle peut être associée à la technique du MIG.

Les qualifications du soudeur, la méthode utilisée ainsi que les éléments techniques (chanfreins, métal d'apport, gaz...) doivent être détaillés dans le cahier des charges.

NF X 10-999

Un contrôle des soudures peut être effectué par radiographie, afin de s'assurer de leur qualité (étanchéité, pénétration, absence de fissure).

20.6.5 Massif de gravier - Massif filtrant autour de la crépine

Les caractéristiques du paragraphe 7.6 s'appliquent.

Un massif filtrant artificiel doit être propre et désinfecté.

Ce filtre est mis en place autour des crépines par injection au travers d'un tubing descendu dans l'espace annulaire, ou par circulation sous pression avec un cross over tool.

20.7 Cimentation

Les dispositions de l'Article 8 s'appliquent.

L'utilisation d'argiles gonflantes n'est pas recommandée.

Le contrôle de la qualité de la cimentation doit comprendre les opérations suivantes :

- mesure de la densité du laitier ;
- évaluation de son homogénéité ;
- comparer le volume injecté avec le volume théorique ;
- contrôler l'arrivée du laitier jusqu'à la surface si la cimentation est réalisée en une seule passe ;
- mesurer la pression finale d'injection en cas de cimentation sous pression ;
- mesure de l'adhérence tube/ciment/formation.

NOTE Les caractéristiques techniques du tube à cimenter doivent être comparées aux valeurs de pression (théorique et mesurée en cours d'opération) pour limiter les risques de collapse du tube.

20.8 Méthodes de développement

Les méthodes de développement sont multiples. Elles ont pour objectif d'éliminer les résidus liés aux travaux de forage, et d'augmenter la perméabilité autour de l'ouvrage.

Dans le domaine de l'eau minérale naturelle, l'eau de source, les techniques de développement mécaniques sont préférées aux techniques chimiques, qui peuvent contaminer la ressource captée. Ces dernières ne sont utilisées qu'en dernier ressort.

Les méthodes de développement mécaniques utilisées dans l'eau minérale et l'eau de source sont nombreuses : air lift, brossage, pistonnage, jetting, pompage alterné, surpompage ou autres.

NOTE Il est rappelé que les techniques de développement à base d'air comprimé sont susceptibles d'engendrer des pollutions issues de l'air et des huiles résiduelles du compresseur. Il est important de prendre la précaution d'extraire ces huiles (par exemple par absorption ou en équipant le compresseur d'un filtre à hydrocarbures et un filtre à bactéries).

20.9 Pompage d'essai – protocole et suivi

Les prescriptions de l'Article 11 s'appliquent.

Un monitoring spécifique peut être mis en place pendant les pompages d'essai en fonction du contexte hydrogéologique, avec par exemple un suivi de paramètres physico-chimiques.

Dans le cadre d'un forage d'eau minérale naturelle, eau de source, la durée de ce pompage est souvent plus longue, de quelques mois à un an. C'est un pompage de qualification.

Les appareils de mesure de débit (compteur) et de niveaux d'eau (sonde) doivent être étalonnés au préalable.

71

NF X 10-999

La désinfection de la pompe, de la colonne d'exhaure de la pompe et celle de la sonde doivent être effectuées et il doit être vérifié que les produits nécessaires à cette désinfection ont bien été éliminés.

20.10 Protection

20.10.1 Protection de la tête de forage

La tête d'un forage non jaillissant doit comprendre notamment une bride étanche, une mise à l'air libre avec filtre.

La bride pleine est usinée de façon à recevoir le câble d'alimentation de la pompe, la colonne d'exhaure, le (ou les) tube(s) guide sonde, avec fermeture par vanne, l'évent pour le filtre antibactérien.

Pour un forage artésien, il faut prévoir une vanne de décharge afin d'évacuer le débit de jaillissement par l'intermédiaire d'une manchette fixée sur une bride latérale.

20.10.2 Protection physique de l'ouvrage

La protection d'un forage doit être réalisée par abri (local en dur) avec les caractéristiques suivantes :

- avec un toit escamotable ou avec une trappe renforcée permettant la manœuvre de la pompe et des tubes ;
- sans fenêtre ou avec fenêtre sécurisée ;
- avec une porte sécurisée (par exemple : codage électronique, blindage, etc.) ;
- avec les murs carrelés sur toute la hauteur et le sol carrelé avec inclinaison (recommandée de 1%) prévoyant un moyen d'évacuation (par exemple drain) ;
- avec une ventilation équipée d'une grille anti-insectes ;
- avec une lampe UV anti-insectes.

Selon les sites d'implantation, il est pertinent de prévoir tous moyens appropriés de mise en sécurité tels que, par exemple, une alarme de détection d'intrusion dans le local, une vidéo surveillance.

NOTE L'ensemble des moyens mis en œuvre pour éviter toute pollution ou toute intrusion doit faire l'objet d'une réflexion sur leur entretien, nettoyage et éventuel remplacement.

20.11 Réception

La réception d'un forage d'eau minérale naturelle, eau de source doit permettre d'évaluer les performances de l'ouvrage et la qualité des travaux réalisés au travers :

- des pompages d'essai : évaluation des pertes de charges du forage, et de sa capacité réelle. Ils permettent aussi d'évaluer le degré de développement du forage ;
- des analyses d'eau complètes pour qualifier la nappe et identifier une éventuelle contamination liée aux travaux de forage (bactéries, hydrocarbures, boue..) ;

NF X 10-999

- d'une inspection vidéo pour valider la coupe technique du forage, la position et la qualité des équipements, la présence éventuelle de dommages (perforation, déformation, rayures, corrosion), présence d'objets tombés dans le forage, propreté des crépines, qualité de la mise en place du massif filtrant, qualité et pleine pénétration des soudures ;
- d'une mesure de micro-moulinet sur toute la hauteur des crépines pour localiser et quantifier les arrivées d'eau. Cette donnée permettra également de calculer les vitesses d'entrée de l'eau dans les crépines ;
- d'une mesure de CBL (Cement Bond Logging) sur toute la hauteur cimentée pour évaluer la qualité de la cimentation ;
- d'une mesure de verticalité et de rectitude du forage ;
- des certificats de matière des équipements mis en place ;
- des analyses granulométriques le cas échéant.

Document de travail

NF X 10-999

Annexe A (informative)

Liste non exhaustive des diagraphies et des contrôles de l'ouvrage en cours de foration

A.1 Diagraphie CBL (Ciment Bond Logging)

Celle-ci permet de préciser l'état de la cimentation. Elle peut être réalisée plusieurs jours après la cimentation. Pour fonctionner, cet outil doit être dans un fluide (eau, boue) et dans un tubage acier ne dépassant pas 13''3/8 de diamètre.

A.2 Diagraphie thermique

Le principe consiste à réaliser un profil thermique dans les 24 h suivant une phase de cimentation. Pour fonctionner le forage doit être en eau ou en boue. La cimentation étant une réaction exothermique, les mesures permettent de localiser le sommet de la zone cimentée.

Cette diagraphie permet également de localiser des venues d'eau si la différence de température est significative.

A.3 Diagraphie gamma ray

L'outil utilise les propriétés des roches en matière de radioactivité naturelle. Cette diagraphie peut être réalisée en trou nu, tubé, sec ou en eau. Il permet de déterminer les zones argileuses et de réaliser des corrélations avec d'autres forages (calage stratigraphique).

L'utilisation de cette diagraphie peut se révéler nécessaire pour un calage fin avant mise en place des tubages par exemple.

A.4 Diagraphie de résistivité

L'outil mesure les différences de potentiel créées par un courant continu injecté dans les formations. Cette diagraphie ne peut être réalisée qu'en trou nu et en eau.

Elle permet la délimitation des couches ainsi que la détermination approximative de la porosité.

A.5 Diagraphie de Polarisation Spontanée

L'outil mesure des différences de potentiel. Cette diagraphie ne peut être réalisée qu'en trou nu et en eau.

Elle permet la délimitation des couches.

A.6 Profil au micro-moulinet

Cet outil mesure la vitesse verticale de l'eau à l'intérieur du forage. Cette diagraphie peut être réalisée en trou nu ou bien tubé (dans ce cas, la localisation des venues d'eau peut être faussée).

Elle permet de localiser les venues d'eau. Généralement, cette diagraphie est réalisée sous pompage.

NF X 10-999

**Légende**

- 1 Fil électrique auto-porteur
- 2 Carcasse en acier
- 3 Électrodes de mesures
- 4 Hélice
- 5 Paroi du forage

Figure A.1 — Exemple de micro-moulinet
(Source documentaire : SFEG)

A.7 Diagraphie à Neutrons

Cet outil détermine l'activité gamma issue de l'absorption de neutrons (créés par l'outil) par les noyaux d'hydrogène. Cette diagraphie peut être réalisée en trou nu ou tubé mais uniquement sur la partie en eau.

Elle permet la détermination de la porosité totale des formations investiguées.

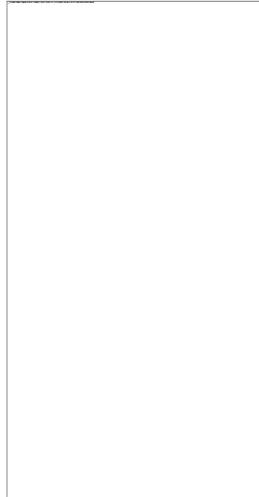
Il convient de noter que cet outil utilise une source radioactive. Son utilisation peut s'avérer délicate notamment en cas de perte dans l'ouvrage.

A.8 Diagraphie diamètreur

Il s'agit d'un outil disposant au minimum d'un bras. Ce bras s'ouvre au diamètre du forage.

75

NF X 10-999



Légende

- 1 Câble électrique auto-porteur
- 2 Forage
- 3 Palpeur électrique
- 4 3 lames ressort
- 5 Partie coulissante

Figure A.2 — Exemple de diamètreur
(Source documentaire : SFEG)

Cette diagraphie permet donc de vérifier les diamètres de l'ouvrage soit en trou nu ou tubé.

Son utilisation peut être recommandée pour :

- vérifier les diamètres intérieurs des tubages mis en place ;
- vérifier l'intégrité des tubages (absence d'écrasement par exemple) ;
- caler les mesures de micro moulinet.

A.9 Diagraphies physico-chimiques

Il existe différentes sondes permettant de mesurer différents paramètres physico-chimiques. Il s'agit par exemple de la conductivité, le pH, le potentiel d'oxydo réduction, l'oxygène dissous ainsi que de certains éléments tels les nitrates.

La réalisation de profils au repos et en pompage peut être utile pour comprendre les circulations d'eau et localiser différentes venues d'eau pouvant avoir des caractéristiques différentes.

A.10 Diagraphie de verticalité ou sonde gyroscopique

Cet outil permet de mesurer la déviation du forage. La mesure peut être réalisée en trou nu ou tubé. Elle permet de vérifier la verticalité de l'ouvrage.

NF X 10-999

A.11 Examen vidéo

Il s'agit d'une caméra immergée descendue dans le forage. Généralement, la tête de la caméra est orientable. Les images sont retransmises sur une régie. Cet examen permet de vérifier la conformité de l'ouvrage et de détecter d'éventuelles anomalies (perçement du tubage, présence de dépôts, etc.).

La réalisation d'un examen vidéo est souhaitable à la réception de l'ouvrage. Au cours du temps, une nouvelle inspection peut être réalisée pour vérifier l'intégrité de l'ouvrage.

Document de travail

NF X 10-999

Annexe B
(informative)

Exemple de feuille de pompage

POMPAGE D'ESSAI : FICHE DE DESCENTE		FEUILLE N°		
Entreprise :		Profondeur forage :		
Nom du forage ou du client :		Type de pompe :		
Lieu du forage :		Profondeur aspiration :		
Commune :		Longueur refoulement :		
	Ouvrage pompé	Piézomètre 1	Piézomètre 2	Dispositif de mesure du débit :
Nature du repère :				
Hauteur du repère/sol : m				
Niveau statique/repère : m				
	Distance/ouvrage pompé :			

NF X 10-999

Date et heure	Tps pompage					
	en minute	Niveau/repère	Débit	Piézomètre 1	Piézomètre 2	Observation
	0					
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					
	9					
	10					
	11					
	12					
	13					
	14					
	15					
	20					
	25					
	30					
	40					
	50					
	60					
	1h15 = 75					
	1h30 = 90					
	1h45 = 105					
	2h = 120					
	2h30 = 150					
	3h = 180					
	3h30 = 210					
	4h = 240					
	5h = 300					
	6h = 360					
	7h = 420					
	8h = 480					
	10h = 600					
	12h = 720					
	14h = 840					
	16h = 960					
	18h = 1080					
	20h = 1200					
	22h = 1320					
	24h = 1440					

79

NF X 10-999

Annexe C
(informative)

Exemple de formulaire de réception de travaux

RÉCEPTION DE TRAVAUX DE FORAGES, DE POMPAGE D'ESSAIS, DE COMBLEMENT Conforme à la norme NF 10-999			
Commande n° :		du	
Maître d'ouvrage			
Nom			
Nom du responsable			
Adresse			
Code postal	Ville	E. Mail	
Téléphone	Fax		
Maître d'œuvre			
Nom			
Nom du responsable			
Adresse			
Code postal	Ville	E. Mail	
Téléphone	Fax		
Entrepreneur			
Nom			
Nom du responsable			
Adresse			
Code postal	Ville	E. Mail	
Téléphone	Fax		
Lieu des travaux			
Date début des travaux		Date fin des travaux	
TRAVAUX			
Forage	Pompages d'essais	Traitements	Comblement
Oui / non	Oui / non	Oui / non	Oui / non
Analyse d'eau	Oui / non	Paramètres analysés	Laboratoire
Diagraphies	Oui / non	Type	Intervenant

NF X 10-999

<input type="checkbox"/> Réception sans réserve	<input type="checkbox"/> Réception partielle concernant
---	---

<input type="checkbox"/> Réception avec réserve

Je soussigné (Nom, prénom)

en présence de M _____, représentant du Maître d'ouvrage

en présence de M _____, ayant reçu délégation du Maître d'ouvrage

en l'absence de M _____, représentant du Maître d'ouvrage, dûment avisé

en présence de M _____, entrepreneur

en l'absence de M _____, entrepreneur dûment convoqué

Après avoir procédé aux examens et vérifications nécessaires, constate

— que les travaux et les prestations prévus au marché ont été exécutés et sont conformes aux spécifications du marché

— que les installations de chantier ont été repliées et les terrains et lieux remis en état

En conséquence, je propose de prononcer la réception avec effet à compter du :

Dressé le, _____
Le Maître d'œuvre

Accepté le _____
L'entrepreneur

DÉCISION

Sur le vu du procès-verbal et de la proposition du Maître d'œuvre,
je décide de prononcer la réception sans réserve avec effet à compter du

A _____, le

Signature

NF X 10-999

Annexe D
(informative)

Liste indicative et non exhaustive d'analyses

Tableau D.1 — Types d'analyses en fonction de l'usage

Usage de l'eau	Analyse recommandée ou obligatoire	
	Recommandée	Obligatoire
Jardin, lavage voirie, etc.	Conductivité électrique, pH	
Chasse d'eau, machine à laver, etc.	Conductivité électrique, pH, Fe, Mn, dureté	
Piscine à usage familial	Conductivité électrique, pH, Fe, Mn, matières organiques, nitrate	
Pompe à chaleur	— CO ₂ dissous — Oxygène dissous — chlorures — Fer — Manganèse — sulfates — sulfures — potentiel oxydo-réduction — Ferro bactéries — bactéries sulfato-reductrices — Le titre hydrométrique (TH ou dureté) — Le titre alcalimétrique complet (TAC) — La turbidité — La conductivité électrique — pH —	
Alimentation en eau potable pour l'usage personnel d'une famille		Code de la Santé Publique
Agroalimentaire		Code de la Santé Publique
Alimentation en eau potable collectif ou d'un tiers		Code de la Santé Publique
Irrigation	Bilan ionique (Peu de sels dissous)	
Maraîchage	Bilan ionique (Peu de sels dissous), organismes pathogènes et parasites nuisibles pour les humains,	
Pisciculture		Code de l'environnement
Usage industriel	Différent suivant l'activité (à minima se conformer à l'arrêté du 2 février 1998 modifié relatif aux installations classées pour la protection de l'environnement ou à l'arrêté ministériel relatif à l'activité concernée)	
Élevage	Microbiologie, nitrates	
Diagnostic de site potentiellement pollué	Analyses spécifiques selon les activités actuelles et passées du site	

Annexe E (informative)

Argile gonflante

Les billes d'argiles déshydratées ont de nombreux noms commerciaux, elles sont réalisées à partir de mélanges d'argiles naturelles sans aucun additif. Elles peuvent se présenter sous la forme de billes (diamètres disponibles de 4 mm à 12 mm) ou de pastilles.

