



Guide de « bonnes pratiques » sur les retours d'expérience des forages géothermiques profonds

Rapport final

BRGM/RP-65443-FR

Juin 2019

Mise à jour : octobre 2021



Guide de « bonnes pratiques » sur les retours d'expérience des forages géothermiques profonds

Rapport final

BRGM/RP-65443-FR

Juin 2019

Mise à jour : octobre 2021

Projet réalisé dans le cadre des conventions n°1431C0342, 1631C0047 et 18IFC0064 entre le BRGM et la direction régionale de l'ADEME Ile-de-France

Hamm V., Bugarel F., Giuglaris E., Goyénèche O., Guttierrez A.

Avec la collaboration de

Hervé J-Y - Forage Assistance

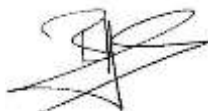
Vérificateur :

Nom Bernard Sanjuan

Fonction : Chef d'unité DGR/REG

Date : 17/06/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : Eric Gomez

Fonction : Directeur régional BRGM
Ile-de-France

Date : 21/06/2019

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : Retours d'expérience, forages géothermiques profonds, aquifère du Dogger, aquifères de l'Albien-Néocomien, fiches techniques : Forage, Tubages, Cimentations, Déviations, Complétion, Diagraphies, Développement et essais, Exploitation

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

Hamm V., Bugarel F., Giuglaris E., Goyénèche O., Guttierrez A. avec la collaboration de Hervé J-Y (2021) – Retours d'expérience sur les forages géothermiques profonds. Rapport final. BRGM/RP-65443-FR, 318 p., 2 tabl., 10 ann.

Synthèse

En date du 19 décembre 2014 (projet REX forages profonds phase 1) et du 26 octobre 2016 (projet REX forages profonds phase 2), le BRGM a été missionné pour réaliser un guide des « bonnes pratiques » d'exécution des forages géothermiques profonds en région Île-de-France, pour le compte du Comité Technique Géothermie sur Aquifères Profonds (CT-GAP), qui réunit les organismes impliqués dans le développement de la géothermie sur aquifères profonds (ADEME, AFGP, AGEMO, BRGM, DRIEAT, SAF-Environnement, SNCU-FEDENE).

Ce guide a pour vocation d'apporter des éléments de recommandations aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, lors de la réalisation de forages géothermiques profonds. Il se base principalement sur les retours d'expérience des forages réalisés au Dogger et à l'Albien/Néocomien, ainsi que des différents travaux de réhabilitation, depuis la reprise en 2007, des forages géothermiques dans le Bassin de Paris.

Le guide a été construit initialement à partir de l'analyse des opérations effectuées entre 2007 et 2018 en Île-de-France, représentant 65 forages au total, dont 55 ciblant l'aquifère du Dogger, 8 l'aquifère de l'Albien et 2 l'aquifère du Néocomien. Il a conduit, dans un premier temps, à l'élaboration de 19 fiches techniques et a été complété, entre 2018 et 2019, par la réalisation de 4 nouvelles fiches, dont une reprise de fiche existante. De nouvelles mises à jour concernant 5 fiches ont été réalisées en 2021 sur la base des retours d'expérience des forages réalisés ces dernières années.

Ces travaux de forage, ou dans certains cas, de rénovation ont permis d'accumuler de l'expérience sur les meilleures techniques ou principes à privilégier pour éviter les dysfonctionnements ou les incidents pouvant remettre en cause la pérennité des exploitations. De nouvelles techniques et de nouveaux matériaux ont également été mis en œuvre.

Ainsi, depuis la relance de la géothermie en 2007, le nombre des opérations géothermiques a en effet augmenté progressivement, principalement sur le territoire de l'Île-de-France, cumulant un lot important d'informations et d'expériences tantôt positives et méritant d'être valorisées en tant que **règles de l'art**, tantôt négatives, immédiatement ou à moyen terme, et pour lesquelles **les fiches présentées proposent des pistes de correction ou d'amélioration ainsi que des recommandations**. Il ne s'agit pas de rendre obligatoire ou normatif les principes de réalisation des puits géothermiques profonds, mais de rappeler les principales règles de l'art à respecter. Il s'agit enfin de proposer, lorsque cela paraît possible, des indicateurs permettant d'apprécier ou d'évaluer la qualité des travaux réalisés.

Le présent guide est constitué, à ce jour, de **22 fiches techniques** classées selon **9 domaines (Rappels des règles de l'art et surface, Forage, Tubages, Cimentations, Déviation, Complétion, Diagraphies, Développements et essais, Exploitation)**. La version intégrale du guide ainsi que chaque fiche individuelle sont consultables et téléchargeables sur le site géothermies <https://www.geothermies.fr/outils/guides/guide-de-bonnes-pratiques-des-forages-geothermiques-profonds-brgm>.

Sommaire

1 Introduction.....	7
1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DU GUIDE DE « BONNES PRATIQUES »	7
1.2 SYNTHÈSE DES OPERATIONS REALISEES ENTRE 2007 ET 2020	8
1.3 LISTE DES FICHES TECHNIQUES PRODUITES DANS LE CADRE DU PROJET 10	
1.4 SYNTHÈSE DES DEFAUTS ET MALFAÇONS OBSERVES DEPUIS 2015	10
2 Synthèse des fiches techniques de retours d'expérience	13
1.5 RAPPEL DES REGLES DE L'ART ET DOMAINE DE SURFACE (CF. ANNEXE 1) 13	
1.1.1.Fiche n°10 - Rappel des principales procédures et règles de l'art	13
1.6 DOMAINE : FORAGE (CF. ANNEXE 2).....	13
1.1.2.Fiche n°21 - Architecture des puits	13
1.1.3.Fiche n°22 - Annulaires restreints	13
1.1.4.Fiche n°23 - Fluides de forage et de complétion	14
1.1.5.Fiche n°24 – Architectures nouvelles de puits.....	14
1.7 DOMAINE : TUBAGES (CF. ANNEXE 3).....	14
1.1.6.Fiche n°33 - Utilisation des tubages en matériaux composites en géothermie profonde	14
1.1.7.Fiche n°34 - Centrage des tubages.....	15
1.8 DOMAINE : CIMENTATIONS (CF. ANNEXE 4).....	15
1.1.8.Fiche n°41 - Modes de cimentation envisageables en cas de risque de fracturation 15	
1.1.9.Fiche n°42 - Evaluation de la durée des attentes de séchage des ciments	15
1.1.10. Fiche n°43 - Abandon des forages	16
1.1.11. Fiche n°44 - Critères qualitatifs d'analyse des diagraphies de contrôle de cimentation (méthodes soniques et ultrasoniques)	16
1.9 DOMAINE : DEVIATIONS (CF. ANNEXE 5)	16
1.1.12. Fiche n°51 - Paramètres des déviations et descriptions des moyens mis en œuvre pour les réaliser	16
1.1.13. Fiche n°52 - Qualité des déviations.....	16
1.10 DOMAINE : COMPLETION (CF. ANNEXE 6)	17
1.1.14. Fiche n°61 - Complétion des aquifères sableux	17
1.11 DOMAINE : DIAGRAPHIES (CF. ANNEXE 7)	17

1.1.15.	Fiche n°72 - Contrôles de cimentation soniques et ultrasoniques ...	17
1.1.16.	Fiche n°73 - Contrôle des tubages par diagraphies (diamètres) ..	18
1.1.17.	Fiche n°74 - Diagraphies applicables à la caractérisation des réservoirs géothermiques profonds.....	18
1.12	DOMAINE : DEVELOPPEMENTS ET ESSAIS (CF. ANNEXE 8)	18
1.1.18.	Fiche n°81 - Détermination de la qualité des opérations de développement en fin de forage	18
1.1.19.	Fiche n°82 - Essais de formation en géothermie basse énergie.....	18
1.13	DOMAINE : EXPLOITATION (CF. ANNEXE 9)	19
1.1.20.	Fiche n°90 - Conditions d'exploitation des installations géothermiques au Dogger	19
1.1.21.	Fiche n°91 - Traitements inhibiteurs de corrosion-dépôts des aciers	19
1.1.22.	Fiche n°92 - Filtration des eaux géothermales en surface.....	20
3	Conclusions.....	21

Liste des tableaux

Tableau 1. Forages géothermiques profonds réalisés entre 2007 et 2020.....	9
Tableau 2. Fiches techniques de retours d'expérience réalisées entre 2015 et 2021	10

Liste des annexes

Annexe 1 Rappel des règles de l'Art et Surface.....	23
Annexe 2 Forage	33
Annexe 3 Tubages.....	79
Annexe 4 Cimentations.....	103
Annexe 5 Déviation.....	145
Annexe 6 Complétion	163
Annexe 7 Diagraphies	175
Annexe 8 Développement et essais	229
Annexe 9 Exploitation	261
Annexe 10 Synthèse des défauts et malfaçons observés depuis 2015.....	297

1 Introduction

1.1 Contexte et objectifs du guide de « bonnes pratiques »

Suite à différentes conventions successives entre le BRGM et l'ADEME Ile-de-France de 2015 à 2019, le BRGM a été missionné **pour réaliser un guide des « bonnes pratiques » d'exécution des forages géothermiques profonds en région Île-de-France**, pour le compte du Comité Technique Géothermie sur Aquifères Profonds (CT-GAP), qui réunit les organismes impliqués dans le développement de la géothermie sur aquifères profonds (ADEME, AFGP, AGEMO, BRGM, DRIEAT, SAF-Environnement, SNCU-FEDENE).

Cette mission s'appuie principalement sur les retours d'expérience de travaux de forages géothermiques nouvellement réalisés, rénovés ou réhabilités, depuis la relance de la géothermie profonde en région Ile-de-France, dans les aquifères du Dogger et de l'Albien-Néocomien.

Les différents travaux de réhabilitation ou de forages de puits géothermiques réalisés ces dernières années (entre 2007 à maintenant) ont permis d'accumuler de l'expérience sur les meilleures techniques ou principes à privilégier pour éviter les dysfonctionnements ou les incidents pouvant remettre en cause la pérennité des exploitations. De nouvelles techniques et de nouveaux matériaux ont également été utilisés.

C'est pourquoi, les organismes impliqués dans le développement de la géothermie sur aquifères profonds ont décidé de procéder à un retour d'expérience le plus exhaustif possible, à partir des travaux effectués lors de nouvelles opérations géothermiques ou à l'occasion de la réhabilitation d'anciennes opérations.

Ces travaux ont fait l'objet d'analyses détaillées, qui ont conduit à la réalisation de fiches techniques récapitulant les principales règles de l'art relatives à la construction de forages géothermiques exploitant des aquifères profonds (principalement Dogger, Albien et Néocomien du Bassin parisien), parfois avec un éclairage nouveau issu de la mise en œuvre de nouvelles technologies, de nouveaux matériels ou matériaux. Ces fiches ont été présentées aux organismes ou entreprises des divers secteurs de la profession pour avoir leur validation lors de comité techniques spécifiques.

Certaines règles, procédures et recommandations mentionnées dans ces fiches sont prises en considération dans l'analyse des dossiers de demande d'aides de l'ADEME dans le cadre du Fonds Chaleur et des demandes de garanties présentées à la SAF Environnement ainsi que lors de l'instruction des demandes d'autorisation de travaux ou d'exploitation par la DRIEAT.

Les professionnels qui se sont attachés à l'élaboration de ces fiches techniques l'ont fait dans un esprit constructif, évolutif et collaboratif. L'objectif était, avant tout, d'améliorer la qualité des opérations géothermiques à court terme (construction des ouvrages) et à long terme (pérennité des exploitations), en proposant des recommandations réalisables, sans surenchère technique et ouvertes aux évolutions, mais de nature à éviter des sinistres très préjudiciables à l'ensemble de la filière.