Ces billes ont un poids spécifique compris entre 2,2 kg/l et 2,5 kg/l et une vitesse de sédimentation dans l'eau de 0,35 m/s à 0,4 m/s.

Utilisation

Ces argiles possèdent un pouvoir de gonflement (de 2 à 7 fois leur volume initial suivant les conditions de mise en œuvre) lorsqu'elles sont immergées. Elles occupent rapidement tout l'espace libre et forment un scellement totalement imperméable et flexible. L'argile adhère parfaitement à la paroi du forage et au tube, elle est capable de remplir tout vide venant à se créer ultérieurement.

- 1) Différentes utilisations possibles :
 - a) réalisation d'un bouchon au-dessus d'un massif de graviers avant la cimentation. En effet les argiles ne migrent pas dans le gravier ;
 - b) comblement d'un forage ;
 - c) scellement provisoire d'un tubage ;
 - d) réalisation d'un bouchon de fond.

- 2) Limites d'utilisation :

les argiles, si elles ne sont pas hydratées correctement ou si elles sont placées dans une zone non saturée peuvent se déshydrater et donc ne plus assurer l'étanchéité souhaitée. Par conséquent leur emploi ne peut être que temporaire dans la zone non saturée du forage.

Le gonflement est lent et il n'atteint son stade maximal qu'après environ 24 h d'hydratation.

Mise en place

Le diamètre et la nature des argiles seront choisis en fonction de l'espace annulaire disponible.

Les billes seront versées dans l'espace annulaire du forage depuis la surface. Le remplissage doit se faire lentement afin d'éviter la formation de ponts. Pour les applications profondes, il faut s'efforcer de mettre en œuvre d'autres solutions (canne, cross over tool,...).

Dans le cas le plus fréquent d'utilisation des billes d'argiles pour la réalisation d'un bouchon avant cimentation la quantité devra être calculée pour remplir l'espace annulaire sur une hauteur de 1 m minimum. Il est recommandé d'attendre au minimum 2 h avant de commencer la cimentation de façon à permettre le début du gonflement des argiles.

Les volumes mis en place sont indépendants du pouvoir de gonflement de l'argile.

Annexe 4

PR NF X10-950 : participants au groupe de travail

P. Monnot	BRGM
L. Nicolas	SUD-CHEMIE
Ph. Henaut	HERMES TECHNOLOGIE
Ch. Pufahl	HERMES TECHNOLOGIE
B. Sustrac	MPC
O. Gruget	IDEMIX
W. Erben	SCHWENK
J-S Guedon	IDTE/IFSTTAR
M. Herbaux	CETE EST/LCPC
R. Drean	SOVEMA-PROMAFOR
B. Demarcq	MCCF
Ch. Lanos	Université Rennes
M. Hervé	DGALN DEB
Ch. Pointclou	ANTEA

Annexe 5

Résultats de la première série de mesure de la conductivité thermique sur le coulis Thermocem



Laboratoire Génie Civil Génie Mécanique

RAPPORT D'ESSAIS

Tél. : 02 23 23 40 67 - Fax : 02 23 23 40 51

**Client : BRGM – Département géothermie
à l'attention de Monsieur Pascal MONNOT
3, avenue Claude Guillemin
45060 ORLEANS CEDEX 2
p.monnot@brgm.fr**

Responsable de la mesure : Christophe LANOS

Echantillons

Date de réception	Quantité	Origine
15/06/2012	2 éprouvettes de coulis moulées	HEIDELBERG
Description		
Éprouvettes prismatiques 28x15 cm ² de 7 cm d'épaisseur présentant une surface plane coffrée (fond de moule de 28x15 cm ²).		

Ce rapport comporte 8 page(s)

Procédure pour réaliser la mesure de conductivité thermique :

1. **Les laboratoires** envoient pour le **25 mai** 10 éprouvettes/moules à Heidelberg. Pour les méthodologies nécessitant 2 éprouvettes (disque chaud par ex), les laboratoires envoient 20 moules/éprouvettes. **L'objectif est d'obtenir 10 valeurs de mesures de kth.**
2. **Heidelberg** conditionne les éprouvettes de la façon suivante pour retourner les éprouvettes aux laboratoires (à partir **13 juin**) :
 - Avant l'envoi : atmosphère humide
 - pour l'envoi aux laboratoires : éprouvettes entourées d'un linge mouillé dans un sac plastique scellé (après 2 semaines de durcissement)
3. **Laboratoires** : le conditionnement des éprouvettes avant la mesure sera de les laisser dans un bac d'eau à 20 degrés.
4. **Laboratoires** : les mesures de conductivité thermique seront réalisées **le 27 juin** par les différents laboratoires. Les laboratoires appliqueront **leur propre procédure et décriront précisément leur protocole de mesure**
5. Remise des résultats au BRGM **fin juin**

Mesure des propriétés thermiques de coulis de couplage pour sondes géothermiques

Eprouvettes « THERMOCEM » moulées le 30/05/2012

Référence échantillon	W %	ph (g/cm ³)	pd (g/cm ³)	K W/(mK)	K moy W/(mK)	R mK/W	R moy mK/W	C MJ/(m ³ K)	C moy MJ/(m ³ K)	D mm ² /s	D moy mm ² /s	Temp. °C
sonde fil 6,14		1,51		3,08		0,324						20,3
sonde fil 5,48		1,51		2,96		0,337						20,92
sonde anneau		1,51		2,57		0,389		2,94	0,874			20,49

Date de réalisation des mesures : 27/06/2012

LEGENDE :

(Paramètres obligatoires en rouges, facultatifs en italique)

W : *teneur en eau à réception.*

ph : *masse volumique humide.*

pd : *masse volumique sèche.*

K (ou λ): *conductivité thermique.*

R : *résistivité thermique (inverse de la conductivité).*

D : *diffusivité*

C : *chaleur spécifique*

Remarques et description précise du protocole opératoire (*photos éventuelles*) :

Les éprouvettes testées (THERMOCEM PLUS HC Geotechnick) ont été fabriquées et conditionnées le 30/05/2012. Les moules utilisés sont réalisés par assemblage de plaques épaisse en PVC.

Les éprouvettes ont été réceptionnées le 15/06/2012 démoulées et pesées avant immersion dans l'eau (20°C).

Les mesures de conductivité thermique ont été réalisées le 27/06/2012. Une pesée des échantillons permet de vérifier qu'il n'y a pas eu d'évolution de la masse volumique humide.

Masse volumique humide des échantillons à réception :

Eprouvette 1 : 1508 kg/m³

Eprouvette 2 : 1507 kg/m³

Masse volumique humide des échantillons à la réalisation des mesures de conductivité :

Eprouvette 1 : 1511 kg/m³

Eprouvette 2 : 1508 kg/m³

Au démoulage, un retrait visible du matériau est constaté entre les parois du moule et l'échantillon. La perte d'épaisseur est estimée à 1 mm (sur une hauteur de moule de 70 mm).

Les parois latérales des échantillons ne permettent pas de visualiser une éventuelle ségrégation sur leur hauteur.

Le matériau est caractérisé par une odeur soufrée ainsi que par la tendance lors de sa manipulation à former un dépôt grisâtre qui évoque du graphite.

Les mesures de conductivité thermique ont été réalisées en plaçant une sonde entre les deux échantillons. Le contact entre la sonde et les échantillons est optimisé en exploitant les surfaces coffrées des échantillons (aucune préparation particulière de l'état de surface, pas de ponçage, pas de rectification).

Pendant les mesures, l'éprouvette inférieure est placée dans un récipient rempli d'eau sur environ 20 mm pour éviter sa désaturation ou son séchage durant la mesure.

Un linge humide, renouvelé périodiquement est placé sur la surface supérieure de la seconde éprouvette pour éviter également son séchage.

Les mesures sont répétées en plaçant la sonde à différentes positions entre les deux éprouvettes. Le nombre de mesures réalisées évoluent entre 8 et 13 selon la sonde exploitée.

Deux types de mesures ont été réalisés. Le premier correspond à l'exploitation de sondes de type fil chaud. Le second correspond à l'exploitation d'une sonde de type anneau.

L'appareil utilisé est un CTmètre (développement CSTB Grenoble - SMEE). Le fabricant indique une précision de la mesure de la conductivité à +/-5%.

Sonde fil chaud :

Un fil conducteur linéaire est chauffé par effet joule. Le suivi de l'évolution de la température à proximité du fil (mesure réalisée à l'aide d'un thermocouple) permet d'évaluer la conductivité thermique par la relation asymptotique :

$$\Delta T(t) = \alpha \ln(t) + \beta \quad \text{avec} \quad \lambda = Q/(4\pi\alpha l) \quad (1)$$

Les paramètres d'essai sont : la puissance injectée Q, la durée de la mesure, le pas de temps de mesure. La puissance linéique injectée Q/l a été calibrée pour rechercher une élévation de température ΔT comprise entre 10 et 20 °C en fin de mesure (durée choisie de 240 secondes). Le pas de temps de mesure est de 1 seconde.

L'équation (1) correspond à un problème de diffusion thermique à symétrie cylindrique autour du fil dans un milieu homogène infini dont la conductivité thermique est considérée constante.

Deux sondes de résistance différentes ont été testées. Ces deux sondes correspondent à des séries de fabrication différentes du constructeur. Elles se distinguent principalement par une différence de rigidité de la plaquette support du fil chaud. Ces deux sondes présentent une longueur de 50 mm.

En fin d'essais, l'appareil ajuste l'équation 1 sur ses résultats selon un protocole non connu et propose une valeur de conductivité thermique ainsi que la valeur d'un coefficient de régression R^2 . Les essais ont été systématiquement enregistrés (connexion du CTmètre à un PC) de façon à réaliser les régressions linéaires manuellement. Ces enregistrements sont présentés sous la forme d'une courbe sur la figure 1. La pente de cette courbe est directement liée à la conductivité thermique. On constate, sur certains enregistrements, que les premières secondes et la fin de l'enregistrement peuvent perdre leur caractère linéaire et ainsi affecter l'estimation de la conductivité thermique.

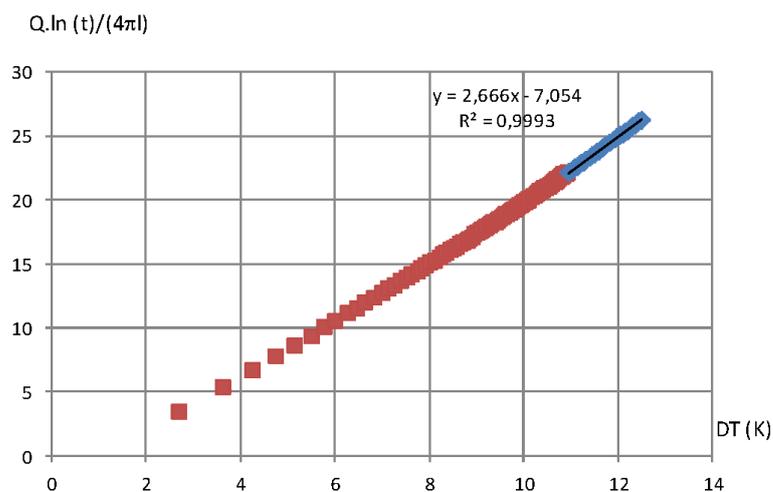


Figure 1 : exemple d'enregistrement réalisé à la sonde fil.

Les différentes mesures réalisées avec ces sondes fil chaud sont rassemblées dans le tableau 1.

Tableau 1 : paramètres des essais sur les sondes fil chaud

Sonde 6,14 Ω

P (W)	T (°C)	ΔT max (°C)	R ²	λ évalué (W/(mK))	λ CTMètre (W/(mK))
1,280	19,88	4,85	0,998	2,99	2,88
1,846	19,83	7,34	0,999	2,84	2,82
2,306	19,83	8,69	0,999	3,18	3,16
3,092	19,93	12,05	0,999	2,97	2,94
3,092	20,13	11,48	0,999	3,23	3,17
3,092	20,33	11,65	0,999	2,99	2,67
3,092	20,30	12,60	0,999	3,09	3,02
3,092	20,33	12,01	0,999	3,30	3,25
3,092	20,58	11,65	0,999	3,08	3,02
3,092	20,45	11,43	0,999	2,95	2,89
3,092	20,63	11,82	0,999	3,02	2,97
3,092	20,85	11,42	0,999	3,37	3,31
3,092	20,85	11,42	0,999	3,04	3,00

moyenne	3,08	3,01
ecart type	0,15	0,18

Sonde 5,48 Ω

P (W)	T (°C)	ΔT max (°C)	R ²	λ évalué (W/(mK))	λ CTMètre (W/(mK))
3,016	20,68	12,52	0,999	2,67	2,67
3,016	20,60	13,80	0,999	2,68	2,66
3,016	20,87	12,90	0,998	3,16	3,29
3,016	20,82	12,47	0,994	3,09	3,35
3,016	21,10	12,51	0,999	3,15	3,09
3,016	20,80	12,10	0,999	3,17	3,13
3,016	20,95	13,21	0,997	2,60	2,87
3,016	21,50	12,44	0,999	3,13	3,09

moyenne	2,96	3,02
ecart type	0,26	0,26

Les résultats obtenus permettent de formuler les remarques suivantes :

- Les conductivités proposées par l'appareil sont assez proches de celles recalculées.
- Les écarts types des mesures peuvent être inférieurs à 5%
- Les moyennes des valeurs de conductivité thermiques mesurées avec les deux sondes sont similaires. Par contre, la sonde dont la plaquette support est la plus rigide présente un écart type beaucoup plus important que l'autre sonde.

En conclusion, les conditions d'essai suivantes sont à retenir.

- La durée de mesure peut être inférieure à 240 s. Il est probable qu'une durée de mesure de 180 s soit suffisante. Ceci peut permettre de limiter le risque de voir le flux de chaleur atteindre les surfaces externes des échantillons en fin d'essai et donc pénaliser le caractère linéaire reliant ΔT et ln(t).
- Une puissance de 3 W pour des sondes de longueur 50 mm et de résistance proche de 6 Ω semble appropriée.
- Il serait utile dans de telles conditions expérimentales de vérifier que le flux de chaleur ne « sorte » pas de l'échantillon (visualisation par caméra IR en fin d'essai par exemple).
- L'utilisation d'une sonde à plaquette souple est à privilégier.

Sonde anneau :

Un fil conducteur circulaire est échauffé par effet joule. Le suivi de l'évolution de la température ΔT au centre du cercle (mesure réalisée à l'aide d'un thermocouple) permet d'évaluer la diffusivité thermique par la relation :

$$a = \frac{r^2 t_c}{6 \cdot (t_m - t_c) \cdot t_m \cdot \ln\left(\frac{t_m}{t_m - t_c}\right)} \quad (2)$$

Où t_m est le temps nécessaire pour atteindre un échauffement maximum au centre de la sonde. L'estimation de la conductivité thermique est réalisée avec :

$$\lambda = \frac{Q}{4.\pi.r.\Delta T} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{r^2}{4.a.t}}\right) \quad (3)$$

Les paramètres d'essai sont : la puissance injectée Q et sa durée t_c , la durée de la mesure, le pas de temps de mesure. La puissance injectée a été calibrée pour rechercher une élévation de température comprise entre 1 et 2 °C en fin de chauffe (durée de chauffe de 40 secondes et durée de mesure de 180 à 240 s). Le pas de temps de mesure est de 1 ou 2 secondes.

La sonde anneau testée présente un diamètre de $2r = 30$ mm (résistance 2,49 Ω).

L'équation 2 correspond à un problème de diffusion thermique dans un plan, le milieu étant considéré comme étant homogène et infini, caractérisé par une diffusivité thermique constante et une conductivité thermique constante.

En fin d'essais, l'appareil ajuste l'équation (2) sur les résultats pour identifier la diffusivité thermique et estime la conductivité avec la relation (3) selon un protocole non connu.

Les essais ont été systématiquement enregistrés (connexion du CTMètre à un PC) de façon à estimer les paramètres manuellement. Ces enregistrements sont présentés sous la forme d'une courbe sur la figure 2. La position du maximum de cette courbe permet de calculer la diffusivité thermique. Les résultats proposés par l'appareil sont assez satisfaisants. L'équation 3 permet d'estimer pour chaque point de mesure la valeur de la conductivité thermique.

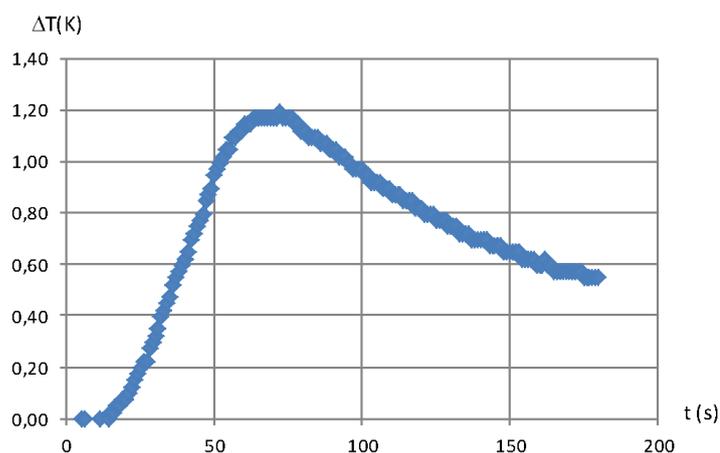


Figure 2 : exemple d'enregistrement réalisé à la sonde anneau.

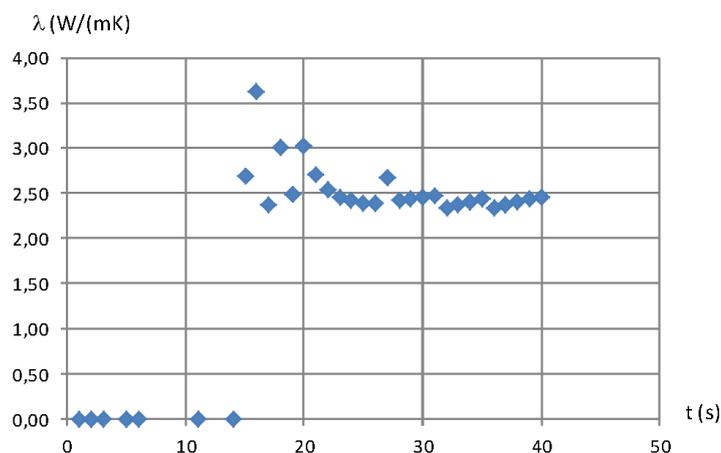


Figure 3 : exemple d'évolution de la conductivité thermique.

La figure 3 illustre la réponse caractéristique d'un essai durant la période de chauffe. Cette courbe est caractérisée par un pic de conductivité lors de l'arrivée du front de chaleur à proximité du thermocouple. La valeur estimée de la conductivité semble ensuite se stabiliser. La valeur de conductivité thermique indiquée par le CTMètre est assez représentative de cette valeur au palier. La diffusivité thermique et la conductivité thermique permettent d'estimer la chaleur volumique ou la chaleur spécifique, connaissant la masse volumique humide des échantillons.

Les différentes mesures réalisées avec la sonde anneau sont rassemblées dans le tableau 2. Les valeurs identifiées avec l'appareil peuvent être comparées à celle générées par un ajustement manuel.

Tableau 2 : paramètres des essais sur la sonde anneau

T (°C)	tm évalué (s)	tm CTMètre (s)	λ évalué (W/(mK))	λ CTMètre (W/(mK))	a évalué (m ² /s)	a CTMètre (m ² /s)	ρ.Cp (J/(m ³ K))	Cp (J/(kgK))
19,83	69,0	71,5	2,69	2,22	8,6481E-07	8,1248E-07	3105123	2056
19,95	69,0	69,0	2,59	2,55	8,6481E-07	8,6481E-07	2996328	1984
20,20	69,5	69,5	2,47	2,47	8,5376E-07	8,5376E-07	2898422	1919
20,25	67,0	68,5	2,82	2,58	9,1234E-07	8,7618E-07	3094160	2049
20,58	70,0	70,0	2,28	2,26	8,4302E-07	8,4302E-07	2703030	1790
20,55	67,0	67,5	2,72	2,65	9,1234E-07	8,9993E-07	2985795	1977
20,80	68,5	68,5	2,62	2,53	8,7618E-07	8,7618E-07	2989324	1980
20,75	69,0	69,0	2,57	2,61	8,6481E-07	8,6481E-07	2966031	1964
21,00	69,0	69,5	2,21	2,24	8,6481E-07	8,5376E-07	2554936	1692
20,97	68,0	70,0	2,76	2,61	8,8788E-07	8,4302E-07	3107394	2058
moyenne			2,57	2,47	8,7447E-07	8,5879E-07	2940054	1947
ecart type			0,20	0,17	2,3197E-08	2,3715E-08	180613	120

Les résultats obtenus permettent de formuler les remarques suivantes :

- Les conductivités proposées par l'appareil peuvent être assez différentes de celles recalculées, alors que les écarts constatés sur la diffusivité thermique sont moins conséquents.
- Les écarts types des mesures dépassent souvent 5%
- La moyenne des valeurs de conductivité thermique identifiée avec la sonde anneau est inférieure à celle identifiée avec les sondes fil.

En conclusion, les conditions d'essai suivantes sont à retenir.

- La durée de mesure peut être de l'ordre de 180 s avec un pas de mesure de 1 s.
- Une puissance 4 W pour une sonde de diamètre 30 mm et de résistance proche de 2,5 Ω semble appropriée mais aurait pu être dépassée pour amplifier la montée en température.

La différence entre les conductivités estimées selon les deux protocoles de mesure reste à expliquer. On constate que l'identification du temps nécessaire au passage par la température maximale (dans le cas de la sonde anneau) reste imprécise. Une modification de 1 à 2 seconde de ce temps se traduit par une modification de la diffusivité thermique de près de 10%, ce qui peut se répercuter sur la conductivité thermique de façon très importante.

La mesure avec la sonde anneau est donc plus difficile à maîtriser et peut générer une sous évaluation de la conductivité thermique lorsque l'on utilise un CTMètre, la valeur de t_m étant pratiquement systématiquement sur évaluée.

Pour lever l'ambiguïté, il reste toujours possible de réaliser une mesure directe de la chaleur spécifique par technique calorimétrique.



Centre d'Études Techniques de
l'Équipement de l'Est
LRPC de NANCY
71, Rue de la Grande Haie.
BP8 54510 Tomblaine
Téléphone : (33) 03 83 18 41 41 -
Télécopie : (33) 03 83 18 41 00

RAPPORT D'ESSAIS



<p>Client : BRGM – Département géothermie à l'attention de Monsieur Pascal MONNOT 3, avenue Claude Guillemin 45060 ORLEANS CEDEX 2 p.monnot@brgm.fr</p>	
<p>Responsable de la mesure :</p>	<p>M. Herbaux et V.Remy</p>

Date de réception	Quantité	Origine
15/06/2012	10 éprouvettes de coulis moulées	HEIDELBERG
Description		

Echantillons

Ce rapport comporte 7 page(s)

Sommaire du rapport

1. Mesures de conductivité thermique
2. Mesures de Masse Volumique et Teneur en eau

Le laboratoire de Nancy a envoyé le 25 mai, 10 éprouvettes cylindriques (H : 16 cm et D : 7cm) à Heidelberg. Les éprouvettes ont été coulées le 30 mai puis renvoyées au différents Laboratoires le 13 mai.

Les éprouvettes ont été réceptionnées par le Laboratoire de Nancy le 15/06/2012. Les éprouvettes étaient encore dans leurs moules. Elles ont donc été démoulées et mises dans un bain d'eau à 20°C.

1. Mesures de conductivité thermique

1.1 Dispositif de mesures

Le dispositif de mesure choisi pour réaliser les essais est le HOTDISK. Une fiche thermique vient chauffer l'échantillon en son cœur par effet Joule puis mesure l'élévation de température induite en fonction du temps.

Le dispositif est composé (figure 1) :

- d'un appareil d'acquisition thermique HOTDISK,
- une sonde de mesure thermique,
- d'un ordinateur pour traiter les données au premier plan,
- d'un dispositif avec un étai de serrage qui permet de serrer l'échantillon afin d'optimiser le contact entre la fiche thermique et le matériau,
- d'un thermomètre numérique qui permet de connaître la température (paramètre à rentrer dans le logiciel d'acquisition),



Figure 1 : dispositif de mesure

1.2 Protocole

Les dix échantillons ont été coupés en deux le 26/06. Les échantillons reçus étaient de hauteurs différentes allant de 14.3 cm pour le plus grand à 10.1 cm pour le plus petit, chaque échantillon a donc été mesuré puis coupé en deux parties égales. Une marque a été réalisée sur l'échantillon afin de pouvoir le replacer comme à son origine lors de la mesure (figure 2). Les échantillons ont ensuite été replacés dans un bain à 20°C.



Figure 2 : échantillon coupé en deux

Les essais ont été réalisés la matinée du 27/06 sur 5 échantillons (TC1 à TC5) puis l'après-midi du 27/06 sur les cinq autres échantillons (TC6 à TC10).

Matinée du 27/06 : 5 échantillons (TC1 à TC5) ont été sortis de la piscine 45 min avant l'essai (afin de pouvoir réaliser la mesure de conductivité, les surfaces de l'échantillon doivent être sèches). Chaque échantillon a ensuite été pesé puis enroulé dans un linge humide.

Les échantillons n'ont été sortis de leur linge que durant le temps nécessaire à la mesure soit entre 5 et 10 min.

Sur chacun des échantillons (TC1 à TC5) deux mesures ont été réalisées durant la matinée du 27/05. Pour un même échantillon, il est nécessaire d'attendre 45 min entre chaque mesure. Nous avons donc réalisé dans un premier temps une série de mesures sur les 5 échantillons (TC1 à TC5) puis avons reproduit la série de mesures sur les 5 mêmes échantillons dans un second temps. A la fin de la matinée, les échantillons ont été de nouveau pesés, ceci nous a permis de vérifier que leur teneur en eau n'avait pas diminuée. Ils ont ensuite été replacés dans un bain à 20°C.

Après-midi du 27/06 : le même protocole a été mis en place pour l'après-midi du 27/06. 5 échantillons (TC6 à TC10) ont été sortis de la piscine 45 min avant l'essai. Chaque échantillon a ensuite été pesé puis enroulé dans un linge humide.

Les échantillons n'ont été sortis de leur linge que durant le temps nécessaire à la mesure soit entre 5 et 10 min.

Sur chacun des échantillons (TC6 à TC10) deux mesures ont été réalisées durant l'après-midi du 27/05. Pour un même échantillon, il est nécessaire d'attendre 45 min entre chaque mesure. Nous avons donc réalisé dans un premier temps une série de mesures sur les 5 échantillons (TC6 à TC10) puis avons reproduit la série de mesures sur les 5 mêmes échantillons dans un second temps. A la fin de l'après-midi, les échantillons ont été de nouveau pesés, ceci nous a permis de vérifier que leur teneur en eau n'avait pas diminuée. Ils ont ensuite été replacés dans un bain à 20°C.

1.3 Réalisation de la mesure de conductivité :

La fiche de mesure est disposée entre les deux parties de l'échantillon et un dispositif le protège de toute perturbation extérieure.

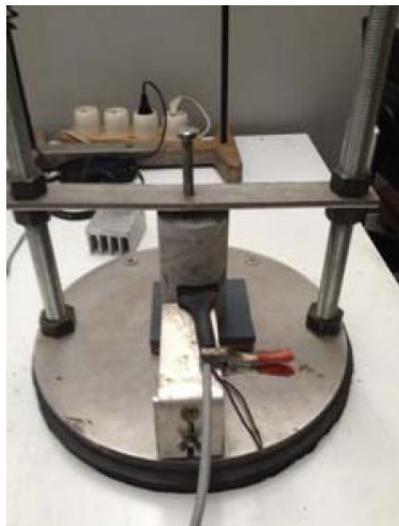


Figure 3: fiche de mesure et protection

Une puissance constante est envoyée au matériau via la fiche de mesure. L'appareil mesure l'élévation engendrée de la température de l'échantillon en fonction du temps.

La courbe d'élévation de température est ensuite traitée par le logiciel pour obtenir les constantes thermiques.