Il est également laissé aux différents opérateurs, Maîtres d'Œuvre et Maîtres d'Ouvrage, une totale liberté pour procéder à des améliorations de procédure ou pour réaliser des innovations technologiques, dès lors que ces dernières sont clairement motivées et argumentées dans les programmes proposés.

Il ne s'agit pas de rendre obligatoire ou normatif les principes de réalisation des puits géothermiques profonds, mais de rappeler les principales règles de l'art à respecter. Il s'agit enfin de proposer, lorsque cela paraît possible, des indicateurs permettant d'apprécier ou d'évaluer la qualité des travaux réalisés.

Le présent guide est constitué, à ce jour, de **22 fiches techniques** classées selon **9 domaines (Rappels des règles de l'art et surface, Forage, Tubages, Cimentations, Déviation, Complétion, Diagraphies, Développements et essais, Exploitation)**.

Au cours des dernières années, le nombre des opérations géothermiques a en effet augmenté progressivement, notamment sur le territoire de l'Ile-de-France, cumulant un lot important d'informations et d'expériences tantôt positives et méritant d'être valorisées en tant que règles de l'art, tantôt négatives, immédiatement ou à moyen terme, et pour lesquelles les fiches présentées proposent des pistes de correction ou d'amélioration.

1.2 Synthèse des Opérations réalisées entre 2007 et 2020

Le tableau 1 ci-après liste l'ensemble des opérations nouvelles réalisées depuis 2007 et qui ont pu donner lieu, lorsque possible, à un premier retour d'expérience tel que présenté dans le guide. Ces opérations **représentent 73 forages**, dont 61 ciblant l'aquifère du Dogger, 8 l'aquifère de l'Albien, 2 l'aquifère du Néocomien dans le Bassin parisien et 2 ciblant le Crétacé dans le Bassin aquitain.

Opérations géothermiques	Aquifère cible	Année de réalisation	Nombre de puits	Maitre d'Œuvre Sous-sol	Forages
Orly 2 Le Nouvellet	Dogger	2007	2	ANTEA Group	GORY-5/GORY-6a
Sucy-en-Brie	Dogger	2008	1	CFG Services	GSUC-3
Paris Nord-Est	Dogger	2009	2	CFG Services	GPNE-1/GPNE-2
Orly ADP	Dogger	2010	2	CFG Services	GADP-1/GADP-2
La Courneuve-Nord	Dogger	2011	1	GPC I&P	GLCN-3
Val-Maubuée	Dogger	2011	2	CFG Services	GVM-1/GVM-2
Coulommiers	Dogger	2011	2	CFG Services	GCO-3/GCO-4
Le Plessis-Robinson	Néocomien	2011	2	G2H Conseil	GLPR-1/GLPR-2
Bonneuil-sur-Marne	Dogger	2012	1	CFG Services	GBL-3
Champigny-sur-Marne	Dogger	2012	1	CFG Services	GCHM-3
Le Mée-sur-Seine	Dogger	2013	2	ANTEA Group	GLMS-3/GLMS-4
Chelles	Dogger	2013	2	CFG Services	GCHE-3/GCHE-4
Meaux Meauval 1	Dogger	2013	1	CFG Services	GMX-10
Meaux Meauval 2	Dogger	2013	1	CFG Services	GMX-11
Neuilly-sur-Marne	Dogger	2013	2	GPC I&P	GNSM-1/GNSM-2
Issy-les-Moulineaux	Albien	2013	2	G2H Conseil	GILM-1/GILM-1
Meaux Hôpital	Dogger	2014	1	CFG Services	GMX-9
Arcueil-Gentilly	Dogger	2014	2	GPC I&P	GAG-1/GAG-2
Fresnes	Dogger	2014	1	CFG Services	GFR-3
Villejuif	Dogger	2014	2	CFG Services	GVIL-1/GVIL-2
Clichy-Batignolles	Albien	2014	2	TERRE	GZCB-1/GZCB-2
Bagneux	Dogger	2014-2015	2	CFG Services	GBA-1/GBA-2
Rosny-sous-Bois	Dogger	2015	2	CFG Services	GRNY-1/GRNY-2
Villepinte	Dogger	2015	2	ANTEA Group	GVLP-1/GVLP-2
Bailly-Romainvilliers (Village Nature)	Dogger	2015	2	CFG Services	GBR-1/GBR-2
Tremblay-en-France	Dogger	2015	2	CFG Services	GTRE-3/GTRE-4
Ivry-sur-Seine	Dogger	2015	2	CFG Services	GIV-3/GIV-4
Ris-Orangis	Dogger	2015	1	CFG Services	GRO-3
Le Blanc-Mesnil	Dogger	2016	2	CFG Services	GBMN-3/GBMN-4
Grigny II	Dogger	2016-2017	3	GPC I&P	GGR1/GGR2/GGR3
Dammarié-Les-Lys	Dogger	2017	2	ANTEA Group	GDAM1/GDAM2
Saclay Moulon	Albien	2017	2	GPC I&P	GMOU1/GMOU2
Saclay Polytechnique	Albien	2017	2	GPC I&P	GEP1/GEP2
Villiers Le-Bel-Gonesse	Dogger	2017	1	GPC I&P	GVLB3
La Courneuve-Nord	Dogger	2017	1	CFG Services	GLCN-4
Cachan 3	Dogger	2017-2018	2	GPC I&P	GCAH1/GCAH2
Vigneux-sur-Seine	Dogger	2018	2	ANTEA Group	GVS3/GVS4
Bonneuil-sur-Marne	Dogger	2018	1	GPC I&P	GBL-4
Bordeaux PGE	Crétacé (Bassin aquitain)	2019	2	STORENGY	PGE-1/PGE-2
Bobigny-Drancy	Dogger	2019-2020	4	GPC I&P	GBD-1/GBD-2/GBD-3/GBD-4
Champs-sur-Marne	Dogger	2020	2	ANTEA Group	GCSM-1/GCSM-2

Tableau 1. Forages géothermiques profonds réalisés entre 2007 et 2020

1.3 Liste des fiches techniques produites dans le cadre du projet

Thème	N° de fiche	Nom de la fiche	Année de réalisation
Rappel des règles de l'Art et surface	10	Rappels généraux	2015
Forage	21	Architecture des puits	2015 – Mise à jour en 2021
	22	Annulaires restreints	2016
	23	Fluides de forage et de complétion	2016
	24	Architectures nouvelles	2018-2019
	33	Matériaux composites	2015
Tubages	34	Centrage des tubages	2015 – Mise à jour en 2021
Cimentations	41	Modes de cimentations	2015
	42	Attente de séchage du ciment (WOC)	2015
	43	Abandon des forages	2016
	44	Critères analyse cimentations	2016 - 2018 – Mise à jour en 2021
Déviation	51	Paramètres de déviations	2015 – Mise à jour en 2021
	52	Qualité des déviations	2015
Complétion	61	Complétion des aquifères sableux	2015 – Mise à jour en 2021
Diagraphies	72	Contrôle de cimentation	2015
	73	Contrôle des tubages	2018
	74	Diagraphies réservoir	2018-2019
Développement et essais	81	Qualité des opérations de développement	2015
	82	Essais de formation	2016
Exploitation	90	Conditions d'exploitation	2017
	91	Traitements inhibiteurs	2017
	92	Filtration en surface	2017

Tableau 2. Fiches techniques de retours d'expérience réalisées entre 2015 et 2021

Une synthèse du contenu de chaque fiche est donnée dans la section 2 et chacune des fiches est détaillée dans les annexes dédiées 1 à 9 du guide.

1.4 Synthèse des défauts et malfaçons observés depuis 2015

En complément des fiches réalisées, une synthèse des principales malfaçons, défaillances et défauts de conception observés lors de la réalisation des ouvrages géothermiques depuis 2015, en regard des règles de l'art et des recommandations du guide de « bonnes pratiques » sur les retours d'expérience des forages géothermiques profonds a été réalisée et est présentée en annexe 10 du rapport.

Les différents thèmes abordés concernent :

- l'architecture et la structure des puits ;
- les déviations et le contrôle des trajectoires ;
- les tubages de soutènement et les colonnes d'exploitation ;
- le centrage des colonnes ;
- la cimentation des tubages et les attentes de prise du ciment ;
- la complétion des aquifères captés ;
- le développement des zones productrices.

Pour établir ce document, les défauts et anomalies les plus significatifs observés au cours des travaux de forage réalisés entre début 2015 et fin 2020 ont été répertoriés. Cet inventaire ne

prend toutefois en compte que les travaux qui ont fait l'objet - pendant cette période - d'une analyse de conformité à la demande de la SAF.

La liste des défauts et anomalies de cet inventaire n'est volontairement pas éditée afin d'éviter de stigmatiser - ce n'est pas le but de ce document - les maîtres d'ouvrage ou les maîtres d'œuvre des opérations pouvant être concernées. De la même manière, le nom des forages servant d'exemple n'est pas explicitement mentionné. Dans les faits, la quasi-totalité des ouvrages est affectée, le plus souvent heureusement de manière mineure, par un ou plusieurs défauts. Il est seulement souhaité que ce retour d'expérience fournisse à l'ensemble des opérateurs et aux différents intervenants des informations et des pistes de travail qui leur permettent d'améliorer la qualité des futurs ouvrages.

2 Synthèse des fiches techniques de retours d'expérience

1.5 Rappel des règles de l'art et domaine de surface (cf. annexe 1)

1.1.1. Fiche n°10 - Rappel des principales procédures et règles de l'art

Cette fiche rappelle les principales procédures et règles de l'art applicables aux ouvrages géothermiques profonds. Elle est complétée par des notes techniques détaillées lorsque les thématiques spécifiques le nécessitent et auxquelles on se référera autant que nécessaire.

Les rappels des principales procédures concernent :

- les contraintes de surface (plateforme de forage et accès aux têtes de puits) ;
- les outils de forage (diamètre, type, code IADC¹) ;
- les tubages (caractéristiques des tubages et des filetages, stockage, manutention, contrôle, vissage) ;
- les fluides de forage (fabrication, contrôles des paramètres et traitement des fluides) ;
- les diagraphies (différées, instantanées, mud-logging, production) ;
- les têtes de puits ;
- le planning de réalisation ;
- le contrôle des travaux (mode de réalisation, contrôle technique, rapports journaliers IADC).

1.6 Domaine : Forage (cf. annexe 2)

1.1.2. Fiche n°21 - Architecture des puits

La géométrie et la structure des forages géothermiques profonds diffèrent sensiblement de celles que l'on observe le plus souvent dans l'industrie pétrolière. Cette fiche définit les contraintes spécifiques déterminant la structure des forages géothermiques et propose des recommandations ayant pour but d'améliorer la qualité finale des ouvrages : géométrie des ouvrages, recouvrement entre tubages, positionnement des DV², débit maximal admissible en exploitation et choix des tubages.

1.1.3. Fiche n°22 - Annulaires restreints

Cette fiche technique récapitule les spécificités occasionnées par les annulaires restreints dans l'architecture des forages géothermiques neufs ou réhabilités. Elle rappelle principalement l'importance de l'étanchéité (verticale et horizontale) de ces annulaires, en ce qui concerne la qualité des cimentations et la protection des tubages. Dans ce contexte, il est donné des recommandations sur l'espace annulaire³ et le standoff⁴ minimums admissibles.

¹ International Association of Drilling Contractors

² Diverting Valve

³ L'espace annulaire définit l'écart entre deux tubages concentriques ou le tubage et le trou de forage

⁴ Le standoff définit le centrage du tubage

La fiche donne également les précautions à appliquer pour assurer une cimentation de bonne qualité dans un annulaire restreint et qui concernent la géométrie du trou foré, l'efficacité du centrage et la qualité de la mise en place du laitier dans l'annulaire (remplissage et adhérence).

1.1.4. Fiche n°23 - Fluides de forage et de complétion

Cette note technique propose un retour d'expérience sur l'utilisation des fluides de forage et de complétion dans les forages géothermiques profonds du Bassin parisien. Elle est avant tout dédiée à la compréhension du rôle fondamental joué par la boue dans les opérations de forage.

Les différents types de boue utilisés par phase de forage sont décrits ainsi que les principales difficultés, qui peuvent être rencontrées (géométrie du trou foré, pertes partielles ou totales de fluide, collage de la garniture de forage par pression différentielle, prolifération bactérienne, bullage, déstabilisation des argiles). Quelques recommandations qualitatives sont émises, en insistant particulièrement sur les précautions à prendre dans les circonstances spécifiques liées aux opérations de cimentations, aux diagraphies et au forage du réservoir.

1.1.5. Fiche n°24 – Architectures nouvelles de puits

Cette note technique a pour objectif de présenter et de discuter certaines architectures nouvelles ou novatrices qui ont pu être proposées pour le captage des ressources géothermiques dans le Bassin parisien.

Les architectures abordées sont:

- le drain sub-horizontale (exemple des ouvrages de Cachan au Dogger) ;
- le concept de puits anti-corrosion (exemple des ouvrages de Melun l'Almont et de Bonneuil-sur-Marne) ;
- le sur-diamétrage des colonnes de production (cas des doublets de Bobigny-Drancy).

Dans chacun des cas, les spécificités, les avantages et les inconvénients de ces architectures inhabituelles seront analysés et discutés. On s'attachera également à déterminer les éléments les plus sensibles des programmes proposés et à définir d'éventuelles recommandations visant à assurer ou à améliorer la qualité des ouvrages.

1.7 Domaine : Tubages (cf. annexe 3)

1.1.6. Fiche n°33 - Utilisation des tubages en matériaux composites en géothermie profonde

Cette fiche décrit les rares retours d'expérience d'opérations exploitant l'aquifère du Dogger et utilisant des tubages en fibre de verre (Villeneuve-La-Garenne, Courneuve-Sud, Melun l'Almont) et plus récemment, en 2015, Chevilly-Larue et L'Hay-les-Roses où il a été installé des colonnes de rechemisage en fibre de verre. Des opérations similaires ou des projets de puits neufs réalisés en matériaux composites sont également à l'étude. Cette note a pour objectif de faire le point sur les avantages, inconvénients et contraintes que pose l'usage de ce type de matériau (résistance à la corrosion, aspects mécaniques, vieillissement des tubages en composite, contraintes d'utilisation et d'intervention, cimentation, tubages amovibles).

1.1.7. Fiche n°34 - Centrage des tubages

Le centrage efficace des tubages est un des éléments qui détermine la qualité des cimentations des tubages concernés. D'une bonne cimentation découle, directement, la qualité générale et la pérennité des ouvrages. Contrairement aux forages pétroliers, les puits géothermiques utilisent en effet des tubages techniques comme colonnes de production dans lesquelles vont circuler à gros débits des fluides corrosifs. La qualité de la gaine de ciment protégeant l'extrados de ces tubages apparaît donc particulièrement cruciale.

Cette note rappelle les règles que propose l'industrie pétrolière en matière de centrage des colonnes et détermine les recommandations les plus adaptées aux conditions spécifiques de la géothermie.

1.8 Domaine : Cimentations (cf. annexe 4)

1.1.8. Fiche n°41 - Modes de cimentation envisageables en cas de risque de fracturation

Cette note présente les deux principaux modes de cimentation envisageables pour éviter le risque de fracturation hydraulique⁵ (cimentation multi-étagée ou cimentation avec des laitiers allégés ou cimentation mixte de laitiers allégés et lourds en un seul étage), avec leurs avantages et leurs inconvénients réciproques.

Quelques recommandations sont faites pour limiter au mieux certains des inconvénients constatés dans chacune des méthodes.

1.1.9. Fiche n°42 - Evaluation de la durée des attentes de séchage des ciments

La durée des attentes de séchage du ciment (WOC⁶) est un des éléments qualitatifs essentiels de la cimentation des tubages. C'est particulièrement vrai en géothermie profonde où les tubages servent à la fois au soutènement du puits et à l'extraction des fluides produits.

Cette fiche rappelle les règles les plus généralement appliquées dans l'industrie pétrolière et propose des adaptations de celles-ci aux conditions spécifiques de la géothermie. L'importance de l'application d'un temps d'attente de séchage adapté aux différents laitiers utilisés est rappelée.

Les règles définissant le temps d'attente "efficace" sont définies. Un calcul des durées minimales ou forfaitaires (valeurs conservatrices) à respecter est proposé en fonction des données disponibles sur la résistance mécanique des laitiers mis en place.

⁵ Si la densité de la colonne de fluide (boue ou laitier de ciment) devient supérieure à la densité maximale correspondant à la pression de fracturation, une fracturation hydraulique (ou frac) des roches encaissantes devient possible

⁶ Wait On Cement to dry

1.1.10. Fiche n°43 - Abandon des forages

Cette note technique récapitule les procédures et règles d'abandon des forages géothermiques et propose des recommandations pour certains cas spécifiques. Elle décrit également le rôle des cimentations et les processus de vieillissement des tubages et des ciments.

1.1.11. Fiche n°44 - Critères qualitatifs d'analyse des diagraphies de contrôle de cimentation (méthodes soniques et ultrasoniques)

Cette note technique vient en complément de la note n°72 « Contrôles de cimentation soniques et ultrasoniques ». Elle propose de déterminer des critères qualitatifs d'analyse des diagraphies soniques (CBL-VDL) et ultrasoniques (USIT, URS, CAST, IBC...) utilisées pour le contrôle des cimentations de tubages.

Ces critères sont basés sur l'analyse du temps de transit du log CBL qui détermine la qualité de la diagraphie, l'analyse de la qualité de l'adhérence du ciment, à partir du log CBL, en utilisant la méthode dite du « Bond Index » (BI) proposée par Schlumberger, la qualité de la mise en place du ciment dans l'annulaire à partir des valeurs des impédances lorsque les diagraphies ultrasoniques correspondantes (USIT, URS, CAST, ...) sont disponibles. L'étanchéité verticale de l'annulaire va dépendre du degré de remplissage⁷ et du taux de chenalisation⁸.

La fiche propose une notation (indices CBL et USIT) afin d'obtenir des interprétations quantifiées, moins suggestives et plus homogènes de la qualité des cimentations, et de rendre possible des analyses comparatives entre puits.

1.9 Domaine : Déviations (cf. annexe 5)

1.1.12. Fiche n°51 - Paramètres des déviations et descriptions des moyens mis en œuvre pour les réaliser

La fiche récapitule les informations qui doivent apparaître dans les programmes de déviation ainsi que les différents formats possibles de cette mise à disposition (coordonnées géographiques, définition des cibles, paramètre de calcul de la déviation, moyens mis en œuvre, mesures d'inclinaison dans le réservoir).

1.1.13. Fiche n°52 - Qualité des déviations

La fiche fait un rappel des éléments présidant à la qualité des opérations de déviation et aux méthodes de contrôle qui peuvent être utilisées pour en faire l'évaluation.

Des critères d'analyse qualitative de la déviation sont proposés (valeur du Dog-Leg Severity⁹ ou DLS et Tortuosity Index¹⁰ ou TI). Des indicateurs quantitatifs sont proposés, ainsi que des

⁷ Le degré de remplissage définit le pourcentage de hauteur de colonne cimentée

⁸ La chenalisation définit un remplacement hétérogène de la boue par du laitier (présence de deux matériaux différents dans l'espace annulaire)

⁹ La valeur du Dog-Leg (DL), exprimé en radians ou en degrés, est utilisée dans une déviation pour décrire les variations d'inclinaison et d'azimut marquant la trajectoire d'un puits. Le DLS est la valeur unitaire du DL et s'exprime en °/10 m

¹⁰ Cet indice est utilisé pour décrire la « rugosité » de la trajectoire, il correspond à la différence, pour une section donnée du forage, du DL entre la trajectoire réalisée et la trajectoire théorique prévisionnelle

recommandations pour définir la géométrie des cibles dans les conditions spécifiques de la géothermie profonde.

Deux feuilles de calcul Excel sont associées à cette fiche. Elles servent de référence pour l'évaluation des indicateurs :

- TI.xls : calcule l'indice de rugosité (Tortuosity Index) d'une trajectoire ;
- ModJ.xls : permet de modéliser le gradient de build-up¹¹ équivalent (GBUe) dans le cas d'une déviation en J simple.

1.10 Domaine : Complétion (cf. annexe 6)

1.1.14. Fiche n°61 - Complétion des aquifères sableux

Les aquifères sablo-gréseux (Cénomanien, Albien, Néocomien, Trias) nécessitent des complétions de captage. Le matériel utilisé doit être adapté aux conditions d'exploitation du réservoir afin de permettre d'atteindre le débit de pompage requis tout en conservant une filtration efficace et un niveau de pertes de charge minimal. Outre le bon suivi des procédures, un choix qualitatif et adapté du matériel de complétion, du slot des crépines et de la granulométrie du massif filtrant est fondamental. La fiche rappelle les principes de bases à appliquer en la matière (structure de la complétion, positionnement de l'ancrage, raccord diélectrique, matériel de centrage, caractéristiques de la filtration, vitesse d'entrée dans les crépines).

1.11 Domaine : Diagraphies (cf. annexe 7)

1.1.15. Fiche n°72 - Contrôles de cimentation soniques et ultrasoniques

Les mesures soniques permettent d'évaluer la qualité de l'adhérence du ciment (bonding) aux parois du tubage et du forage. Le CBL-VDL (Cement Bond Log - Variable Density Log) est un outil rustique et efficace dont il convient toutefois de connaître les limites d'utilisation. Il peut se montrer défaillant ou inadapté lorsqu'il est réalisé dans des puits fortement déviés, sur des tubages en gros diamètre ou avec des ciments de faible densité.

Les mesures ultrasoniques ont été développées et mises au point pour tenter de compenser les limites inhérentes aux mesures soniques dont elles viennent renforcer, compléter et faciliter l'interprétation. Les données recueillies avec les outils ultrasoniques permettent en effet de mieux discriminer et interpréter les discontinuités qui peuvent apparaître dans un annulaire cimenté, avec une résolution très largement supérieure à la seule mesure axiale fournie par un CBL. Dans certains cas, dont l'analyse des laitiers allégés fait partie, elles sont même l'unique moyen disponible pour tenter d'identifier et d'appréhender la qualité des cimentations.

Cette note a pour objectif de rappeler le mode de fonctionnement de ces outils, leurs limites et les conditions permettant une interprétation correcte de la qualité des cimentations.

¹¹ Gradient de prise d'angle du forage après une première phase verticale (°/10m)

1.1.16. Fiche n°73 - Contrôle des tubages par diagraphies (diamètres)

L'objectif de cette note technique est de décrire les différents outils de diagraphie disponibles en géothermie pour contrôler l'état des tubages des forages de production et d'injection, et ainsi, permettre le suivi de leur évolution en cours d'exploitation (outils mécaniques, outils ultrasoniques, outils électro-magnétiques).

La très grande majorité des forages géothermiques profonds étant constituée par des tubages en acier, les outils développés pour les besoins de l'industrie pétrolière sont adaptés au domaine de la géothermie. Des développements récents permettent de diagnostiquer également des ouvrages particuliers, constitués notamment de tubages en matériaux composites (cf. outils ultrasoniques).

Il est, d'autre part, proposé une méthode d'analyse permettant de quantifier l'endommagement d'un tubage en acier, à partir des données issues des diagraphies de contrôle.

1.1.17. Fiche n°74 - Diagraphies applicables à la caractérisation des réservoirs géothermiques profonds

L'objectif de cette note technique est de décrire les différentes mesures applicables à la caractérisation des réservoirs géothermiques profonds. Cette phase de diagnostic du réservoir, réalisée à l'issue des travaux de forage, est cruciale pour l'exploration, la connaissance et l'exploitation optimale du réservoir.