Les paramètres importants à prendre en compte pendant l'essai sont :

- **le contact entre la sonde et l'échantillon** : la lame d'air entre la fiche de mesure et le matériau doit être minimisée et la fiche doit être le plus possible en contact avec le matériau.
- **la température** : la mesure doit se faire à température constante. En cas de variations de températures durant l'essai, les données entrantes doivent être modifiées.
- **la profondeur de pénétration** : l'apport calorifique apporté par la fiche thermique doit rester à l'intérieur de l'échantillon. La taille de la sonde, la puissance thermique et le temps de mesure doivent être choisis en conséquence.
- **la présence d'eau libre en surface** : les échantillons doivent être secs en surface.
- **la teneur en eau de l'échantillon** : les échantillons doivent être mesurés à l'état saturé. Ils ont été emballés dans un linge humide entre deux mesures pour garder une teneur en eau constante. Les pesées réalisées avant et après les mesures ont montré que la teneur en eau est restée constante.

Une fois la mesure terminée, les données obtenues par le logiciel sont :

- la conductivité thermique (W/mK)
- la diffusivité thermique (mm^2/s)
- la chaleur spécifique (MJ/m^3K)

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

2. Mesures de teneur en eau et masse Volumique

La mesure de teneur en eau étant destructive, les mesures ont été réalisées sur seulement 5 échantillons. Les 5 autres échantillons ont été conservés dans un bain à 20 °C et permettront de faire des essais complémentaires si besoin.

Les 5 échantillons sur lesquelles les mesures ont été réalisées, ont été choisis en fonction des résultats des mesures de conductivité thermiques.

Les échantillons choisis sont : TC9 et TC2 (les deux plus faibles valeurs de conductivité thermique), TC3 et TC6 (les deux plus fortes valeurs de conductivité thermiques) et TC5 (valeur intermédiaire).

Les échantillons ayant été coupés en deux, les mesures de teneur en eau et de masse volumique ont été réalisées sur les deux parties de l'échantillon nommées « B » et « H ».

2.1. Mesure de la masse volumique humide:

Cette mesure a été réalisée conformément à la norme : *XP CEN ISO/TS 17892-2, Août 2005*
Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

2.2 Mesure de la teneur en eau:

Cette mesure est réalisée conformément à la norme : *NF P94-050, Septembre 1995*
Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

Mesure des propriétés thermiques de coulis de couplage pour sondes géothermiques

Eprouvettes « THERMOCEM » moulées le xx/xx/2012

Référence échantillon	W %	ph (g/cm3)	pd (g/cm3)	K W/(mK)	K moy W/(mK)	R mK/W	R moy mK/W	C MJ/(m²K)	C moy MJ/(m²K)	D mm²/s	D moy mm²/s	Temp. °C
TC1				2.004				3.956		0.5066		23.9
TC1				2.095	2.0497			3.1360	3.5459	0.6682	0.5874	23.7
TC2	H: 72.41 B: 69.41	H: 1.51 B: 1.533	H: 0.876 B: 0.905	1.811				3.172		0.5710		24.9
TC2				1.842	1.8266			3.484	3.3279	0.5286	0.5498	25.2
TC3	H: 74.50 B: 71.64	H: 1.505 B: 1.531	H: 0.862 B: 0.892	2.128				2.525		0.8427		23.5
TC3				2.197	2.1622			2.741	2.6327	0.8016	0.8221	24.5
TC4				2.037				3.458		0.5889		23.5
TC4				1.911	1.9738			2.638	3.0483	0.7243	0.6566	24.2
TC5	H: 74.59 B: 73.47	H: 1.494 B: 1.516	H: 0.856 B: 0.874	1.871				2.8768		0.6503		23.7
TC5				1.978	1.9244			3.017	2.9469	0.6557	0.6530	25.2
TC6	H: 75.00 B: 69.59	H: 1.494 B: 1.518	H: 0.854 B: 0.895	2.109				3.690		0.5714		25.3
TC6				2.212	2.1604			3.975	3.8326	0.5564	0.5639	25.6
TC7				1.928				4.830		0.3991		25.6
TC7				2.067	1.9974			4.587	4.7083	0.4507	0.4249	25.8
TC8				1.866				4.289		0.4350		25.7
TC8				1.855	1.8603			4.566	4.4277	0.4062	0.4206	25.8
TC9	H: 75.3 B: 71.6	H: 1.497 B: 1.517	H: 0.854 B: 0.884	1.752				2.399		0.7304		25.6
TC9				1.827	1.7900			2.805	2.6021	0.6515	0.6910	25.8
TC10				2.060				4.405		0.4675		25.5
TC10				1.988	2.0236			3.960	4.1829	0.5019	0.4847	25.9

Date de réalisation des mesures : 27/06/2012 (conductivité) et 29/06/12 (Masse Volumique et teneur en eau)

LEGENDE :

(Paramètres obligatoires en rouges, facultatifs en italique)

W : *teneur en eau à réception.*

ph : *masse volumique humide.*

pd : *masse volumique sèche.*

K (ou λ) : *conductivité thermique.*

R : *résistivité thermique (inverse de la conductivité).*

D : *diffusivité*

C : *chaleur spécifique*

Remarques : Sur certains échantillons des bulles ont été observées. Ceci pourrait expliquer les variations de valeurs de conductivité mesurées entre les différents échantillons.



Figure 4: Présence de bulles (TC9)

Date du rapport
29/06/2012

Numéro de rapport
Lab12041

Page
1 sur 4



RAPPORT D'ESSAIS

Client : Nom et adresse	
Client : BRGM – Département géothermie à l'attention de Monsieur Pascal MONNOT 3, avenue Claude Guillemin 45060 ORLEANS CEDEX 2 p.monnot@brgm.fr	
Unité de production ANTEAGROUP responsable du projet	Numéro de projet
Antea Group - LABORATOIRE - C. POINCLOU	CENP120162

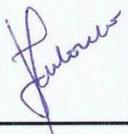
Echantillons

Date de réception	Quantité	Origine
14/06/2012	10 éprouvettes de coulis moulées	HEIDELBERG
Description		
Coulis gris foncé.		

Ce rapport comporte 4 page(s)

Sommaire du rapport

1 tableau de résultats d'essais en laboratoire
4 photographies

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais. Sauf accord écrit préalable, le présent rapport ne peut être reproduit que dans son intégralité. Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons ne sont pas conservés au delà de un mois après l'envoi du rapport. L'attention est attirée sur le fait que les résultats mentionnés par le présent rapport ont été obtenus avec les échantillons définis ci-dessus, mais que la portée et les conclusions à tirer de ces résultats font l'objet d'un document séparé ou n'ont pas été demandés par le donneur d'ordre.	Le responsable des essais C. POINCLOU 	Le responsable technique E. ANTOINET 

Environnement - Eau - Infrastructures
 Siège social : 3, avenue Claude Guillemin - BP 66119 - 45061 ORLÉANS Cedex 2 - France
 Tél. 02.38.64.30.60 - Fax 02.38.64.32.34

Date du rapport
29/06/2012Numéro de rapport
Lab12041Page
2 sur 4

Mesure des propriétés thermiques de coulis de couplage pour sondes géothermiques

Eprouvettes « THERMOCEM » moulées le 30/05/2012

Référence échantillon	W %	ph (g/cm ³)	pd (g/cm ³)	K W/(mK)	K moy W/(mK)	R mK/W	R moy mK/W	C MJ/(m ² K)	C moy MJ/(m ² K)	D mm ² /s	D moy mm ² /s	Temp. °C
TH01A	67.7	1.50	0.89	2.437	2.537	0.410	0.377	3.634	4.200	0.671	0.640	23.8
TH01B				2.586		0.387		4.677		0.553		26.7
TH01C				2.589		0.335		4.290		0.697		23.6
TH02A	68.3	1.52	0.90	2.445	2.444	0.409	0.410	4.319	4.326	0.566	0.577	25.8
TH02B				2.329		0.429		5.000		0.466		25.7
TH02C				2.558		0.391		3.658		0.699		24.8
TH03A	68.3	1.51	0.90	2.676	2.707	0.374	0.370	3.307	3.447	0.809	0.786	24.9
TH03B				2.728		0.367		3.549		0.769		25.0
TH03C				2.718		0.368		3.485		0.780		24.4
TH04A	68.1	1.50	0.89	2.196	2.189	0.455	0.456	3.798	3.766	0.578	0.581	26.0
TH04B				2.186		0.457		3.750		0.583		25.7
TH04C				2.186		0.457		3.750		0.583		25.7
TH05A	68.2	1.51	0.90	2.430	2.418	0.412	0.414	6.235	5.515	0.390	0.442	25.7
TH05B				2.442		0.409		5.214		0.468		25.1
TH05C				2.383		0.420		5.095		0.468		25.4
TH06A	68.6	1.51	0.90	2.702	2.695	0.370	0.371	3.886	3.821	0.695	0.706	26.4
TH06B				2.758		0.363		3.985		0.692		26.3
TH06C				2.625		0.381		3.591		0.731		25.8
TH07A	68.0	1.52	0.90	2.354	2.408	0.425	0.415	5.673	4.103	0.415	0.628	26.0
TH07B				2.448		0.408		3.223		0.760		26.0
TH07C				2.423		0.413		3.413		0.710		25.1
TH08A	68.3	1.51	0.90	2.291	2.244	0.436	0.446	3.999	3.964	0.573	0.566	26.0
TH08B				2.238		0.447		3.986		0.561		25.5
TH08C				2.204		0.454		3.906		0.564		24.9
TH09A	68.0	1.51	0.90	1.923	2.022	0.520	0.495	6.915	4.697	0.278	0.514	27.5
TH09B				2.137		0.468		2.578		0.829		25.1
TH09C				2.006		0.498		4.599		0.436		25.1
TH10A	68.3	1.53	0.91	2.481	2.447	0.403	0.409	2.815	2.896	0.881	0.846	26.6
TH10B				2.406		0.416		3.006		0.801		26.4
TH10C				2.455		0.407		2.866		0.857		26.2

Date de réalisation des mesures : 27/06/2012

LEGENDE :

- W :** teneur en eau à réception.
ph : masse volumique humide.
pd : masse volumique sèche.
K (ou λ): conductivité thermique.
R : résistivité thermique (inverse de la conductivité).
D : diffusivité
C : chaleur spécifique

Date du rapport
29/06/2012

Numéro de rapport
Lab12041

Page
3 sur 4

Remarques :

Les mesures de conductivité et diffusivité thermique sont réalisées à l'aide de l'analyseur de propriétés thermiques KD2 Pro de la société DECAGON.

A chaque point de mesure thermique est associée une mesure de :

- la teneur en eau,
- la masse volumique sèche.

Les mesures sont réalisées après réalisation de deux petits trous permettant d'enfoncer la double aiguille de la sonde.

Trois mesures ont été réalisées sur les éprouvettes: deux sur le diamètre (une mesure en partie haute, l'autre dans la zone médiane de l'éprouvette sur une génératrice opposée) et une à partir du fond de l'éprouvette.

Après stabilisation de la température de l'échantillon, une mesure de la conductivité et de la diffusivité est effectuée à l'aide d'une double aiguille de 1,3 mm de diamètre et de 30 mm de long.

Le principe de mesure est basé sur la dissipation de chaleur après fourniture d'une quantité de chaleur donnée à l'échantillon. L'évolution de la température est mesurée à une distance donnée (6mm) de la source de chaleur. Les paramètres conductivité et diffusivité sont calculés automatiquement par l'appareil par calage des points expérimentaux sur la courbe théorique de dissipation de chaleur.

Le laboratoire Antea Group dispose d'un bloc étalon en Delrin pour vérifier le calibrage de l'appareil.

Date du rapport
29/06/2012

Numéro de rapport
Lab12041

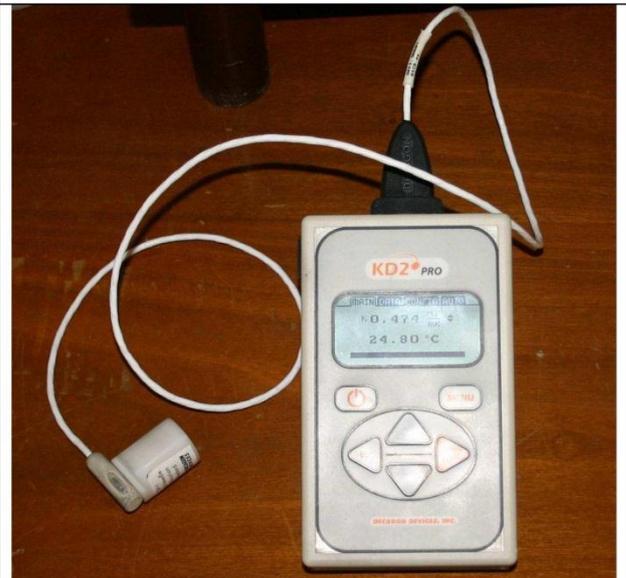
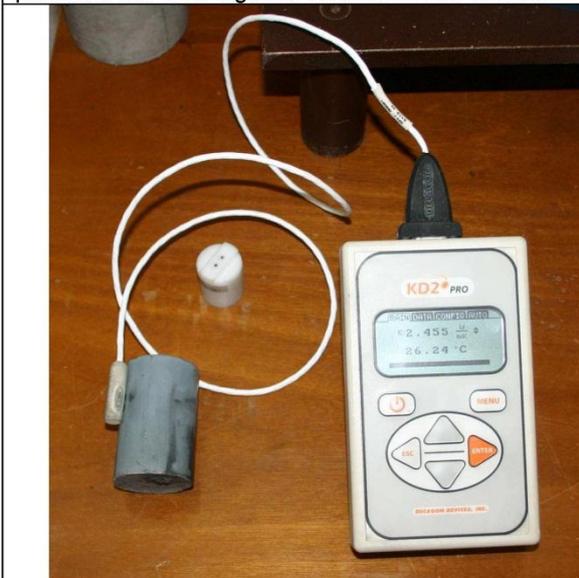
Page
4 sur 4

Photographies



Dispositif de perçage des éprouvettes garantissant la verticalité et le parallélisme des deux petits trous afin de préserver les deux aiguilles de la sonde de mesure

Détail du dispositif de perçage



Mesure des propriétés thermiques

Contrôle de l'étalonnage de l'appareil à l'aide du bloc étalon en Delrin

LOGO Labo

Laboratoire d'essais xxxx
Tél. : xxx - Fax : xxxx

RAPPORT D'ESSAIS

**Client : BRGM – Département géothermie
à l'attention de Monsieur Pascal MONNOT
3, avenue Claude Guillemin
45060 ORLEANS CEDEX 2
p.monnot@brgm.fr**

Responsable de la mesure : C.Pufahl, HeidelbergCement

Echantillons

Date de réception	Quantité	Origine
30/05/2012	5 éprouvettes de coulis moulées	HEIDELBERG
Description		
Eprouvettes cylindriques diam.8 cm, h.10 cm		

Ce rapport comporte 3 page(s)

Sommaire du rapport

1 tableau de résultats d'essais en laboratoire

Annexes :

Procédure pour réaliser la mesure de conductivité thermique :