La note aborde, dans un premier temps, les diagraphies utilisées pour la caractérisation géologique des réservoirs puis, dans un second temps, les diagraphies utilisées pour la caractérisation hydrogéologique. Un tableau de synthèse des différentes diagraphies disponibles est proposé à la fin de la fiche, avec le principe de la mesure, le type d'information obtenues, les inconvénients et avantages de la méthode.

1.12 Domaine : Développements et essais (cf. annexe 8)

1.1.18. Fiche n°81 - Détermination de la qualité des opérations de développement en fin de forage

La bonne conduite des opérations de développement est l'un des éléments fondamentaux qui détermine la qualité et la réussite de la mise en exploitation des ouvrages. C'est particulièrement vrai dans le cas des aquifères clastiques (sableux) où la qualité de la filtration influe directement sur les capacités et les coûts de production.

Cette fiche présente les procédures de développement et les moyens que l'on peut mettre en œuvre pour évaluer les résultats et la qualité des opérations de développement. Le terme de « développement » recouvre dans cette fiche les opérations allant de la mise en eau du puits à la mise en production en passant par les stimulations hydrauliques ou chimiques.

1.1.19. Fiche n°82 - Essais de formation en géothermie basse énergie

Les essais de formation, ou « essais de longue durée », sont mis en œuvre après les opérations de développement caractérisées par les « essais par paliers »

Ils constituent l'opération finale des travaux de forage qui vise à déterminer les caractéristiques locales du réservoir géothermal. Les conditions de réalisation de ces essais, l'acquisition des données et l'interprétation finale des essais sont des éléments d'appréciation essentiels, dont il convient de conserver la mémoire pour comprendre le fonctionnement du réservoir et son évolution.

Cette fiche a pour objectif de déterminer un cadre commun de réalisation des essais visant à harmoniser les pratiques dans le domaine de la géothermie basse énergie et à enrichir de manière pertinente les bases de données partagées par la filière.

1.13 Domaine : Exploitation (cf. annexe 9)

1.1.20. Fiche n°90 - Conditions d'exploitation des installations géothermiques au Dogger

Outre les normes et la réglementation en vigueur dans les permis d'exploitation, le respect des conditions d'exploitation des puits et des caractéristiques nominales des équipements associés doit permettre d'assurer la longévité des installations géothermales. Les contraintes physiques et chimiques liées à l'exploitation du fluide géothermal s'appliquent principalement sur les puits, les équipements de pompage, les conduites et robinetterie et les échangeurs de chaleur. Cette fiche aborde uniquement les conditions d'exploitation des puits producteur et injecteur et se base principalement sur le retour d'expérience des opérations au Dogger.

Cette fiche apporte un éclairage et des recommandations sur les contraintes d'exploitation liées au débit d'exploitation, à la température du fluide réinjecté, à la pression de point bulle¹², aux risques de corrosion-dépôts et aux groupes de pompage. Elle donne aussi des recommandations pour les opérations fonctionnant en triplet¹³.

1.1.21. Fiche n°91 - Traitements inhibiteurs de corrosion-dépôts des aciers

Les phénomènes de corrosion-dépôt représentent un risque majeur (technique, environnemental et financier) pour les exploitations géothermiques vis-à-vis duquel il est indispensable de se prémunir. Les matériaux utilisés pour la conception des puits et des installations de surface sont en grande majorité des aciers (acier au carbone non allié API K55 pour les tubages des puits, acier inoxydable 316 L ou acier duplex pour les équipements). L'utilisation de métaux nobles (titane, alliages à base nickel) est réservée aux équipements sensibles (échangeurs, pompes, instrumentation, tube de traitement, etc.)

La corrosion peut générer des percements des tubages des puits pouvant conduire à des communications entre aquifères, notamment entre les aquifères à forte salinité comme le Dogger et des aquifères moins profonds utilisés pour l'eau potable (ex. Albien). La réparation des percements entraîne des opérations coûteuses de réhabilitation des puits (rechemisage des cuvelages) et une augmentation des coûts électriques de pompage due aux pertes de charge provoquées par la réduction du diamètre des tubages neufs.

¹² La pression de point de bulle est la pression en-dessous de laquelle il y a séparation de phase entre le liquide et les gaz dissous

¹³ Un triplet est une opération géothermique fonctionnant avec un puits de production et deux puits de réinjection

Par ailleurs, les dépôts, en s'accumulant sur les parois des tubages, rétrécissent le passage du fluide et augmentent les pertes de charges dans les tubages, ce qui peut se traduire par une baisse de débit, une augmentation de l'énergie de pompage et/ou injection, ou une augmentation du rabattement et/ou pression d'injection. Les particules issues des processus de corrosion-dépôt peuvent colmater les filtres et/ou les échangeurs thermiques présents en surface nécessitant des démontages et des opérations de nettoyage coûteuses. Ces dépôts peuvent également s'accumuler dans le découvert du puits de réinjection, mais aussi entraîner le colmatage du proche puits injecteur. Les opérations de nettoyage des puits et/ou du découvert, avec un appareil de forage, ont un impact financier lourd sur l'exploitation et sont toujours associées à des risques techniques, comme toute intervention dans un puits.

Ainsi, cette fiche aborde la nature des phénomènes de corrosion et les principaux paramètres influents, les différents types de dépôts, le dispositif de traitement, nature et types de produits utilisés en géothermie au Dogger, le retour d'expérience des nouvelles opérations réalisées depuis 2007 et les recommandations qui en découlent.

1.1.22. Fiche n°92 - Filtration des eaux géothermales en surface

Le choix d'une solution de filtration optimale contribue de manière déterminante à limiter les désordres et à améliorer la disponibilité des installations géothermiques de surface et ainsi, à augmenter la productivité de façon notable. Dans certains contextes hydrogéologiques (cas des aquifères sableux et/ou non consolidés Albien, Néocomien, Trias), la filtration de l'eau géothermale est requise pour réduire le risque de colmatage physique du forage de réinjection et de l'aquifère au voisinage de l'ouvrage d'injection. Le choix de la technologie du filtre aura un impact sur la fréquence et la durée des nettoyages par les exploitants et sur les consommations électriques de pompage engendrées par les pertes de charges hydrauliques.

Les dysfonctionnements apparaissent en règle générale lorsque les particules et les débris sont aussi gros que les jeux de fonctionnement des pièces en mouvement (cas des pompes d'exhaure, des pompes de réinjection et de la robinetterie) ou bien lorsque leur taille provoque un colmatage (cas des échangeurs à plaques et des piquages de petit diamètre des conduites de surface).

Cette fiche rappelle les critères de choix de la filtration et de définition d'indicateurs de performance, la nature et origines des particules solides et des débris présents dans le fluide géothermal, les différents dispositifs de filtration existants et les développements de nouvelles générations de filtres. Elle présente également les avantages et inconvénients des différents dispositifs.

3 Conclusions

Ce guide réalisé avec différentes phases successives, depuis 2015, a permis de faire un retour d'expérience exhaustif des pratiques en géothermie basse énergie sur les forages géothermiques principalement du Bassin parisien. Il est actuellement constitué de 22 fiches techniques couvrant 9 domaines : le forage, les tubages, les cimentations, les déviations, les complétions, les diagraphies, le développement et les essais, et l'exploitation des puits. Chaque domaine est constitué d'une ou plusieurs fiches abordant des points spécifiques et rappelant les règles et procédures à respecter pour éviter tout écueil, ainsi que, lorsque cela est possible, proposant des recommandations et indicateurs plus quantitatifs. Il ne s'agit pas de rendre obligatoire ou normatif les principes de réalisation des puits géothermiques profonds, mais de rappeler les principales règles de l'art à respecter. Il s'agit enfin de proposer, lorsque cela paraît possible, des indicateurs permettant d'apprécier ou d'évaluer la qualité des travaux réalisés.

Il est à noter que les règles, procédures et recommandations mentionnées dans ces fiches et présentées aux organismes ou entreprises des divers secteurs de la profession, sont prises en considération dans l'analyse des dossiers de demande d'aides de l'ADEME, dans le cadre du Fonds Chaleur et des demandes de garanties présentées à la SAF Environnement, ainsi que lors de l'instruction des demandes d'autorisation de travaux ou d'exploitation par la DRIEAT ou DREAL.

Ce guide reste évolutif selon les retours d'expérience des nouvelles opérations et nouvelles techniques ou technologies mises en œuvre et pourra donner lieu, soit à de nouvelles fiches, soit à des compléments ou des améliorations de fiches existantes.

Annexe 1

Rappel des règles de l'Art et Surface



Version validée le 24 novembre 2015

FICHE TECHNIQUE 010

RAPPEL DES PRINCIPALES PROCEDURES ET REGLES DE L'ART

Cette note rappelle les principales procédures et règles de l'art applicables aux ouvrages géothermiques profonds réalisés dans le Bassin parisien. Elle est complétée par des notes techniques détaillées lorsque les thématiques spécifiques le nécessitent (structure, déviation, cimentation, etc..) et auxquelles on se référera autant que nécessaire.

1. Contraintes de surface

- **superficie des plateformes** : pour réaliser un doublet au Dogger dans le Bassin parisien, une plateforme de 5 000 m² est généralement considérée comme une surface optimum. Une surface plus restreinte (pouvant descendre jusqu'à 3 500 m²) reste possible mais peut entraîner des difficultés dans l'organisation et la conduite du chantier, engendrer des risques, augmenter la durée des travaux et induire des coûts supplémentaires. Dans le cas d'une surface inférieure à la surface optimum, il est souhaitable de faire clairement apparaître les moyens qui seront pris pour limiter au mieux les contraintes liées à la réduction de l'espace disponible ;
- **accès en exploitation** : l'accès aux puits doit pouvoir être maintenu tout au long de la durée de l'exploitation et permettre des interventions de sécurité, de contrôle (camion de logging, grue), de maintenance et d'abandon (machine de servicing). Une surface minimale de 1500 m² et un environnement adapté doivent être conservés autour des têtes de puits pour permettre l'amenée du matériel, sa mise en place sur le site et la réalisation des opérations de servicing.

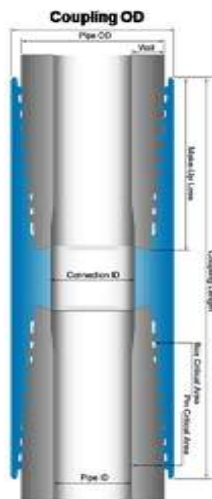
2. Outils de forage

Les outils de forage sont définis par leur diamètre, leur type, leur code IADC et leur état (neuf / usagé). Dans chacun des diamètres, la liste fournie mentionnera le nombre des outils prévus ou utilisés par type. Lorsque l'outil est usagé, son usure doit être répertoriée selon le codage "dull grade" de l'IADC.

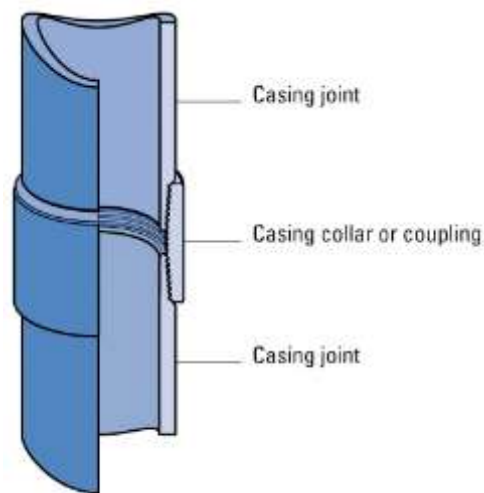
3. Tubages

- **caractéristiques** : les caractéristiques des casings utilisés doivent être fournies dans la forme normalisée de l'API (diamètre extérieur en inch, poids nominal en lbs/ft, grade de l'acier) ou dans un format permettant de s'y référer. Sauf cas particulier à justifier, l'acier utilisé pour les forages géothermiques dans le Bassin parisien est de grade K55 ;
- **filetages** : le type des filetages prévus pour les différents tubages doit être explicitement mentionné dans les programmes.

Pour les tubages de production en contact direct avec l'eau géothermale, il est proposé d'utiliser de préférence (**mais sans obligation**) des filetages de type VAM, NewVAM ou similaire dont le vissage sur butées permet d'éviter tout espacement dans le raccordement interne des tubes. Ce type de filetage est particulièrement étanche et permet de conserver une continuité hydraulique tout au long de la colonne. Il diminue significativement les turbulences d'écoulement et donc les pertes de charges lorsque les débits sont importants. D'autre part, les espaces creux inter-tubes sont de potentiels « nids » à bactéries sulfato-réductrices qu'il est préférable de ne pas favoriser ;



Filetage type VAM
Le raccordement interne sur butées est lisse



Filetage standard (API 8rd, Buttress)
Le raccordement laisse un creux entre les tubes

- **fourniture** : les tubages doivent être neufs et certifiés conformes aux normes API Spéc. 5B et API 5CT (ISO 11960/API 5CT – API 5B dernières éditions). Les tubes et les manchons doivent être marqués par le fabricant conformément aux spécifications de l'API. Le fournisseur devra être en mesure de fournir les certificats attestant de la composition chimique des aciers ainsi qu'un rapport d'inspection réalisé en usine par un organisme indépendant. L'inspection devra inclure à minima sur une sélection aléatoire de tubes :
 - l'examen visuel des surfaces internes aux extrémités (rugosité) ;
 - l'examen visuel et la mesure des tubes (longueur, rectitude, diamètre extérieur) ;
 - l'examen et le contrôle de conformité des filetages ;
 - le contrôle du drift (calibrage du diamètre intérieur) ;
 - le contrôle des protections (graissage, protecteurs de filetage) ;
 - le marquage des tubes ;
 - la vérification des habilitations des usines.

Pour assurer une protection satisfaisante pendant leur stockage, les tubes livrés auront leurs filetages graissés (graisse de stockage) et des protecteurs mis en place sur les filetages mâles et femelles.

Chaque tube portera un manchon à une extrémité. Ce manchon sera vissé à la marque (triangle) ;

- **transport, stockage** : les précautions et les procédures qui seront respectées pour l'approvisionnement, le transport, la réception et le stockage des tubages devront être mentionnées ;
- **contrôle de drift** : La conformité des diamètres intérieurs au mandrin (drift diameter) est impérative sur la totalité des tubes.

Outre le contrôle déjà effectué en usine (cf. fourniture ci-dessus), un nouveau contrôle sera réalisé immédiatement avant la descente des tubes (c'est à dire après leur installation sur les racks de la machine de forage) au moyen d'un mandrin répondant aux normes de l'API. Les documents techniques doivent faire mention de ces précautions ou au minimum de l'application des règles de l'art habituelles en la matière ;

- **vissage** : le vissage des éléments de tubage doit être effectué au couple optimal préconisé par le fabricant. Cette opération est généralement réalisée par une société de services spécialisée.

La prestation concerne la mise à disposition des opérateurs nécessaires à la manutention et au vissage des tubages concernés, ainsi que la location des équipements de vissage adaptés à chacun des diamètres : table de tubage, spider élévateur, clé hydraulique (vissage et dévissage), élévateurs à porte, jeu de 3 protecteurs en caoutchouc.

4. Fluides de forage

- **mise en œuvre** : le type de boue utilisée et les principaux produits qui la composent (noms et concentrations prévues) devront être mentionnés dans les programmes de forage. Il est très largement recommandé que la mise en œuvre des produits utilisés pour fabriquer la boue de forage, le suivi des paramètres au cours des travaux et le contrôle de la qualité des fluides soient réalisés par une société de services spécialisée. Dans l'hypothèse où cette activité est directement prise en charge par l'entreprise de forage, celle-ci devra motiver sa décision et décrire les moyens qu'elle mettra en place pour garantir la fabrication, la qualité et le suivi des fluides utilisés au cours des travaux ;

suivi des paramètres : les caractéristiques de la boue devront être contrôlées **à minima** une fois par poste et enregistrées dans les rapports IADC (rapport journalier ou rapport par poste). Les paramètres mesurés comprendront au minimum :

- densité ;
- viscosité Marsh (seconde) ;
- filtrat (cc/30 mn) ;
- cake (mm) ;
- gels (0/10) ;
- pH ;
- solides (%) ;
- températures d'entrée et de sortie (°C) ;
- Evolution des volumes (gains et pertes) ;

- **traitement des fluides** : la gestion des résidus et effluents de chantier, qu'ils soient liquides (boues, production d'eau géothermale), solides (fragments de formations, cuttings) ou gazeux (H_2S) constitue un élément important du chantier, tant du point de vue environnemental que réglementaire et sanitaire.

Les effluents solides et liquides issus des travaux de foration seront recueillis dans des bassins spécifiques (corrals ou bourniers), traités (séparation mécanique des phases liquides-solides et traitements de solidification). Les solides sont ensuite transportés vers une décharge agréée. Les liquides sont rejetés dans le réseau d'eaux usées en respectant les normes imposées par le gestionnaire du réseau concerné.

Les eaux d'essais peuvent être réinjectées dans la même nappe lorsqu'un puits est disponible.

Comme pour la mise en œuvre des boues de forage, le traitement des fluides devra de préférence être confié à une société de services spécialisée. Les conditions de stockage, de rejets et d'élimination des produits résiduels doivent être mentionnées.

5. Diagraphies de forage

Les diagraphies et le suivi des forages concernent quatre grands domaines :

- les diagraphies différées : enregistrements à objectifs géologiques et techniques généralement réalisés par phases ;
 - les diagraphies instantanées : données recueillies en continu sur la machine (paramètres de forages) ;
 - les paramètres de la boue et le suivi géologique (ou mud logging) ;
 - les diagraphies et les mesures à objectifs hydrogéologiques (mise en production du réservoir).
-
- **diagraphies différées** : le programme de diagraphies réalisées à la fin de chacune des phases de forage devra être décrit. Ces diagraphies concernent des objectifs géologiques (généralement porosité et radioactivité naturelle) et des objectifs purement techniques (diamètreur, contrôle des tubages, contrôle des cimentations) ;
 - **diagraphies instantanées** : l'enregistrement continu des principaux paramètres de forage est recommandé mais n'est pas obligatoire. Ces enregistrements sont principalement (mais pas exclusivement) utilisés pour réaliser une analyse technique détaillée des travaux et en faciliter le suivi. Ces diagraphies peuvent également être requises pour des contrôles, en cas de difficultés de foration ou lors des instrumentations. Leur disponibilité est particulièrement importante, voire même indispensable, lorsque l'on souhaite analyser les causes d'un sinistre ;

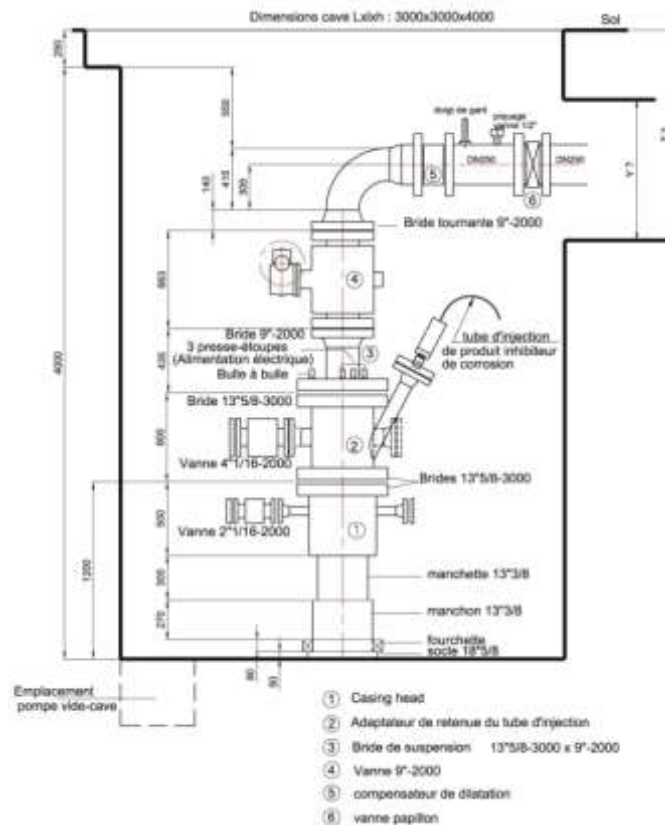


Exemple de diagraphies instantanées (forage GRT-2)

- **mud logging** : le mud logging correspond au levé continu de la coupe géologique et au contrôle des paramètres de la boue de forage (voir §4). Il récapitule sur un log spécifique l'ensemble des données géologiques indispensables à la réalisation de l'ouvrage ;
- **diagraphies du réservoir** : outre les mesures ponctuelles enregistrées au cours des essais (pression, débit, température) les diagraphies de réservoir incluent des logs de flowmétrie et de température. Dans le cas d'une complétion crépinée, le log de flow-métrie est strictement obligatoire : il permet d'évaluer la vitesse d'entrée dans les crépines, et donc le débit maximum admissible en production.

6. Tête de puits

Le détail de l'empilage des différents éléments des têtes de puits définitives des puits de production et de réinjection doit être décrit : diamètre nominal, normes, type d'acier, joints, boulonnerie, revêtements éventuels. Un schéma descriptif sera fourni pour chacune des têtes.



Exemple de tête de puits de production

En ce qui concerne les puits au Dogger, le matériau utilisé pour la fabrication des éléments des têtes de puits doit être conforme aux normes API 6A et NACE MR-01-75, classe de matériel DD, classe de température PU.

7. Planning de réalisation

Le planning de réalisation doit être évalué par phase en séparant les opérations en 3 activités distinctes dans chacune des phases :

- travaux de forage ou de reforage.
- opérations techniques statiques : diagaphies, pose de tubage, cimentation, essais.
- attente de séchage du ciment et autres attentes imposées.

En ce qui concerne les essais, il est préférable de faire apparaître séparément la durée prévue pour les opérations de développement (incluant les éventuelles stimulations) et celle des essais proprement dits.

8. Contrôle des travaux

- **mode de réalisation** : plusieurs modes de réalisation des ouvrages sont envisageables par les Maîtres d'Ouvrage.

Travaux de forage dits « **en régie** » : l'entreprise de forage met à disposition son personnel et son matériel. Elle est rémunérée au temps passé. La conduite des travaux est effectuée par le Maître d'Œuvre Sous-Sol qui doit en avoir les compétences (ingénieur de forage,

ingénieur d'essais, intendant de forage). Le contrat « en régie » est le mode de réalisation le plus couramment pratiqué pour la construction des forages géothermiques profonds en Bassin parisien. Le plus souvent, ce mode de réalisation tend à privilégier la qualité des ouvrages (à court et long terme) et à protéger les intérêts du Maître d'Ouvrage au cours de l'exploitation. Par contre ce dernier doit prendre en charge les éventuels surcoûts et imprévus de travaux.

Travaux de forage dits « **au forfait** » ou « **au mètre** » : l'entreprise de forage prend en charge la réalisation de l'ouvrage en se basant sur le CCTP produit par le Maître d'Œuvre. Ce dernier ne contrôle alors que la bonne application du cahier des charges, imposé à l'entreprise. Les travaux de forages comportant par nature de nombreux éléments difficilement prévisibles et quantifiables, une grande latitude est de ce fait laissée à l'entreprise pour atteindre les objectifs fixés. Le mode contractuel "au forfait" implique également que l'entreprise doit posséder des compétences suffisantes et un encadrement lui permettant de se substituer pour partie au Maître d'Œuvre. Ce mode peut parfois pousser l'entreprise à privilégier ses intérêts immédiats au détriment de la qualité des travaux et du futur exploitant. C'est particulièrement le cas lorsque des difficultés sont rencontrées en foration. L'avantage principal pour le Maître d'Ouvrage est d'avoir un coût de réalisation des ouvrages peu sujet à variation puisque fixé à la signature du contrat.