1. **Les laboratoires** envoient pour le **25 mai** 10 éprouvettes/moules à Heidelberg. Pour les méthodologies nécessitant 2 éprouvettes (disque chaud par ex), les laboratoires envoient 20 moules/éprouvettes. **L'objectif est d'obtenir 10 valeurs de mesures de kth.**
2. **Heidelberg** conditionne les éprouvettes de la façon suivante pour retourner les éprouvettes aux laboratoires (à partir **13 juin**) :
 - Avant l'envoi : atmosphère humide
 - pour l'envoi aux laboratoires : éprouvettes entourées d'un linge mouillé dans un sac plastique scellé (après 2 semaines de durcissement)
3. **Laboratoires** : le conditionnement des éprouvettes avant la mesure sera de les laisser dans un bac d'eau à 20 degrés.
4. **Laboratoires** : les mesures de conductivité thermique seront réalisées le **27 juin** par les différents laboratoires. Les laboratoires appliqueront **leur propre procédure et décriront précisément leur protocole de mesure**
5. Remise des résultats au BRGM **fin juin**

Remarques et description précise du protocole opératoire (photos éventuelles) :



Manuel de mesure, en pièce jointe ci-dessous



Instruction_manual_I
somet.pdf

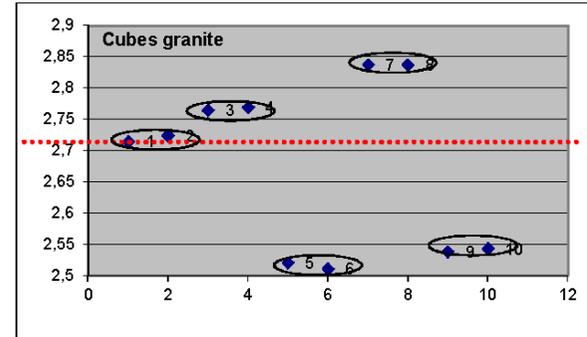
Annexe 6

Résultat de la première série mesures de conductivité sur les éprouvettes de matériau (LRPC)

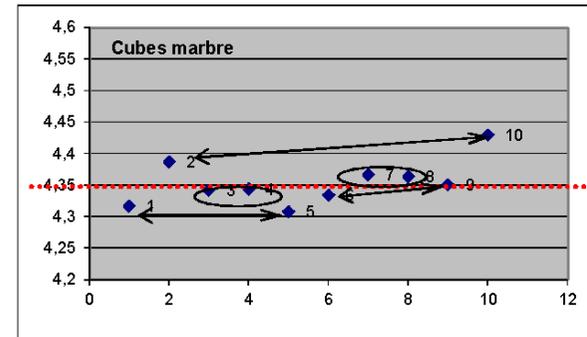
Identification cubes étalons pour intercomparaison

n° de l'éprouvette	Cubes granite	λ mesures CETE	λ mesurée sur 1 éprouvette (Thermoconcept)	Labo destinataire 1 paire d'éprouvettes
1	LME.GR1	2,714		CETE Est
2	LME.GR2	2,724	X	CETE Est
3	LME.GR3	2,764		Labo 2
4	LME.GR4	2,769		Labo 3
5	LME.GR5	2,521		Labo 4
6	LME.GR6	2,511		Labo 5
7	LME.GR7	2,837		Labo 4
8	LME.GR8	2,837		Labo 4
9	LME.GR9	2,538		Labo 5
10	LME.GR10	2,543		Labo 5

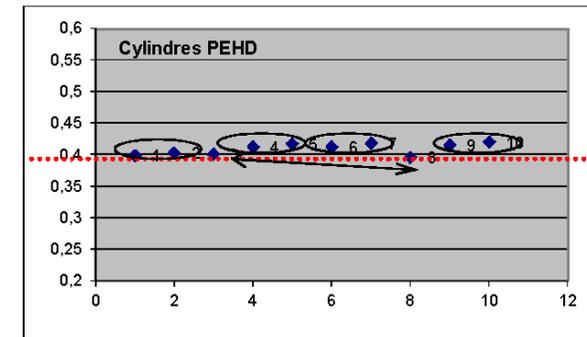
CETE Est
Labo 2
Labo 3
Labo 4
Labo 5



n° de l'éprouvette	Cubes marbre	λ mesures CETE	λ mesurée sur 1 éprouvette (Thermoconcept)	Labo destinataire 1 paire d'éprouvettes
1	LME.MA1	4,317		Labo 2
2	LME.MA2	4,387		Labo 4
3	LME.MA3	4,342		CETE Est
4	LME.MA4	4,344	X	CETE Est
5	LME.MA5	4,308		Labo 3
6	LME.MA6	4,335		Labo 5
7	LME.MA7	4,367		Labo 2
8	LME.MA8	4,364		Labo 3
9	LME.MA9	4,351		Labo 5
10	LME.MA10	4,43		Labo 4



n° de l'éprouvette	Cylindres PEHD	λ mesures CETE	λ mesurée sur 1 éprouvette (Thermoconcept)	Labo destinataire 1 paire d'éprouvettes
1	LME.PEHD1	0,399		CETE Est
2	LME.PEHD2	0,403		CETE Est
3	LME.PEHD3	0,401	X	Labo 2
4	LME.PEHD4	0,413		Labo 3
5	LME.PEHD5	0,417		Labo 4
6	LME.PEHD6	0,413		Labo 5
7	LME.PEHD7	0,418		Labo 4
8	LME.PEHD8	0,396		Labo 2
9	LME.PEHD9	0,415		Labo 5
10	LME.PEHD10	0,42		Labo 3



Annexe 7

Résultat du contre étalonnage réalisé par Thermoconcept

THERMOCONCEPT

THERMOCONCEPT
25, rue Marcel Issartier
Bât. Aero Business Center,
Bureau 12, RdC
33 700 MERIGNAC

Tél : 05 47 74 62 12
Fax : 05 47 74 62 13
Mél : huillery@thermoconcept-sarl.com
<http://www.thermoconcept-sarl.com>

SIRET 480 595 453 00014 - Code APE 332 B – TVA FR 02 480 595 453

Bulletin d'analyses n°011 du 28 février 2013

Mesure de la conductivité thermique de matériaux de référence par méthode Hot Disk	Nb Pages :	7
	Dt Nb pages Annexes :	0
Destinataire :	Monsieur Christophe POINCLOU	
Société :	Antea Group Laboratoire d'essais géomécaniques 3 avenue Claude Guillemein 45100 Orléans	
V / Référence :	Commande PLAD12013	
N / Référence	BA/0169/011-0213/AR Devis 024-1012 ANTEA GROUP Prestation	
Date de réception des échantillons :	15/02/2013	
Date de réalisation des analyses :	Du 20/02/2013 au 28/02/2013	
Date d'émission du BA :	28/03/2013	

Visa opérateur :	Visa Opérateur :	Responsable Service Analyses :
Alexandre RENAULT 		Richard HUILLERY 

Ce Bulletin d'Analyses atteste des caractéristiques des échantillons soumis aux essais mais ne préjuge pas des caractéristiques de produits similaires. Il ne constitue donc pas une certification au sens de la Loi du 3 juin 1994.

La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous la forme d'un fac similé photographique intégral

THERMOCONCEPT	
Bulletin d'analyses n°011	BA/0169/011-0213/AR
	Page 2/7

I. ECHANTILLONS

Référence client	Référence THERMOCONCEPT	Nature
LME.PEHD 01-02	THC/0169/150213.1274	Polymère
LME.GR 01-02	THC/0169/150213.1275	Granite
LME.MA 03-04	THC/0169/150213.1276	Marbre blanc

II. TECHNIQUE D'ANALYSES

POUR LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE :

- ☐ **Technique employée** : HOT DISK TPS
- ☐ **Norme employée** : NI ISO 22007-2 :2008-12 Plastiques - Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique - Méthode de la source plane transitoire (disque chaud).
- ☐ **Conditions opératoires** :
 - Appareillage : Hot Disk TPS 2500 STANDARD + module logiciel STANDARD
 - Référence des sondes :
 - Kapton 5465 (3.189 mm de rayon)
 - Kapton 5501 (6.403 mm de rayon)
 - Kapton 8563 (9.868 mm de rayon)
 - Températures de mesure : Température ambiante

III. ANNEXES

NEANT

THERMOCONCEPT	
Bulletin d'analyses n°011	BA/0169/011-0213/AR
	Page 3/7

IV. RESULTATS

L'objectif premier de cette prestation est de mesurer la conductivité thermique de trois matériaux de référence par la méthode du Hot Disk.

Les résultats obtenus devant être comparés à ceux obtenus par le CETE de Nancy et également permettre à ce dernier d'affiner ou de confirmer les paramètres expérimentaux utilisés pour caractériser ces matériaux, chaque échantillon a été mesuré avec trois références de sonde différentes et les fichiers d'expérience, ainsi que les tableaux Excel de résultats, ont été joints au bulletin d'analyse.

ECHANTILLON de PEHD

Les tableaux ci-dessous rassemblent les valeurs de conductivité thermique mesurées sur l'échantillon **LME.PEHD 01-02**. λ désigne la conductivité thermique et est exprimée en W/(m.K). Toutes les courbes expérimentales ont été traitées en « Fine-tuned Analysis ».

LME.PEHD 01-02 sonde 5465					
Température (°C)	Puissance (W)	Temps de mesure (s)	R _{sonde} (mm)	Zone de calcul	λ (W/m/K)
22.0	0.03	20	3.189	[45 – 185]	0.4650
22.0	0.03	20	3.189	[45 – 185]	0.4741
22.0	0.03	20	3.189	[45 – 185]	0.4726
Moyenne					0.471
Ecart type relatif					1.03%

LME.PEHD 01-02 sonde 5501					
Température (°C)	Puissance (W)	Temps de mesure (s)	R _{sonde} (mm)	Zone de calcul	λ (W/m/K)
21.0	0.04	80	6.403	[35 – 165]	0.4553
21.0	0.04	80	6.403	[35 – 165]	0.4555
21.0	0.04	80	6.403	[35 – 165]	0.4782
Moyenne					0.463
Ecart type relatif					2.84%

La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous la forme d'un fac similé photographique intégral

THERMOCONCEPT	
Bulletin d'analyses n°011	BA/0169/011-0213/AR
	Page 4/7

LME.PEHD 01-02 sonde 8563					
Température (°C)	Puissance (W)	Temps de mesure (s)	R _{sonde} (mm)	Zone de calcul	λ (W/m/K)
22.0	0.12	320	9.868	[35 – 130]	0.4597
22.0	0.12	320	9.868	[35 – 130]	0.4683
22.0	0.12	320	9.868	[35 – 130]	0.4639
Moyenne					0.464
Ecart type relatif					0.92%

ECHANTILLON de GRANITE

Les tableaux ci-dessous rassemblent les valeurs de conductivité thermique mesurées sur l'échantillon **LME.GR 01-02**. λ désigne la conductivité thermique et est exprimée en W/(m.K). Toutes les courbes expérimentales ont été traitées en « Fine-tuned ».

LME.GR 01-02 sonde 5465					
Température (°C)	Puissance (W)	Temps de mesure (s)	R _{sonde} (mm)	Zone de calcul	λ (W/m/K)
22.5	0.25	10	3.189	[20 – 135]	3.023
22.5	0.25	10	3.189	[20 – 135]	3.018
22.5	0.25	10	3.189	[20 – 135]	3.020
Moyenne					3.02
Ecart type relatif					0.09%

LME.GR 01-02 sonde 5501					
Température (°C)	Puissance (W)	Temps de mesure (s)	R _{sonde} (mm)	Zone de calcul	λ (W/m/K)
22.5	0.6	20	6.403	[35 – 165]	2.927
22.5	0.6	20	6.403	[35 – 165]	2.924
22.5	0.6	20	6.403	[35 – 165]	2.928
Moyenne					2.93
Ecart type relatif					0.07%

La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous la forme d'un fac similé photographique intégral

THERMOCONCEPT

Bulletin d'analyses n°011

BA/0169/011-0213/AR

Page 5/7

LME.GR 01-02 sonde 8563					
Température (°C)	Puissance (W)	Temps de mesure (s)	R _{sonde} (mm)	Zone de calcul	λ (W/m/K)
22.0	0.6	40	9.868	[35 – 170]	2.909
22.0	0.6	40	9.868	[35 – 170]	2.911
22.0	0.6	40	9.868	[35 – 170]	2.907
Moyenne					2.91
Ecart type relatif					0.20%

ECHANTILLON de MARBRE BLANC

Les tableaux ci-dessous rassemblent les valeurs de conductivité thermique mesurées sur l'échantillon **LME.MA 03-04**. λ désigne la conductivité thermique et est exprimée en W/(m.K). Toutes les courbes expérimentales ont été traitées en « Fine-tuned ».

LME.MA 03-04 sonde 5465					
Température (°C)	Puissance (W)	Temps de mesure (s)	R _{sonde} (mm)	Zone de calcul	λ (W/m/K)
23.5	0.45	10	3.189	[30 – 125]	4.862
23.5	0.45	10	3.189	[30 – 125]	4.847
23.5	0.45	10	3.189	[30 – 125]	4.831
Moyenne					4.85
Ecart type relatif					0.32%

LME.MA 03-04 sonde 5501					
Température (°C)	Puissance (W)	Temps de mesure (s)	R _{sonde} (mm)	Zone de calcul	λ (W/m/K)
23.0	0.50	20	6.403	[25 – 170]	4.663
23.0	0.50	20	6.403	[25 – 170]	4.656
23.0	0.50	20	6.403	[25 – 170]	4.649
Moyenne					4.66
Ecart type relatif					0.15%

La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous la forme d'un fac similé photographique intégral

THERMOCONCEPT	
Bulletin d'analyses n°011	BA/0169/011-0213/AR
	Page 6/7

LME.MA 03-04 sonde 8563					
Température (°C)	Puissance (W)	Temps de mesure (s)	R _{sonde} (mm)	Zone de calcul	λ (W/m/K)
22.0	0.75	40	9.868	[35 – 170]	4.620
22.0	0.75	40	9.868	[35 – 170]	4.608
22.0	0.75	40	9.868	[35 – 170]	4.638
Moyenne					4.62
Ecart type relatif					0.33%

CONFIDENTIEL

THERMOCONCEPT	
Bulletin d'analyses n°011	BA/0169/011-0213/AR
	Page 7/7

V. BILAN DE LA PRESTATION

Voici, pour chaque matériau, le tableau récapitulatif des résultats des essais réalisés :

LME.PEHD 01-02			
Réf. sonde	R_{sonde} (mm)	Profondeur de pénétration (mm)	λ (W/m/K)
5465	3.189	4.68	0.471
5501	6.403	8.55	0.463
8563	9.868	15.45	0.464

LME.GR 01-02			
Réf. sonde	R_{sonde} (mm)	Profondeur de pénétration (mm)	λ (W/m/K)
5465	3.189	6.11	3.02
5501	6.403	9.85	2.93
8563	9.868	14.63	2.91

LME.MA 03-04			
Réf. sonde	R_{sonde} (mm)	Profondeur de pénétration (mm)	λ (W/m/K)
5465	3.189	6.65	4.85
5501	6.403	11.23	4.66
8563	9.868	15.79	4.62

Les résultats présentés ci-dessus montrent que la sonde utilisée pour la mesure n'a pas d'influence sur la valeur de conductivité thermique mesurée (on observe un très faible écart entre les mesures réalisées avec la sonde 5465 et celles réalisées avec les autres sondes).

La profondeur de pénétration disponible étant très importante pour chacun des échantillons il faut donc, si possible, privilégier l'utilisation d'une sonde de grand diamètre (8563 par exemple) qui permettra de sonder un volume plus important et de mesurer, par conséquent, des propriétés thermiques représentatives du matériau.

La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous la forme d'un fac similé photographique intégral

Annexe 8

Résultat de la deuxième série de mesures de conductivité sur les éprouvettes de matériau (LRPC)

Cubes granite	λ mesures CETE	λ Thermoconcept 5465 [20-135]	λ Thermoconcept 5501 [35-165]	λ CETE 5501 [35-165]	Ecart CETE - Thermoconcept (%)	λ Thermoconcept 8563 [35-170]	Labo destinataire 1 paire d'éprouvettes
LME.GR1-2	2,714	3,023	2,927	2,762	5,64	2,909	CETE Est
LME.GR1-2	2,724	3,018	2,924	2,778	4,99	2,911	CETE Est
LME.GR1-2	X	3,02	2,928	2,806	4,17	2,907	CETE Est
LME.GR3-4	2,764						
LME.GR3-4	2,769						
LME.GR5-6	2,521						
LME.GR5-6	2,511						
LME.GR7-8	2,837						
LME.GR7-8	2,837						
LME.GR9-10	2,538						
LME.GR9-10	2,543						

Cubes marbre	λ mesures CETE	λ Thermoconcept 5465 [30-125]	λ Thermoconcept 5501 [35-165]	λ CETE 5501 [35-165]	Ecart CETE - Thermoconcept (%)	λ Thermoconcept 8563 [35-170]	Labo destinataire 1 paire d'éprouvettes
LME.MA1-2	4,317						
LME.MA1-2	4,387						
LME.MA3-4	4,342	4,862	4,663	4,255	8,75	4,62	CETE Est
LME.MA3-4	4,344	4,847	4,656	4,273	8,23	4,608	CETE Est
LME.MA3-4	X	4,831	4,649	4,211	9,42	4,638	CETE Est
LME.MA5-6	4,308						
LME.MA5-6	4,335						
LME.MA7-8	4,367						
LME.MA7-8	4,364						
LME.MA9-10	4,351						
LME.MA9-10	4,43						

Cylindres PEHD	λ mesures CETE	λ Thermoconcept 5465 [45-185]	λ Thermoconcept 5501 [35-165]	λ CETE 5501 [35-165]	Ecart CETE - Thermoconcept (%)	λ Thermoconcept 8563 [35-170]	Labo destinataire 1 paire d'éprouvettes
LME.PEHD1-2	0,399	0,465	0,4553	0,4075	10,50		CETE Est
LME.PEHD1-2	0,403	0,4741	0,4555	0,4104	9,90		CETE Est
LME.PEHD1-2	X	0,4726	0,4782	0,3954	17,31		CETE Est
LME.PEHD3-4	0,401						
LME.PEHD3-4	0,413						
LME.PEHD5-6	0,417						
LME.PEHD5-6	0,413						
LME.PEHD7-8	0,418						
LME.PEHD7-8	0,396						
LME.PEHD9-10	0,415						
LME.PEHD9-10	0,42						

Éprouvette de coulis	λ CETE 27/06/12		λ CETE 25/02/13
TC7	1,928	lame d'eau	2,08
TC7	2,067	sec	2,133
TC8	1,855	lame d'eau	1,856
TC8	1,752	sec	1,642
TC10	2,06	lame d'eau	1,892
TC10	1,988	sec	1,703

Annexe 9

Résultat de la troisième série de mesures de conductivité thermique sur les éprouvettes de matériau (synthèse)

échantillons de références

		Deuxième série			
Cubes granite	λ Thermoconcept Valeur moyenne	λ CETE 5501 [35- 165]	ANTEA	RENNES	HEIDELBERG
		Moy. GR01-02	2.952	3.065	2.978
Moy. GR01			2.964		2.828
Moy. GR02			2.992		2.946
Moy. GR03-04			2.999		
Moy. GR03			3.01		
Moy.e GR04			3.06		
Moy. GR5-6				2.975	
Moy. GR7-8		3.096			
Moy. GR9-10		2.909			
Moy. GR9					2.944
Moy. GR10					2.870
Moyenne	2.952	3.023	3.001	3.059	2.895

		Deuxième série			
Cubes marbre	λ Thermoconcept Valeur moyenne	λ CETE 5501 [35- 165]	ANTEA	RENNES	HEIDELBERG
		Moy. MA01-02		4.707	
Moy. MA01					4.524
Moy. MA02					4.526
Moy. MA3-4	4.708	4.681	4.635	4.772	4.510
Moy. MA03			4.676		4.604
Moy. MA04			4.595		4.416
Moy. MA5-6				4.844	
Moy. MA7-8		4.825			
Moy. MA09			4.620		
Moy. MA10			4.677		
Moyenne	4.708	4.738	4.641	4.808	4.518

		Deuxième série			
Cylindres PEHD	λ Thermoconcept Valeur moyenne	λ CETE 5501 [35- 165]	ANTEA	LGCGM- RENNES	HEIDELBERG
		Moy. PEHD1-2	0.467	0.448	0.431
Moy. PEHD1			0.431		0.454
Moy. PEHD2			0.432		0.440
Moy. PEHD3			0.435		
Moy. PEHD4			0.432		
Moy. PEHD5-6				0.45974	
Moy. PEHD7-8		0.440			
Moy. PEHD 9					0.449
Moy. PEHD10					0.441
Moyenne	0.467	0.444	0.432	0.449	0.446

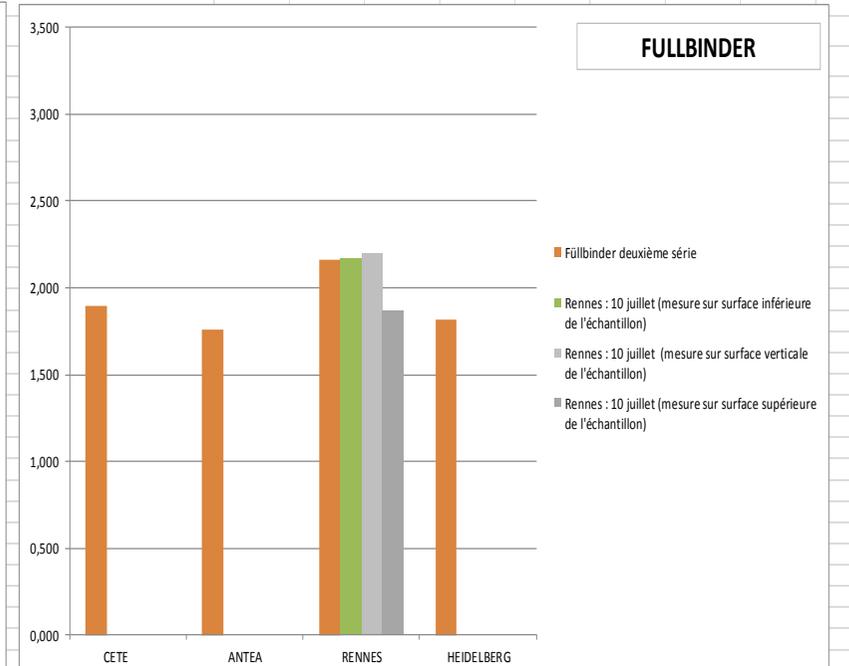
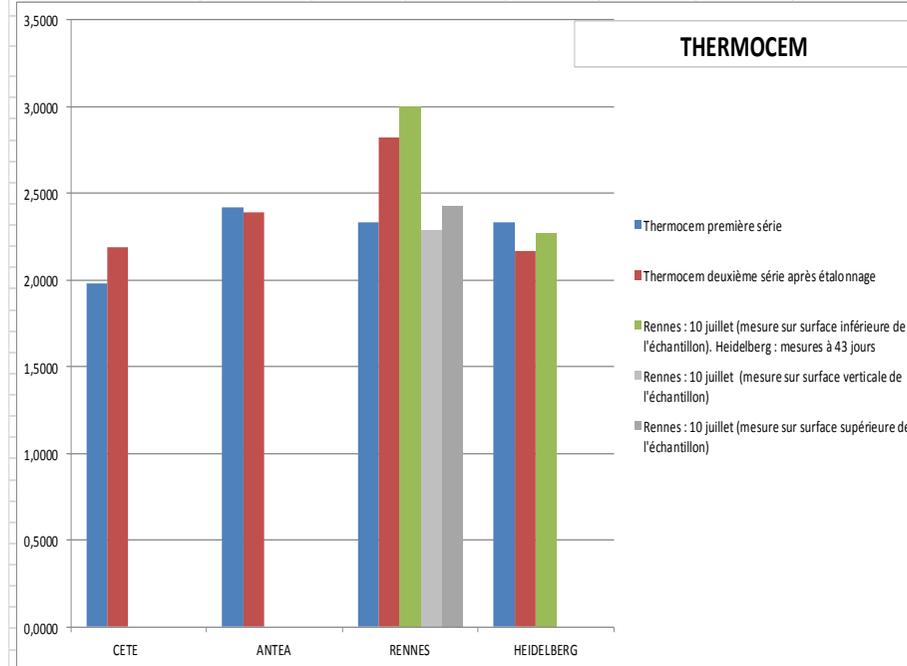
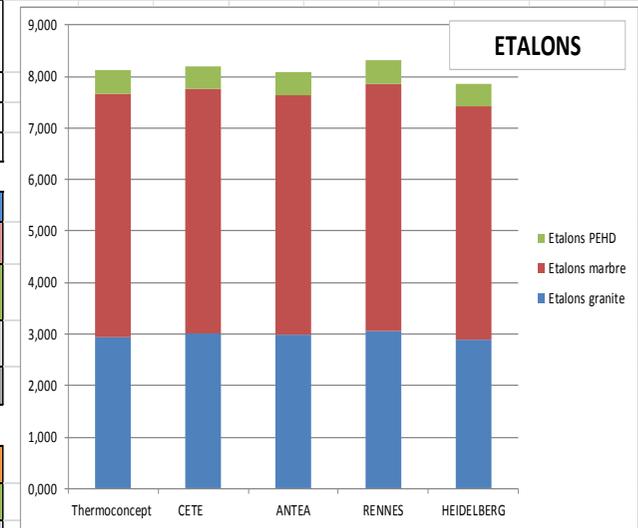
Annexe 10

Résultat de la deuxième série de mesures de conductivité thermique sur les coulis Thermocem et Füllbinder (synthèse)

Valeurs moyennes de conductivité thermique (W/mK) (sans les extrêmes)	Thermoconcept	CETE	ANTEA	RENNES	HEIDELBERG	Ecart Type	Commentaires
Etalons granite	2,952	3,023	3,001	3,059	2,895	0,064	
Etalons marbre	4,708	4,738	4,641	4,8	4,518	0,110	
Etalons PEHD	0,467	0,444	0,432	0,4	0,446	0,012	

Thermocem première série		1,9770	2,421	2,330	2,333	0,197	
Thermocem deuxième série après étalonnage		2,187	2,39	2,819	2,165	0,303	Rennes : 15 mai (mesure sur surface inférieure de l'échantillon) Heidelberg : mesures à 7 jours
Rennes : 10 juillet (mesure sur surface inférieure de l'échantillon). Heidelberg : mesures à 43 jours				3,002	2,270	0,518	Rennes : 10 juillet (mesure sur surface inférieure de l'échantillon) Heidelberg : mesures à 43 jours
Rennes : 10 juillet (mesure sur surface verticale de l'échantillon)				2,288			Rennes : 10 juillet (mesure sur surface verticale de l'échantillon)
Rennes : 10 juillet (mesure sur surface supérieure de l'échantillon)				2,429			Rennes : 10 juillet (mesure sur surface supérieure de l'échantillon)

Füllbinder deuxième série		1,898	1,76	2,159	1,813	0,177	Rennes : 15 mai (mesure sur surface inférieure de l'échantillon) Heidelberg : mesures à 43 jours
Rennes : 10 juillet (mesure sur surface inférieure de l'échantillon)				2,170			Rennes : 10 juillet (mesure sur surface inférieure de l'échantillon)
Rennes : 10 juillet (mesure sur surface verticale de l'échantillon)				2,198			Rennes : 10 juillet (mesure sur surface verticale de l'échantillon)
Rennes : 10 juillet (mesure sur surface supérieure de l'échantillon)				1,866			Rennes : 10 juillet (mesure sur surface supérieure de l'échantillon)



Annexe 11

PR NFX10-950 : projet de texte de support à l'avant-projet de *norme* (V11)

Forage d'eau et de géothermie

Objet	PR Erreur ! Source du renvoi introuvable. 11/07/13
Diffusion	Membres du groupe de travail V11
Suite à donner	
Source	

CONFIDENTIEL

En bleu : ajouts et corrections effectués en séance

En vert points en suspens (pour validation ou correction ultérieure)

CONFIDENTIEL

PR Erreur ! Source du renvoi introuvable.

COULIS GEOTHERMIQUE

Coordinateur du projet :

P. Monnot BRGM p.monnot@brgm.fr

Membres du groupe de travail

Ph. Henaut HERMES TECHNOLOGIE henaut@hermes-technologie.com ;

Ch. Pufahl HEIDELBERGCEMENT christof.pufahl@heidelbergcement.com

Ch. Lanos UNIVERSITE RENNES christophe.lanos@uviv-rennes1.fr

B. Demarcq MCCF / Soletanche-Bachy Bruno.DEMARCQ@mccf.fr

O. Gruget IDEMIX olivier.gruget@idemix.fr ;

Ch. Poinclou ANTEA christophe.poinclou@anteagroup.com ;

J-S Guedon IDTE/IFSTTAR jeanne-sylvine.guedon@ifsttar.fr ;

B. Sustrac LAVIOSA – MPC Bernard.SUSTRAC@mpcfr.com

P. Monnot BRGM p.monnot@brgm.fr

M. Herbaux CETE EST/LCPC margaret.herbaux@developpement-durable.gouv.fr ;

L. Nicolas SUD-CHEMIE Laurent.NICOLAS@sud-chemie.fr ;

W. Erben SCHWENK Erben.Walter@schwenk.de ;

Ph. Blanc BRGM p.blanc@brgm.fr

L. Callier (BRGM) l.callier@brgm.fr

B. Chevrier BRGM b.chevrier@brgm.fr

Diffusion pour information :

Ph. Laplaige (ADEME) philippe.laplaige@ademe.fr

R. Vernier (BRGM) r.vernier@brgm.fr

M. Hervé DGALN DEB Matthieu.Herve@developpement-durable.gouv.fr

PR NF X10-950

Avant-propos

Les fondements visés par le présent document sont :

- **la protection de l'environnement, en particulier le sous-sol et la qualité des eaux souterraines ;**
- **la durabilité des coulis géothermiques et la pérennité des installations géothermiques utilisant ce produit**

Les objectifs d'une cimentation sont :

- **Empêcher la mise en connexion des nappes souterraines ;**
- **Permettre un bon transfert thermique entre le sous-sol et l'échangeur ;**

Les essais réalisés par le fabricant permette de valider en laboratoire que le coulis résiste à la durée d'exploitation de l'installation géothermique ainsi que dans le contexte géologique d'exploitation (profondeur, contraintes, agressions chimiques).