Il existe des modes de réalisation intermédiaires entre "régie" et "forfait" mixant les deux méthodes. Par exemple, certaines phases ou certaines opérations spécifiques peuvent être réalisées au forfait, d'autres en régie. Ces modes alternatifs sont peu pratiqués parce qu'ils ont tendance à cumuler les inconvénients des deux méthodes plus que les avantages ;

- **contrôle technique des travaux** : le contrôle des travaux est à la charge du Maître d'Œuvre qui devra avoir les compétences nécessaires :
 - en régie : pour lui permettre d'assurer entièrement la conduite des travaux.
 - au forfait : pour lui permettre de vérifier la conformité des éléments techniques transmis par l'entreprise de forage.

Dans les deux cas, il sera de la responsabilité du Maître d'Œuvre - et de lui seul - d'analyser les données techniques (matériaux utilisés, qualité des déviations, qualité des cimentations), géologiques (analyse des diagraphies, détermination des côtes d'arrêt par phase) et hydrogéologiques (plan de captage, qualité des opérations de développement, durée des tests, interprétation des pompages d'essais). Il lui appartiendra de prendre les décisions correspondantes.

Il est notamment recommandé de préciser les temps de séchage des ciments dans les Dossiers de Consultation des Entreprises (DCE) ;

- **rapports journaliers** : quel que soit le mode de fonctionnement, l'entreprise de forage doit émettre un rapport journalier récapitulant le déroulement des opérations réalisées et les données et paramètres recueillis au cours des travaux. Ces rapports journaliers (qu'ils soient par poste ou récapitulés par jour) doivent être conformes aux recommandations de l'IADC (International Association of Drilling Contractor). Il est recommandé d'intégrer ces rapports ainsi que les logs des diagraphies techniques et géologiques en annexe des documents remis en fin de travaux (DOE). A défaut, ces rapports et ces diagraphies devront être disponibles à la demande des autorités (DRIEAT) ou de la SAF-Environnement. Ils seront en effet requis pour analyser les demandes de Garantie Long Terme (SAF) et pour toute demande d'indemnisation d'un sinistre.

Les rapports journaliers et les diagraphies éventuellement transmis en cours de travaux ne pourront en aucun cas être diffusés sans une autorisation préalable formelle du Maître d'Ouvrage.

Annexe 2

Forage



Version validée le 24 novembre 2015
Modifiée le 27 septembre 2021

FICHE TECHNIQUE 021

ARCHITECTURE DES PUIITS

La géométrie et la structure des forages géothermiques diffèrent sensiblement de celles que l'on observe le plus souvent dans l'industrie pétrolière. Cette note a pour objectif de définir les principales contraintes déterminant la structure des forages géothermiques et de proposer des recommandations ayant pour but d'améliorer la qualité finale de ces ouvrages.

1. Eléments structurants spécifiques

On peut considérer qu'il y a cinq éléments majeurs qui déterminent de façon spécifique la structure des puits en géothermie :

- Un mode de **construction mixte** : dans un forage géothermique la majeure partie de la structure technique de soutènement sert également de colonne de production du fluide géothermal. Contrairement à ce qui se pratique le plus souvent dans l'industrie pétrolière, il n'y a pas (ou rarement) de colonne spécialisée pour la seule production, et encore plus rarement de colonne amovible. Les tubages qui servent à la production géothermique sont donc soumis à la fois aux contraintes externes de soutènement du puits (mécanique, thermique, corrosion) et à l'agression interne des fluides exploités. En conséquence, la durée de vie des ouvrages géothermiques est directement liée à la résistance des tubages installés au moment de leur construction. Ces tubages ne pourront pas être remplacés mais, au mieux, rechemisés en plus petit diamètre.
- Des **débits de production** très élevés : en géothermie basse-énergie, les débits d'exploitation sont le plus souvent compris entre 200 m³/h et 350 m³/h. Afin de limiter les pertes de charge consommatrices en énergie, les colonnes installées au toit des réservoirs doivent être en gros diamètre. Cette contrainte de diamètre va se répercuter de bas en haut sur l'ensemble de la structure du puits. Elle se répercute également sur les moyens qui doivent être mis en œuvre pour le réaliser : puissance de la machine de forage, diamètres de foration, matériel de déviation, centrage des tubages, cimentations, volumes des fluides de forage, traitement des effluents, etc ...

- Un **mode d'exploitation** imposant la réinjection des fluides pompés : le fonctionnement en doublet (ou triplet) impose un écartement à respecter au toit du réservoir entre puits producteur et puits injecteur forés à partir d'une même plateforme. Les trajectoires des puits sont calculées pour assurer cet écartement tout en conservant pour le puits de production une chambre de pompage verticale d'une hauteur adéquate (250 m à 350 m). Il en découle des programmes de déviations comportant des inclinaisons relativement importantes, généralement supérieures à 30°. On constate que les inclinaisons sont en effet le plus souvent comprises entre 35° et 45° et peuvent parfois atteindre des angles de plus de 50° (avec par exemple une inclinaison de 60° sur le forage GLCS-2 de La Courneuve-Sud).
- Une **réglementation** qui impose la protection des aquifères superficiels. Outre le tube guide mis préalablement en place pour couvrir les terrains de surface (30 - 50m), un tubage technique de protection est généralement installé sur les premières centaines de mètres (300 m - 400 m). D'autre part, les aquifères plus profonds de l'Albien et du Néocomien (aquifères stratégiques protégés du Bassin Parisien) doivent être sécurisés au moyen d'un double tubage, conformément aux recommandations de la DRIEAT.
- La **géologie des réservoirs** est également un élément structurant des forages géothermiques. En ce qui concerne les réservoirs calcaires (Dogger) exploités en trou ouvert (open-hole) l'impact sur la structure du forage se montre relativement négligeable. Par contre elle va s'avérer importante et parfois contraignante dans le cas des réservoirs de type clastique (sables de l'Albien et du Néocomien, grès du Trias). Pour ce type d'aquifère, le captage du réservoir impose la mise en place de matériels spécifiques (système de suspension, crépines, massif de gravier, joint diélectrique) qui se montreront déterminant dans la définition de la structure de l'ouvrage.

Cet ensemble de contraintes impose un niveau qualitatif élevé lors de la réalisation des travaux. Il apparaît donc particulièrement important d'assurer la qualité de chacune des opérations constituant le forage. Et ce d'autant plus que **chacun des éléments va successivement déterminer la qualité des autres : de la qualité de la trajectoire va dépendre la qualité géométrique du trou foré, dont dépendra la qualité du centrage des tubages, elle-même déterminant la qualité des cimentations, qui assurera la qualité générale de l'ouvrage. Ce qui, en fin de compte, garantira la pérennité de l'exploitation.**

A ces contraintes structurelles, viennent se surajouter des sujétions spécifiques :

- L'intégrité mécanique et hydraulique des tubages de production, par exemple, doit être préservée : il est difficilement envisageable de perforer les tubages comme le font fréquemment les pétroliers en cas de cimentation défectueuse. Le remède serait pire que le mal.
- L'environnement urbain des opérations impose également des précautions particulières : bruits, émission diverses, contrôle des éruptions, sécurité environnementale, sécurité du site en surface.
- Les plateformes disponibles en milieu urbain sont souvent restreintes. Elles peuvent également imposer de nombreuses contraintes : accès, bruit, approvisionnement en eau, environnement, sécurité, stockage du matériel, habitations proches, etc...

- Les essais de puits qui sont réalisés en fin de travaux produisent des volumes importants qu'il faut stocker et refroidir. Des solutions de rejets autorisées doivent être trouvées : dilution, réseau, citernage, etc...

2. Géométrie des ouvrages

La géométrie des ouvrages est principalement déterminée par l'écartement à respecter entre les impacts au réservoir des puits de production et de réinjection afin d'obtenir un temps de percée thermique acceptable (usuellement une perte de 1°C en 30 ans). Il en résulte deux contraintes structurelles :

- la cartographie générale imposée au doublet ou au triplet, déterminant l'exploitation de la ressource géothermale : coordonnées géographiques des têtes de puits et des impacts au réservoir.
- la géométrie résultante pour chacun des puits, définissant leur trajectoire et les programmes de déviation correspondants pour obtenir le déplacement horizontal dans l'azimut souhaité.

Ces deux éléments sont décrits en détail dans des fiches techniques particulières auxquelles on se référera : la première définit les paramètres géométriques concernés, la deuxième décrit les moyens d'apprécier la qualité des trajectoires réalisées.

Dans la mesure du possible, la géométrie des ouvrages sera toujours optimisée au mieux pour limiter les risques en foration, tant en ce qui concerne les conditions de la prise d'angle (choix du gradient de build-up) que la valeur de l'inclinaison finale résultante.

3. Recouvrement entre tubages

Dans une coupe technique de forage, les tubages sont télescopés phase par phase avec un diamètre décroissant. Lorsque le tubage correspondant à une phase n'est pas remonté jusqu'en surface, il faut prévoir un recouvrement entre le sommet du tubage installé et la base du tubage précédent afin d'assurer l'étanchéité de la jonction.

Trois cas très distincts peuvent être envisagés :

- La colonne (liner) est suspendue à l'intérieur du tubage précédent, le plus souvent dans la partie stabilisée de la déviation, au moyen d'un système de suspension (liner-hanger). Il n'y a généralement pas de cimentation complémentaire envisageable (sauf injection sous pression). Dans un tel cas, le recouvrement doit être au minimum de 100 m.
- La colonne remonte jusqu'en surface, puis est ultérieurement coupée et retirée afin de dégager, par exemple, la chambre de pompage. La coupe est effectuée dans la partie verticale du puits, souvent quelques mètres au-dessus d'une DV et à faible profondeur (généralement moins de 500 m). Dans un tel cas, une cimentation complémentaire est facilement envisageable depuis la surface. Le recouvrement doit alors atteindre au moins 50 m. Il peut être envisagé de l'abaisser à 30 m lorsque des contraintes architecturales le justifient.

- Le recouvrement est protégé par un autre tubage, mais ne correspond pas comme précédemment à la base d'une chambre de pompage. Dans un tel cas, la longueur du recouvrement est laissée à l'appréciation des intervenants.

Récapitulatif des longueurs de recouvrement minimales :

Type de colonne	Recouvrement minimum
Colonne suspendue par liner-hanger ou cimentation complémentaire impossible	100 m
Chambre de pompage, colonne coupée avec cimentation complémentaire envisageable	50 m / 30 m
Recouvrement protégé par un autre tubage	libre

4. Positionnement des DV

Une DV a pour rôle de contrôler une ouverture temporaire vers l'annulaire afin de réaliser des cimentations multi-étagées. Elle constitue une anomalie dans la continuité hydraulique d'une colonne de production, tant en ce qui concerne le diamètre intérieur de cette colonne (épaisseur des parois, perturbation des écoulements) qu'en ce qui concerne l'intégrité de son étanchéité à long terme. Elle est également une anomalie métallurgique (acier différent de celui de la colonne) favorisant la corrosion en ce point spécifique. Enfin sa mise en œuvre est sujette à de nombreux aléas qui ne permettent pas de garantir son bon fonctionnement. Il s'agit en conséquence d'un élément singulier et particulièrement fragile dans la structure d'un puits.