CONFIDENTIEL

PR Erreur ! Source du renvoi introuvable.

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie les exigences, les essais de caractérisation, les prescriptions de préparation et de mise en œuvre des coulis géothermiques pour échangeurs très basse énergie en circuit fermé mis en œuvre par forage.

Il s'applique aux coulis spécialement conçus pour les sondes géothermiques verticales et faisant référence à la NF X 10-970. Il s'applique aux températures de fluide caloporteur comprises -10 °C à + 40 °C (à confirmer)

Ce document ne s'applique pas aux échangeurs plans à circuit fermé (capteurs horizontaux) ainsi qu'aux forages d'eau utilisés pour la géothermie.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

NF X10-970

EN 196-1, *Méthodes d'essais des ciments — Détermination des résistances mécaniques.*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions, symboles et abréviations indiqués dans la NF EN 12201-1 et la NF EN 15875-1 suivants s'appliquent.

3.1 Adjuvants

Produit ajouté dans le coulis prêt-à-gâcher, en petite quantité, pour modifier les propriétés du coulis frais ou durci.

3.2 Produits d'addition

Matériau minéral ou non finement divisé mélangé dans le coulis prêt à gâcher afin d'améliorer certaines propriétés.

3.3 Ciment

Liant hydraulique conforme à la norme NF EN 197-1

3.4 Coulis à maturité

Coulis ayant acquis la résistance nominale du produit, telle que définie par le constructeur.

3.5 Coulis fluide

Mélange homogène de liant, de produit d'addition et d'eau, pouvant contenir éventuellement des adjuvants.

3.4 Coulis prêt à gâcher

Mélange homogène de liant, de produit d'addition, sans eau, pouvant contenir éventuellement des adjuvants, conditionnés en sac ou en vrac.

PR NF X10-950

4 Description des essais

4.1 Eco compatibilité du coulis.

XP X 31-211 d'avril 2000 : Déchets. Essai de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification (1x24 heures).

NF EN 12 457-2 de décembre 2002 : Caractérisation des déchets. Lixiviation. Essai de conformité pour la lixiviation des déchets fragmentés et des boues :

La lixiviation est réalisée pendant 24 h avec un rapport liquide/solide (L/S) de 10 (possibilité de L/S de 2 également).

Plusieurs possibilités pour réaliser les essais :

- A température ambiante :

Les lixiviations sont réalisées à température ambiante sur des échantillons de coulis tamisés à 4 mm (norme 12457-2), tamisés à 10 mm (norme 12457-4), concassés ou en carotte entière, avec analyse des métaux (arrêté du 11 janvier 2007 relatif à l'eau potable) et du pH.

- A différentes températures (spécificité de la géothermie) :

Les lixiviations sont réalisées à différentes températures (température ambiante, 60 °C, 90°C, etc.) et/ou sur un cycle 0-20°C à définir, en utilisant un agitateur chauffant, sur carottes broyées de coulis (il faudra choisir la taille du tamis), des carottes de coulis concassés ou entières (à voir).

4.2 Exigences liées au coulis frais

4.2.1 Essai de fluidité

NOTE Deux méthodes d'essai sont décrites, mais une seule est à mettre en œuvre selon le cas suivant le type ou les caractéristiques du coulis.

4.2.1.1 Méthode du cône de Marsh

Note : les coulis peuvent présenter des propriétés thixotrope, le cône de Marsh peut ne pas représenter la fluidité du coulis. Il est recommandé de s'orienter dans ce cas vers la méthode de la mesure de la densité.

4.2.1.1.1 Principe de l'essai

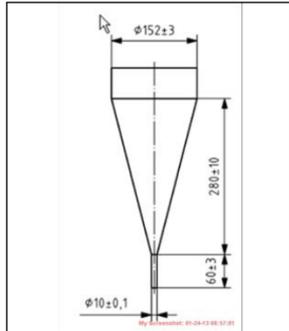
La fluidité du coulis, exprimée en secondes, est évaluée comme le temps nécessaire pour qu'une quantité donnée de coulis (1 l) s'écoule par l'orifice du cône dans des conditions spécifiées.

4.2.1.1.2 Appareillage

L'appareillage suivant est nécessaire pour la réalisation de l'essai :

- Cône de Marsh avec ajutage de 4,76 mm (domaine d'application des boues)
- Cône de Marsh avec ajutage de 10.00 mm NF P18-507, EN 445 (domaine d'application des coulis chargés en sable par exemple).
 - a) un cône dont les dimensions sont données à la Figure 1. Le cône doit être en une matière lisse non absorbante. Le volume du cône (hormis les parties cylindriques au sommet et à la base) doit être :
 - b) un chronomètre précis à 1 s près ;
 - c) un récipient cylindrique gradué d'une capacité minimale d'un litre.

PR Erreur ! Source du renvoi introuvable.



NOTE Le cône représenté en Figure 1 est disponible en matière plastique.

4.2.1.1.3 Mode opératoire d'essai

4.2.1.1.3.1 Préparation

Toutes les surfaces du cône doivent être propres et doivent être mouillées de manière que les surfaces soient humides mais exemptes d'eau ruisselante. Fermer l'orifice inférieur du cône avec le doigt.

4.2.1.1.3.2 Mode opératoire

Verser le coulis pour remplir la section conique du cône. Le coulis doit être versé suffisamment lentement pour éviter tout emprisonnement d'air. Ouvrir l'orifice inférieur du cône et déclencher simultanément le chronomètre. Mesurer à 1 s près le temps mis par un litre de coulis pour passer dans le récipient cylindrique gradué. Le cas échéant, le coulis doit être maintenu agité dans l'attente d'un essai complémentaire.

4.2.2 Essai granulométrique par tamisage par voie humide

4.2.2.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à verser une quantité de coulis à travers un tamis afin de s'assurer de l'absence d'agrégats sur le tamis.

4.2.2.2 Appareillage

Un tamis de diamètre égal à 150 mm, d'ouverture de maille ≤ 1 mm.

4.2.2.3 Conduite de l'essai

Verser au minimum 1 l de coulis fraîchement malaxé à travers le tamis. Laver à l'eau claire. Comparer le refus aux données du constructeur.

NOTE Ceci peut être réalisé lors du remplissage du cône d'essai de fluidité.

4.2.3 Ressuage

4.2.3.1 Principe de l'essai

Cet essai fournit les variations de volume et les mesures du ressuage. Le ressuage est mesuré comme étant le volume d'eau restant à la surface du coulis qui a été laissé au repos, à l'abri de l'évaporation. La variation de volume est mesurée comme étant une différence en pourcentage du volume de coulis entre le début et la fin de l'essai. L'essai mesure principalement la variation de volume due à la sédimentation ou à l'expansion.

4.2.3.2 Équipement

Une éprouvette graduée de 1 litre.

4.2.3.3 Conduite de l'essai

Remplir le tube de coulis avec un débit constant (soit depuis le fond, soit à l'aide d'un tube trémie de petit diamètre) afin de ne pas emprisonner d'air. Remplir le tube à une hauteur, h_0 , de 10 mm environ au-dessous de la graduation supérieure. Boucher le haut du tube afin de réduire au maximum l'évaporation.

Enregistrer l'instant de début t_0 et la hauteur h_0 du coulis.

Enregistrer la hauteur du coulis, h_g , à 3 h et 24 h. Cette dernière mesure donne une valeur approchée du taux de retrait du coulis en cours de prise.

Les mesures ne doivent pas tenir compte du ménisque du coulis.

PR NF X10-950

Enregistrer la hauteur de l'eau de ressuage, h_w , aux mêmes instants que l'enregistrement de celle du coulis (Voir Figure 4).

Enregistrer les éventuelles hétérogénéités d'aspect du coulis vu à travers le tube transparent. Les hétérogénéités sont, par exemple :

- la formation de lentilles d'eau de ressuage sous le sommet du coulis ;
- une ségrégation donnant naissance à des zones de coulis de couleurs différentes.

NOTE L'enregistrement par intervalles au lieu d'un simple relevé de la valeur finale permet de suivre le comportement des coulis expansifs.

4.2.3.4 Compte-rendu des résultats

Le ressuage s'exprime par

$h_w/h_0 \times 100 \% \dots (1)$ h_w à 3 heures.

La variation de volume est

$(h_g - h_0)/h_0 \times 100 \% \dots (2)$ H_g à 24 heures.

4.2.4 Essai de masse volumique

4.2.4.1 Principe de l'essai

La masse volumique est mesurée comme étant le rapport de la masse au volume à l'état liquide.

Plusieurs normes peuvent permettre la mesure de ce paramètre, l'EN 12350-6 sera mise en œuvre pour la mesure sur les coulis frais.

4.2.4.2 Appareillage

L'appareillage comprend un matériel étalonné pour la mesure du poids et du volume.

NOTE La balance de boue peut constituer un appareillage acceptable.

4.2.4.3 Compte-rendu des résultats

La méthode d'échantillonnage, de mesure du poids et du volume, l'équipement utilisé et la masse volumique déterminée doivent être consignés dans un rapport.

4.2.4.4. Durée pratique d'utilisation (D.P.U) - (délai de mise en œuvre)

Elle sera définie comme le temps au bout duquel l'écoulement au cône de Marsh est supérieur à 100 secondes ou que ce temps reste compatible avec les puissances d'injection des pompes d'injection

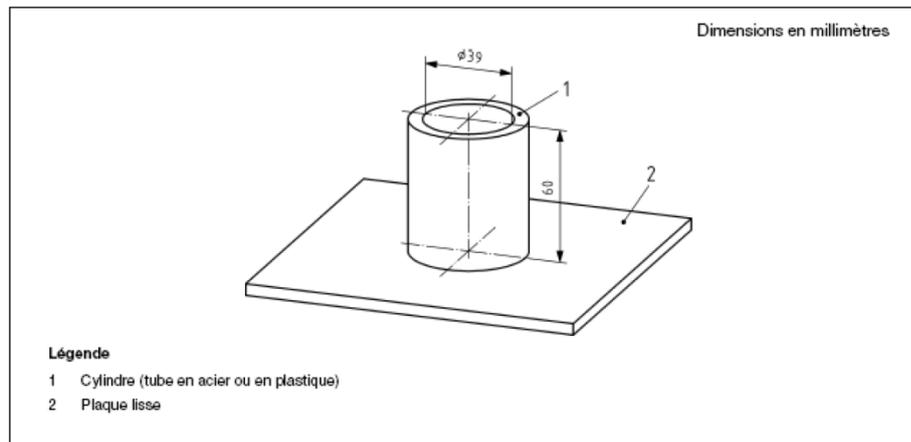
2 cas de figure :

- En cas d'interruption de l'opération de l'injection : avant de reprendre l'injection, s'assurer que la viscosité est toujours adaptée au type de pompe utilisée
- Cas normal (D.P.U fixée par le fabricant) : le fabricant doit donner une viscosité limite à 20°C au-delà de laquelle il n'est plus possible d'injecter, malgré malaxage

4.2.5 : Essai d'étalement (à confirmer si mesure justifiée)

L'essai d'étalement de coulis teste la fluidité des coulis thixotropiques. La fluidité est évaluée à partir du diamètre d'un cercle d'étalement de coulis sur une plaque lisse pour une durée déterminée. Cf. EN 445 § 4.3.2

PR Erreur ! Source du renvoi introuvable.



4.3 Exigences liées au coulis à maturité

4.3.1 Essai de résistance à la compression

4.3.1.1 Principe de l'essai

La résistance à la compression du coulis dans cet essai (qui est une adaptation au coulis des essais mécaniques décrits dans l'EN 196-1) est déterminée sur des moitiés de prisme après fracture par flexion ou éventuellement selon NF P 94-077.

Il y a aussi la NF EN 12390-3. Résistance à la compression sur éprouvette de béton ou NF P 98-232-1 : Essai de compression simple sur graves.

Besoin d'un essai à déplacement contrôlé (remarque M. Lanos)

4.3.1.2 Appareillage

Cf. norme (à définir)

L'appareillage suivant est nécessaire pour la réalisation de l'essai :

- un malaxeur pour coulis conforme aux exigences de l'EN 447 ;
- un matériel de cure conforme à l'EN 196-1 et ayant une précision de 2 °C près ;
- des machines et dispositifs d'essai conformes à l'EN 196-1 ;
- des moules polystyrène ou silicone de 40 mm × 40 mm × 160 mm ;
- un racloir métallique.

4.3.1.3 Mode opératoire d'essai

4.3.1.3.1 Préparation

Les moules et accessoires doivent être préparés et les éprouvettes confectionnées conformément à l'EN 196-1, Excepté pour les cas suivants :

- Chaque moule doit être rempli du coulis préparé. Par dérogation au mode opératoire décrit dans l'EN 196-1 et compte tenu de la fluidité du coulis, les éprouvettes d'essai ne doivent subir ni vibration, ni choc
- Enlever immédiatement l'excès de coulis à l'aide d'un racloir métallique tenu presque à la verticale et déplacé lentement dans un mouvement transversal de scie dans chaque direction. Lisser la surface de l'échantillon à l'aide du même racloir tenu presque à plat. Puis couvrir les éprouvettes avec une plaque en verre. Identifier les éprouvettes d'essai par étiquetage ou marquage.

Les éprouvettes d'essai doivent être démoulées conformément à l'EN 196-1.

4.3.1.3.2 Cure des éprouvettes d'essais

Les éprouvettes d'essai doivent être conservées dans l'eau à (20, 2) °C jusqu'au moment de l'essai.

PR NF X10-950

4.3.1.3.3 Essai de compression

Les essais de compression doivent être réalisés conformément à l'EN 196-1 ou éventuellement selon EN 12390-3.
Définir la géométrie des prismes cf. normes

4.3.1.3.4 Compte-rendu des résultats

Le rapport doit fournir tous les résultats des essais de résistance à la compression, en N/mm².
La valeur obtenue pour chaque essai doit être la moyenne des résultats individuels.

4.3.2 Essai de masse volumique

4.2.4.1 Principe de l'essai

La masse volumique est mesurée comme étant le rapport de la masse au volume à l'état liquide.

- **Coulis à la mise en œuvre**
- Coulis à maturité : cf. NF P94-053 ou EN-12390-7 intervient dans le cadre de la mesure de la conductivité thermique.
- **Cas particulier des matériaux sensibles à l'eau : ne pas mettre en œuvre l'EN-12390-7 (mesure du volume par pesée hydrostatique)**

Il y a aussi la norme XP CEN ISO/TS 17892-2 (Détermination de la masse volumique d'un sol fin)

4.2.4.2 Appareillage

L'appareillage comprend un matériel étalonné pour la mesure du poids et du volume.

4.2.4.3 Compte-rendu des résultats

La méthode d'échantillonnage, de mesure du poids et du volume, l'équipement utilisé et la masse volumique déterminée doivent être consignés dans un rapport.