Du fait de cette fragilité, le positionnement des DV dans la construction des puits prend une importance non négligeable si l'on veut garantir l'étanchéité de la colonne correspondante. Les règles qu'il est proposé de respecter sont les suivantes :

- une DV posé en trou nu ne sera **jamais mise en place en face d'une zone aquifère, ni à moins de 50 m des épontes d'un aquifère**. Cette règle doit impérativement être respectée ;
- autant qu'il sera possible, on installera les DV derrière un tubage existant en conservant un recouvrement de 50 m au minimum avec la base de ce tubage ;
- lorsque la DV est placée en trou nu, on s'assurera que les formations encaissantes sont imperméables et qu'elles assureront l'étanchéité de la zone en cas de difficultés au cours des opérations de cimentation. Comme signalé précédemment, une distance minimale de 50 m par rapport aux épontes d'un aquifère devrait être respectée.

5. Débit maximal admissible

Il n'y a pas de règle permettant de déterminer le débit maximum admissible dans un puits. Ce débit est avant tout fonction des pertes de charge que l'on considérera économiquement acceptables pour le projet.

La vitesse ascensionnelle maximale recommandée par Johnson dans les complétions crépinées (c'est à dire à l'intérieur des colonnes captantes et des crépines) est de 1,5 m/s.

Le tableau ci-après fournit pour quelques tubages de production la valeur du débit de production en fonction des vitesses ascensionnelles.

Tubages		Débit en m ³ /h en fonction de la vitesse ascensionnelle			
OD	ID	1,5 m/s	2 m/s	2,5 m/s	3 m/s
5" 18#	108,6 mm	50	67	83	100
7" 26#	159,4 mm	108	144	180	216
9"5/8 47#	220,5 mm	206	275	344	412
10"3/4 51#	250,2 mm	265	354	442	531
13"3/8 68#	315,3 mm	422	562	703	843

On peut constater que la recommandation de Johnson est très restrictive. Si elle était appliquée, les débits d'exploitation prévus dans la plupart des projets imposeraient la mise en place de tubages de très gros diamètre incompatibles avec des coûts de réalisation acceptables et la rentabilité des exploitations. Il faut donc accepter des écoulements plus rapides, générateurs d'écoulements turbulents et de pertes de charge plus élevées.

Il est difficile de déterminer un niveau de débit qui soit directement fonction d'un diamètre de tubage. On pourrait considérer une vitesse ascensionnelle de 2,5 m/s. Elle correspond assez bien aux débits observés sur de nombreuses exploitations. Avec une telle vitesse, on obtiendrait les débits suivants :

- Tubage 5" : jusqu'à 80 m³/h
- Tubage 7" : jusqu'à 180 m³/h
- Tubage 9"5/8 : jusqu'à 340 m³/h
- Tubage 10"3/4 : jusqu'à 440 m³/h
- Tubage 13"3/8 : jusqu'à 700 m³/h

Une autre approche consisterait à se baser sur un niveau de pertes de charge unitaires (en bars pour 1000 m de tubage) à ne pas dépasser :

Tubages		Débit en m ³ /h en fonction des pertes de charge			
OD	ID	2 bars	2,5 bars	3 bars	3,5 bars
5" 18#	108,6 mm	43	48	53	57
7" 26#	159,4 mm	120	130	145	155
9"5/8 47#	220,5 mm	280	310	340	370
10"3/4 51#	250,2 mm	385	435	475	510
13"3/8 68#	315,3 mm	710	790	870	940

Les tubages en petit diamètre se montrent, bien entendu, beaucoup plus impactés par les pertes de charge que par la vitesse ascensionnelle. Si on prend comme référence le tubage 9"5/8, le débit déterminant une vitesse ascensionnelle de 2,5 m/s correspond également à une perte de charge de 3 bars par 1000 m de tubage.

Il faut également considérer que la mise en œuvre de filetages premium à raccordement en buttée (Vam, Geoconn ou similaires), ainsi que l'usage de tubes en matériaux composites, permettent des débits plus importants en limitant les pertes de charge. Avec ce matériel, une vitesse ascensionnelle maximale de 3 m/s peut être envisagée comme référence.

En retenant la valeur maximale de ces différentes approches, il est possible de proposer les débits limites suivants applicables aux colonnes en acier à filetages standards et à celles comportant des filetages premium et aux colonnes en matériau composite :

	Standard	Premium / composite
- Tubage 5" :	jusqu'à 80 m ³ /h	jusqu'à 100 m ³ /h
- Tubage 7" :	jusqu'à 180 m ³ /h	jusqu'à 220 m ³ /h
- Tubage 9"5/8 :	jusqu'à 340 m ³ /h	jusqu'à 410 m ³ /h
- Tubage 10"3/4 :	jusqu'à 475 m ³ /h	jusqu'à 530 m ³ /h
- Tubage 13"3/8 :	jusqu'à 870 m ³ /h	jusqu'à 870 m ³ /h

Il est bien évident que ces débits doivent être adaptés au débit critique du réservoir. Ils peuvent aussi être augmentés dès lors que l'on accepte des pertes de charge unitaires et des vitesses ascensionnelles plus élevées que celles retenues, ce qui sera d'ailleurs fréquemment le cas pour les tubages en petit diamètre (5" et 7").

Par ailleurs, il faut être conscient que la tendance bien naturelle à vouloir augmenter le débit unitaire des ouvrages afin de mieux les rentabiliser, entraîne des effets successifs impactant l'architecture des puits. A partir des caractéristiques hydrogéologiques disponibles sur un projet, augmenter le débit d'un doublet implique :

- de prévoir un déport entre ouvrage de production et d'injection plus important afin de conserver un temps de recyclage thermique de la bulle froide acceptable (généralement une perte de 1°C au bout de 30 ans) ;
- l'augmentation du déport modifie le positionnement des cibles et le volume d'exploitation nécessité par le projet ;
- cette modification des cibles provoque nécessairement une augmentation de l'inclinaison des puits ;

- l'inclinaison des puits augmentant, les difficultés pour obtenir un centrage efficace deviennent plus importantes ;
- parallèlement, sur le puits de production, la chambre de pompage doit être approfondie pour permettre d'atteindre le débit souhaité, ce qui entraîne :
 - un début de prise d'angle nécessairement plus tardif ;
 - pour rattraper ce retard, il faut alors appliquer un gradient de prise d'angle plus important (lorsque possible), ou accepter des valeurs d'inclinaison encore plus élevées.

Dans certains cas, le diamètre des colonnes servant à la production doit être augmenté afin d'éviter des pertes de charge trop importantes. Dans un tel cas les contraintes déjà citées vont encore s'aggraver. Le débit d'exploitation s'avère donc comme un des paramètres majeurs qui influence l'architecture des puits.

6. Choix des tubages

6.1. Diamètre

On a vu dans le paragraphe précédent que le choix des diamètres de forage et de tubage est déterminé par le niveau de pertes de charge accepté et par le débit maximum recommandé pour chacun des diamètres selon le matériel utilisé :

- Forage 8"1/2, tubage 7" : jusqu'à 180-220 m³/h ;
- Forage 12"1/4, tubage 9"5/8 : jusqu'à 340-410 m³/h ;
- Forage 14"3/4, tubage 10"3/4 : jusqu'à 475-530 m³/h ;
- Forage 17"1/2, tubage 13"3/8 : jusqu'à 870 m³/h.

Les conditions de foration se font de plus en plus contraignantes au fur et à mesure que le diamètre augmente. Les difficultés s'aggravent tout particulièrement quand il s'agit de réaliser des ouvrages fortement déviés (>40°) en très gros diamètre (tubage > à 9"5/8 au toit du réservoir). On observe enfin qu'une augmentation de diamètre concerne la quasi totalité des activités : puissance de la machine de forage, volumes de boue à fabriquer et à traiter, matériel de déviation, centrage des colonnes, cimentations ...

De ce fait, le choix du diamètre est une décision qui aura un impact majeur sur la faisabilité et le coût de l'architecture retenue. Il doit donc être particulièrement argumenté.

Le débit minimum (estival) fait également partie des contraintes à prendre en compte pour le choix des diamètres des colonnes d'exploitation. Ce sujet est abordé dans la fiche technique n°090 "Conditions d'exploitation des exploitations géothermiques au Dogger".

6.2. Métallurgie

Les colonnes en acier utilisées dans les forages géothermiques sont généralement en acier au carbone sans soudure (seamless) et répondent aux normes de l'API. Le grade d'acier le plus utilisé dans le Bassin Parisien est le K55 : il est considéré comme celui qui présente la meilleure résistance à l'agression chimique des fluides géothermiques exploités au Dogger dans la région parisienne. L'usage de grades différents doit être motivé et argumenté.

Depuis quelques années des colonnes en matériaux composites sont progressivement introduites. Elles sont beaucoup plus complexes à mettre en œuvre mais présentent le double

avantage d'offrir une quasi-insensibilité à la corrosion et une réduction significative des pertes de charge en exploitation. Pour plus d'information, on peut se référer à la fiche technique n°033 qui fait le point sur les avantages, inconvénients et contraintes que pose l'usage de ce type de matériau.

6.3. Résistance mécanique

La résistance mécanique d'un tubage dépend directement de son diamètre, du grade choisi et de son épaisseur. Dans chacun des diamètres, la norme API définit une gamme d'épaisseur repérée par la valeur du poids nominal (en lbs/ft) de la colonne.

Les tubages installés doivent être choisis pour pouvoir résister aux contraintes maximales rencontrées au cours des opérations de forage et en exploitation. A ces contraintes doivent être appliquées un coefficient de sécurité (design factor). Ces coefficients varient selon les opérateurs :

- Tension : de 1,3 à 1,6.
- Eclatement (burst) : de 1,1 à 1,25.
- Ecrasement (collapse) : de 1 à 1,125.

En géothermie, afin de compenser les pertes de matière par corrosion, il est recommandé d'appliquer - sauf cas particuliers à justifier - le facteur le plus élevé.

L'écrasement est souvent le critère décisif dans le choix d'un tubage. Les pétroliers l'évaluent généralement en prenant la condition la plus extrême pouvant survenir au cours d'une éruption (intérieur du tubage vide). Pour la géothermie de basse énergie, de telles conditions sont trop contraignantes. Il est proposé que cette valeur soit calculée en se limitant à la condition la plus importante attendue pendant les opérations de cimentation (laitier demeurant liquide, pression différentielle, pertes totales, fracturation), de développement (bulles de gaz lors des acidifications) et/ou pendant l'exploitation (rabattement maximum dans le puits).

Un sur-épaississement volontaire des colonnes d'exploitation est parfois observé, en particulier au niveau des chambres de pompage. L'objectif recherché dans un tel cas est de compenser les pertes de matière subies du fait de la corrosion dans les zones les plus sensibles et donc d'augmenter la durée de vie du tubage.

6.4. Raccordement

Les différents éléments formant la colonne - leur longueur moyenne est de 40 ft, soit 12,19 m - sont raccordés au moyen de manchons filetés : les filetages mâles sont usinés sur les tubes et les filetages femelles sur les manchons. Les filetages les plus courant en géothermie sont :

- Le filetage API 8rd STC ou LTC : le moins fréquemment utilisé. Il s'agit d'un filetage arrondi de 8 filets par pouce qui est généralement réservé aux colonnes techniques de petit diamètre (< 9"5/8) ne nécessitant pas des raccords très performants.
- Le filetage Buttress (BTC) : il s'agit d'un filetage carré d'une grande robustesse et particulièrement bien adapté aux très gros diamètres. C'est le plus fréquemment utilisé. Son inconvénient principal provient du fait qu'il ne se visse pas en butée, mais laisse un espace intermédiaire entre chaque raccordement. Il en résulte des pertes de charge supplémentaires et la présence à cet endroit d'un creux favorable à la prolifération des bactéries sulfato-réductrices.

- Le filetage VAM (ou NewVAM) : ce filetage spécial de haute qualité se visse en butée (flush) et ne présente donc pas les inconvénients des filetages Buttress. Il est étanche aux gaz. Son coût élevé et ses délais de mise à disposition freinent le plus souvent son utilisation.
- Le filetage Geoconn : il s'agit d'un filetage premium totalement compatible Buttress mais disposant également des avantages du filetage Vam (flush). Il est actuellement de plus en plus utilisé pour raccorder les colonnes de production.