4-3.2 Mesure de la conductivité thermique (λ)

La mesure de conductivité doit prendre en compte un certain nombre de paramètres, dont :

- Les recommandations du constructeur et le protocole opératoire de l'appareil de mesure ;
- Tous les types de capteurs sont admissibles dans la limite du respect de l'adéquation entre le type de capteur mis en œuvre et la nature du matériau à tester (aiguille, hot disque, fil chaud, plaque chaude, « modified transient plane source technique » (source plane transitoire), laser flash...);

Lors de la mise en œuvre des matériels et matériaux, les conditions d'essais ci-après énumérées devront être respectées :

- le contact entre la sonde et l'échantillon : la lame d'air entre la fiche de mesure et le matériau doit être minimisée et la fiche doit être le plus possible en contact avec le matériau.
- la température : la mesure doit se faire à température constante. En cas de variations de températures durant l'essai, les données entrantes doivent être modifiées.
- la profondeur de pénétration : l'apport calorifique apporté par la fiche thermique doit rester à l'intérieur de l'échantillon. La taille de la sonde, la puissance thermique et le temps de mesure doivent être choisis en conséquence.
- absence d'eau libre (eau mobile) en surface des éprouvettes
- la teneur en eau de l'échantillon : les échantillons doivent être mesurés à l'état saturé. Ils ont été emballés dans un linge humide entre deux mesures pour garder une teneur en eau constante. Les pesées réalisées avant et après les mesures ont montré **que la teneur en eau (rajouter un paragraphe teneur en eau)** est restée constante.
- La densité de l'éprouvette après essai est mesurée conformément au paragraphe 4.2.4.1 (coulis durci)

Ces conditions sont applicables au HOT Disk mais pour les autres appareils? Protocole à définir par chaque appareillage et mettre en annexe.

La norme ISO 22007-2 constitue une référence pour les capteurs de type source plane.

A compléter

4-3.3 Mesure de la perméabilité à l'eau

Les essais devront être réalisés en conformité avec la norme Pr NF X30-443 : Détermination au laboratoire de la perméabilité à saturation d'un sol, au moyen d'un perméamètre à paroi flexible.

4.3.X Teneur en eau (cf norme NF P 94-050)

4-3.4 Durabilité

10

PR Erreur ! Source du renvoi introuvable.

Trois gammes de températures envisageables : -5/+20°C (fonctionnement PAC) ; gel (anomalie fonctionnement) ; 90°C (injection chaleur solaire) : besoin de validation scientifique (R&D)

4-3-4-1 Résistance aux tests gels dégels.

Le coulis devra être non gélif. Ses propriétés thermomécaniques devront rester intactes après n cycles de gels dégels.

Parmi les facteurs de détérioration suivants il n'y a pas encore de protocole de test « normalisable » en dehors du test gel dégel.

On peut se référer aux normes suivantes :

NF EN 12371 : Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la résistance au gel

NF En 1367-1 : détermination de la résistance au gel-dégel des granulats

NF P98-234-1 : essai de résistance au gel-dégel des graves et sables traités.

Exemple de protocole :

10 cycles gel/dégel (selon la norme NF P 98-234-1)

3 RC état initial

6 RC à 5 cycles : 3 témoins (RC) et 3 gel (RC')

6 RC à 10 cycles : 3 témoins (RC) et 3 gel (RC')

On peut ensuite calculer le coefficient de résistance au gel : $G = RC'/RC$

Facteurs de détérioration physique

- a) Les contraintes mécaniques
- b) La dessiccation
- c) L'érosion
- d) La variation de température

Facteurs de détérioration chimiques

- a) Les eaux très pures – peu minéralisées (montagne, glacier, terrains granitiques)
- b) Les eaux acides
- c) Les eaux séléniteuses
- d) Les eaux polluées

4-3-5 Agressivité types de tubes (PEHD – PEX – cuivre) sur les coulis

Corrosivité de l'encaissant (formation + coulis + nappe) sur la sonde ?

4.4 Coulis à maturité

4.4.1 Délai de mise en service de l'installation

Le délai de mise en service de l'installation géothermique ne pourra pas être inférieur aux prescriptions du constructeur sur le délai de maturation de son produit.

4.4.2 Délai pour la réalisation d'essais de contrôle

Le délai pour la réalisation d'essais de contrôle sur le coulis pourra être inférieur aux prescriptions du constructeur sur le délai de maturation de son produit.

5 Tableau des spécifications (à discuter)

Eco compatibilité ?

PR NF X10-950

Après essais de lixiviation, une synthèse des résultats des éléments lixiviables sera présentée de façon à être comparée aux seuils prescrits dans le décret n°2001-1220 du 20/12/01, annexe III

Cone de marsh < 100 secondes

Etallement **à discuter**

Granulométrie : Pas de rejet à 1mm

Ressuage < 1%

Variation de volume **à discuter**

Masse volumique conforme aux indications.

Résistances >2 MPa à 7 jours **à déterminer à 28 jours, un référentiel potentiel existant NF EN 197-1**

Lambda > 2 W/mK

Valeur de conductivité affichée dans la PR NF X10-950 :

- Précision de la mesure (selon le protocole donné en annexe informative) : tolérance 5%
- Performance nominale constructeur : 2W/mK (valeur minimale limite : 1.9 W/mK)

La perméabilité du matériau à 28 jours de maturation devra être inférieure à 10^{-11} m/s (ou 10^{-1} millidarcy) **à discuter**

Test de gels dégels **à discuter**

6 Informations à fournir à la demande sur fiche technique.

Le fabricant fourni des éléments majeurs de la composition de son coulis (type de granulat, filaire, ciment, adjuvants, liants spéciaux).

Eau par M3 de coulis, poids d'eau par poids de coulis, Poids spécifique, perméabilité, rapport gel-dégel. Résistance mécanique, ressuage. Retrait. Tous ces essais doivent être refait en cas de modification de la formulation.

7 Évaluation de la conformité

7.1 Contrôle de production

Le fabricant du coulis doit exercer un contrôle interne de la fabrication du coulis. Les exigences doivent être documentées. Cette exigence s'applique au coulis dosé à sec dans une usine et au coulis dosé sur le chantier. Le type et la fréquence des contrôles doivent être considérés en fonction du procédé de production. La conformité des matériaux livrés avec la spécification doit être vérifiée. Les matériaux portant la marque CE doivent être réputés satisfaisants et ne nécessitent pas de vérification supplémentaire, sauf en cas de doute justifié. Les produits qui sont considérés comme non conformes doivent être immédiatement marqués et séparés de ceux qui sont conformes.

Bibliographie

[2] EN 445 446 447 , *Coulis pour câbles de précontrainte — Procédures d'injection de coulis.*

Inclure un chapitre pour le remplissage en zone de perte : en cas de zone de perte, le fabricant doit être en mesure de proposer, à partir de son produit, une solution pour assurer l'étanchéité du système. Il ne sera pas tenu de garantir la conductivité du mélange

Annexe 12

Tableau des essais de caractérisation réalisés par les fabricants de coulis sur le Marché

Caractérisation des essais sur les coulis gth tbe

		INFORMATION SUR LA MESURE										SCHWENK Zement KG					SOVEMA	MPC	IDEMIX	ERMES TECHNOLOG	BENTOFRANCE	MCCF
Essais de caractérisation	Testing of specifications	Méthode utilisée	Informations sur la mesure (SCHWENK)	Informations sur la mesure MPC (THERMOPLAST)	Informations sur la mesure IDEMIX (LAMBAMIX)	Informations sur la mesure Hermes (Thermocem)	Informations sur la mesure Béntofrance (Prestobent G)	Références Normatives LR Nancy/lffstar	Valeurs limites	Unités	Füllbinder® L	Füllbinder® L-hs	Füllbinder® H	Füllbinder® H-hs	Füllbinder EWM	CALIDUTHERM	THERMOPLAST	Lambdamix®	ThermoCem® PLUS	PRESTOBENT G		
Rapport eau/matériau sec	% water/dry powder mix										0.7	0.7	0.7	0.7	0.33	0.6	0.65	0.4	0.8	0.79	0.5	
Consommation en matériau sec (1)	dry powder mix										940	940	960	940	1430	1032	1000	1300	810	856	1200	
Densité du coulis	Density of concrete							Densité apparente mesurée en utilisant une balance pressurisée TOTAL (mesures effectuées avant et après la vibration du coulis)			1.60	1.60	1.62	1.60	1.90	1.65	1.65	1.81	1.46	1.53	1,7 -1,75 (plage de valeur)	
Temps d'écoulement - viscosité (Cône de Marsh)	Marsh viscosity (Marsh viscosimeter)		Diamètre de sortie 4,76 mm Hole diam. 11 mm	Cone MARSH Funnel	secondes Cone MARSH Funnel	Marsh Funnel 1 Litre		NF P 18-358 (Coulis courants d'injection pour précontrainte - Mesure de la fluidité et de la réduction d'eau) Viscosimètre FANN 35		s/qt Quarter gallon : 946.3 cm3 (normalisé)	85 (4,76 mm)	80 (4,76 mm)	55 (4,76 mm)	50 (4,76 mm)	70 (4,76 mm)	10	70	75	60-80	60	max 60 s min 45 s	
Ressuage - exsudation (Cylindre de 1000 ml)	Coming-up free water on top (Cylinder 1000 ml)		Après 3 heures 3 hours	Après 3 heures 3 hours	Après 18 h	colonne 1000 mm	Eprouvette 1000ml Mesure à 4h	NF P 18-359 (Mesure de l'exsudation - Coulis courants d'injection pour précontrainte)	≤ -2,00	Vol. %	0.50	0.30	0.90	1.50	1.20	1.00	1	0,5 (%)	1.5	1.00	≤ -2,00 ≤ 4% (on peut avoir 2% avec bento dans le mix)	
Temps de prise du coulis	Concrete solidification time		What exactly do you want to know?	What exactly do you want to know?		plutôt durée pratique d'utilisation	Aiguille de Vicat			Heures Hours	-	-	-	-	-	-	-	-	5	environ 72h	A préciser car il n'y a pas de prise comparable à celle d'un béton. Introduire la notion de durée.	
Résistance à la compression	Compression resistance	Les échantillons conservés à 20 °C dans des formes en polystyrène recouverte	Prismes 40x40x160 mm Après 28 jours Prisms 40x40x160 mm 28 days	Cylindres Dia 7cm Hauteur 15 cm Après 28 jours 28 days	4 x4 X 16 conservation sous eau. 28 jours Après 28 jours 28 days		cylindre diam.40 h 100	*Norme européenne sur béton durci NF EN 12390-3 *Méthodes d'essais des ciment NF EN 196-1	≥ 1,0	N/mm²	2.0	3.5	7.0	6.0	4.0	5.0	239 kPa	3 Mpa	6	1.4	≥ 1,0 ok	
			Quand est atteint à 10 °C le 1,0 N/mm² ? When is obtained 1,0 N/mm² at 10°C?	Quand est atteint à 10 °C le 1,0 N/mm² ? When is obtained 1,0 N/mm² at 10°C?							-	-	-	-	-	72 hours			6			
Développement de la chaleur d'hydratation (1)	Evolution of concrete wet heat		Dans des conditions adiabatiques In adiabatic conditions	Dans des conditions adiabatiques In adiabatic conditions					≤ 50	°C	25	23	42	30	25	-	-	-	30		≤ 50	
Conductivité thermique	Thermic conductivity		≥ 0,80	≥ 0,80	Appareil double pointe		Méthode du disque chaud	Appareil d'acquisition thermique Hotdisk		W/(m.K)	1.1	1.0	1.1	1.0	-	ca. 2	2	2		1.3	2	
			ca. 2,00	ca. 2,00		1° appareil ISOMET 2104 / 2° fil thermique					-	-	-	-	2.3				2			
Perméabilité à l'eau	Permeability to fresh water		≤ 5x10 ⁻⁹	≤ 5x10 ⁻⁹			cellule trix-axiale, i = 30 (0,3 bar)	Méthode par écoulement transitoire ou "pulse test" développée par Brace et al en 1968		m/s	≤ 1x10 ⁻⁹	≤ 1x10 ⁻¹⁰	≤ 1x10 ⁻⁹	≤ 1x10 ⁻¹⁰	≤ 1x10 ⁻¹⁰	≤ 2,88x10 ⁻¹¹	5x10-10	en cours	< 1 x 10 ⁻¹⁰		< 5x10-9	
			Après 10 cycles gel-dégel ≤ 5x10-9 Après 40 cycles gel-dégel ≤ 5x10-9	Après 10 cycles gel-dégel ≤ 5x10-9 Après 40 cycles gel-dégel ≤ 5x10-9			cellule trix-axiale, i = 30 (0,3 bar)				-	-	-	-	-	≤ 3,76x10 ⁻¹¹			< 1 x 10 ⁻¹⁰			
Cycles gel-dégel	Frost/thaw Cycles	DIN 52104-A					Méthode CETE de l'est (10 cycles gel dégel)	NF P 98-234-1 (essai de résistance au gel des graves et sables traités) : cycle de 24h (min 4h à +10°C et min 14h à -10°C) NF EN 1367-1 (résistance au gel pierres naturelles)			15 (DIN 52104-A)	5 (DIN 52104-A)	5 (DIN 52104-A)	15 (DIN 52104-A)	15 (DIN 52104-A)	10		en cours	oui			
Impact sur la qualité de l'eau souterraine	Aquifer influence and pollution	notion de pollution potentielle du coulis vis-à-vis de l'eau	Métaux lourds Heavy metals	Métaux lourds Heavy metals			notion de pollution potentielle du coulis vis-à-vis de l'eau				sans influence / essai disponible	look environmental deklaration	hvironmental deklaration		cfr certificat "Hygienezeugnis"							
			Sulfate	Sulfate							sans influence / essai disponible	look environmental deklaration	hvironmental deklaration		cfr certificat "Hygienezeugnis"							
			Clorid	Clorid							sans influence / essai disponible	look environmental deklaration	hvironmental deklaration		cfr certificat "Hygienezeugnis"							
			TOC	TOC							sans influence / essai disponible	look environmental deklaration	hvironmental deklaration		cfr certificat "Hygienezeugnis"							
			pH value	pH value							pendant les premières heures	look environmental deklaration	hvironmental deklaration		cfr certificat "Hygienezeugnis"	11.5						
résistance à l'altération aux acides carboniques		aiguille Vicat 90 jrs					aiguille Vicat 90 jrs		< 2 mm	mm									1,5			
Résistance à l'agressivité de l'eau souterraine		notion d'agressivité de l'eau sur le coulis					notion d'agressivité de l'eau sur le coulis															

Annexe 13

Tableau spécifiant les caractéristiques des appareils de mesures utilisés par les laboratoires

Labo	CETE	ANTEA	LGCGM Rennes	HEIDELBERG	SWHENK
Matériel mis en œuvre	Thermoconcept TPS1500 ?	ISOMET 2114 ou DECAGON KD2Pro	CTmètre (CSTB)	ISOMET xxxx	
Type de sonde	Hot Disk (différents diamètres)	Hot disk ou aiguille simple Aiguilles simple ou double	Sonde anneau	Hot Disk	
Puissance dissipée		5 W	4W		
Gammes de mesure		0.3 à 2 W/mK 2 à 6 W/mK			
Temps d'un cycle (chauffage / refroidissement)		4 à 20 mn	180s		
Préparation échantillon rectification usinage éprouvettes		rectification surface plane ou forage trou			
Environnement éprouvette pendant la mesure		Sous cloche, salle climatisée			
Possibilité d'exploitation thermogramme		oui			
Paramètre mesurés		K (ou λ), D, C			



Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34