Il est recommandé :

- pour les colonnes techniques : de donner la préférence aux filetages Buttress.
- pour les colonnes servant à la production : d'utiliser de préférence des filetages premium se vissant en butée (VAM, Geoconn ou similaire).

7. Récapitulatif

Les conditions d'exploitations des ouvrages et la réglementation imposée forment un ensemble des contraintes qui déterminent de façon spécifique la structure des forages géothermiques. Le choix du débit d'exploitation, des diamètres, le positionnement des tubages, le recouvrement entre colonnes et le positionnement des DV doivent être effectués de manière à respecter ces contraintes du mieux que le permettront les objectifs du projet.

On a vu également que **chaque élément de la construction des puits conditionne le suivant et, in fine, détermine la qualité finale des ouvrages** : de la qualité de la trajectoire dépend la qualité géométrique du trou foré, dont dépend la qualité du centrage des tubages, elle-même déterminant la qualité des cimentations. Cette interdépendance débute dès le choix du débit d'exploitation, détermine l'architecture des puits et conditionne le niveau de risque au cours de travaux.

Programmer un forage avec une structure adaptée et optimisée apparaît donc comme un préalable nécessaire si l'on souhaite assurer la qualité des ouvrages. Il est bien entendu que ce préalable est insuffisant en lui-même et que réaliser par la suite des travaux de qualité est encore plus nécessaire. Mais cette qualité sera d'autant plus facile à obtenir que la structure des puits répondra correctement aux différentes contraintes imposées par l'exploitation de la ressource géothermale.



Mai 2016

FICHE TECHNIQUE n°022

ANNULAIRES RESTREINTS

Cette note technique récapitule les spécificités occasionnées par les annulaires restreints dans l'architecture des forages géothermiques neufs ou réhabilités.

1. Définition des annulaires restreints

Dans un forage géothermique profond, l'étanchéité d'un annulaire doit être envisagée sous deux aspects :

- une étanchéité verticale (dite aussi globale) permettant d'éviter que les différents aquifères traversés par le forage puissent être en communication entre eux ou avec la surface par le biais de cet annulaire. Cette étanchéité verticale va principalement dépendre de la qualité et de la hauteur du remplissage du volume annulaire disponible par le laitier injecté ;
- une étanchéité horizontale (dite aussi locale), permettant d'assurer la protection de la colonne contre la corrosion externe en limitant la circulation des fluides, particulièrement au droit des niveaux aquifères. Elle est principalement déterminée par l'épaisseur de la gaine de ciment, c'est à dire par la géométrie de l'annulaire (qualité du centrage et qualité du trou foré). Elle dépend également assez fortement de la qualité de l'adhérence du ciment sur les parois de l'annulaire (bonding).

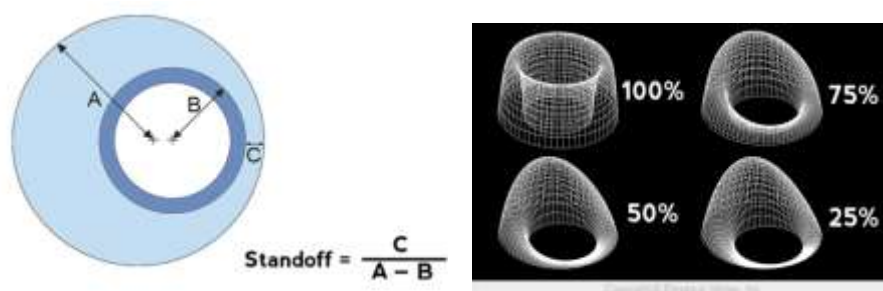
L'étanchéité verticale est souvent renforcée dans le temps par le fluage des formations les plus argileuses qui viennent se refermer sur la colonne et sa gaine de ciment. Ce phénomène n'affecte pas l'étanchéité horizontale des zones perméables.

L'épaisseur de la gaine de ciment apparaît donc comme un élément déterminant pour assurer la qualité de l'étanchéité des annulaires et la protection des tubages contre la corrosion. Cette épaisseur dépend de l'espace annulaire réellement disponible pour être rempli par le ciment et donc, pour une grande part, sera fonction de l'architecture choisie pour la construction du puits (diamètre de forage et de tubage), de la géométrie du trou foré et de l'efficacité du centrage de la

colonne. L'étanchéité sera ensuite fonction de la bonne répartition du laitier de ciment autour du tubage et de l'efficacité de son adhérence sur la colonne elle-même et sur la paroi externe (terrain ou autre tubage).

Dans le monde pétrolier, il n'y a pas de règle gérant la taille des annulaires mais seulement quelques recommandations :

- quels que soient les diamètres de forage et le mode de centrage, il est souvent indiqué de conserver un minimum de 0,35" (8,89 mm) à 0,5" (12,70 mm) entre le tubage et la paroi du trou. La valeur de cette recommandation varie selon les auteurs et les objectifs assignés aux tubages concernés. Certains opérateurs pétroliers l'assimilent à un objectif de centrage (standoff) minimal qu'il est absolument impératif d'assurer en toute occasion ;
- la recommandation proposée par les cimentiers pour assurer l'efficacité de la gaine de ciment est de disposer d'un espace annulaire minimal de 0,75" (19,05 mm) ;
- afin de permettre une bonne mise en place du laitier autour des tubages, la règle très largement admise par l'ensemble de la profession est d'assurer un plan de centrage respectant un standoff minimum de 67% (nota : à 100% le centrage est parfait). Le schéma ci-après explique le mode de calcul du standoff et ses conséquences sur les cimentations. On peut observer les modifications des vitesses d'écoulement et l'effet que le centrage peut avoir sur la répartition du laitier autour de la colonne en fonction de la valeur de standoff ;



Calcul du standoff et vitesse d'écoulement en fonction de la valeur de standoff

- enfin, certains opérateurs considèrent que pour assurer une cimentation optimale le standoff à 67% ne doit pas être inférieur à 1" (25,40 mm). Ceci dans la mesure bien sûr où les diamètres prévus dans les programmes de forage le permettent.

La géothermie a des contraintes fortes en ce qui concerne la qualité des cimentations et la protection des tubages. Dans ce contexte, il est proposé qu'un annulaire soit considéré comme restreint lorsqu'on dispose d'un espace annulaire (EA) inférieur à 1,12" (28,45 mm), ce qui correspond à la fois à un standoff minimum de 0,75" et à l'épaisseur minimale recommandée par les cimentiers.

On cherchera néanmoins autant que possible, dans les programmes de forage et dans les plans de centrage, à permettre l'obtention d'une valeur de standoff de 1".

Le tableau ci-après propose le calcul de quelques espaces annulaires observés en géothermie. Le surlignage en gris indique les espaces annulaires dont les caractéristiques correspondent à la définition retenue pour les annulaires restreints :

Tubage T	Forage F	EA (F-T)/2	EA avec standoff 67%
26"	30"	2,00"	1,34"
18"5/8	24"	2,69"	1,80"
13"3/8	17"1/2	2,06"	1,38"
16"	17"1/2	0,75"	0,50"
10"3/4	14"3/4	2,00"	1,34"
9"5/8	12"1/4	1,31"	0,88"
7"	8"1/2	0,75"	0,50"
5"	6"1/4	0,63"	0,42"

Les recouvrements de tubage ou les opérations de rechemisage peuvent également impliquer la présence d'annulaires de faible épaisseur. Dans ce type d'opération, dans la plupart des cas, un standoff proche de 100% est toutefois facile à obtenir, ce qui présente un avantage certain. Pour ces annulaires réalisés en "entrefers", un espace annulaire pourra donc être considéré comme restreint seulement lorsqu'il est inférieur à 0,75".

Tubage T	Colonne C	EA (C-T)/2
13"3/8 339,7 mm	18"5/8 87,5# 451,0 mm	2,19"
10"3/4 273,0 mm	13"3/8 54,5# 320,4 mm	0,93"
9"5/8 244,5 mm	13"3/8 54,5# 320,4 mm	1,49"
7"5/8 193,7 mm	9"5/8 43,5# 222,4 mm	0,56"
7" 177,8 mm	9"5/8 36# 226,6 mm	0,96"
Fibre 6"5/8 166,9 mm	9"5/8 36# 226,6 mm	1,18"
5" 127,0 mm	7" 26# 159,4	0,64"

Récapitulatif :

- un espace annulaire est considéré comme restreint :
 - dans un trou ouvert (forage) : lorsque cet espace est inférieur à 1,12" (28,45 mm) pour un standoff de 100%, ce qui correspond à un espace de 0,75" (19,05 mm) pour un standoff de 67% ;
 - dans un entrefer (rechemisage ou recouvrement de tubage) : lorsque cet espace est inférieur à 0,75" (19,05 mm) pour un standoff de 100%.
- dans la mesure du possible, on fera en sorte de créer des espaces annulaires permettant d'atteindre un standoff d'au moins 1" (25,4mm) ;
- dans tous les cas, un espace annulaire correspondant à un standoff inférieur à 0,35" (8,89 mm) devra être considéré comme insuffisant pour assurer une cimentation efficace.

2. Spécificités des annulaires restreints

Les annulaires, quand ils sont restreints, présentent des spécificités qu'il faudra prendre en compte pour tenter d'assurer la construction d'une gaine de ciment aussi efficace que possible. Dans ce type d'annulaire, les faibles tolérances de diamètres et les contraintes d'écoulement des fluides ne laissent, en effet, que de très faibles marges de manœuvre. Cela concerne :

- la géométrie du trou foré ;
- l'efficacité du centrage ;
- la mise en place du laitier de ciment.

2.1 Géométrie du trou

La qualité de la géométrie du trou foré influe fortement sur l'ensemble des contraintes. Lorsqu'un trou est mal calibré, c'est à dire lorsque son diamètre et/ou sa trajectoire évolue fortement, des effets négatifs sont à attendre. Ils concernent particulièrement :

- l'efficacité du centrage : certains centreurs peuvent se trouver dans l'incapacité de remplir leur rôle en étant soit en extension complète dans les zones sur-calibrées, soit totalement écrasés au niveau des réductions de diamètres ;
- la mise en place du laitier dans l'annulaire : lorsque la géométrie du trou est perturbée, le risque d'un placement défectueux du laitier s'avère plus important, avec la formation de poches de boue résiduelles ou des remplissages incomplets de l'annulaire (channeling).

Les contraintes imposées par une trajectoire perturbée viendront accroître ces effets de façon d'autant plus marquée que les espaces annulaires disponibles sont réduits.

Dans un annulaire restreint, plus encore que dans un annulaire standard, on voit qu'il faut porter une attention toute particulière à réaliser un trou bien calibré et une trajectoire aussi rectiligne que possible.

Cette contrainte s'avère, par contre, beaucoup plus faible, pour ne pas dire inexistante, dans le cas des entrefers. Ceux-ci présentent, en effet, nécessairement de très faibles variations de diamètre et les trajectoires sont "lissées" par les tubages déjà en place.

2.2 Efficacité du centrage

On a vu plus haut que la règle communément admise par la profession est de considérer que l'efficacité du centrage est acceptable à partir d'un standoff de 67%.

Le standoff correspond au rapport entre l'espace annulaire minimal (C) réellement obtenu et l'écartement possible entre le rayon (A) du forage et le rayon (B) du tubage. Lorsque la valeur du standoff atteint 100%, le centrage est parfait (C=A-B). Avec un standoff de 0%, le tubage pose sur une génératrice (C=0).

$$\text{Standoff (\%)} = C / (A-B) * 100$$

Pour obtenir un standoff au moins égal à 67%, il faut que la géométrie de l'annulaire et les contraintes mécaniques qu'ils subissent, permettent aux centreurs de jouer leur rôle. Si le trou est sur-calibré, le centreur se trouve en extension totale. Si le trou est sous-calibré, le centreur est écrasé. Dans les deux cas, le tubage sera mal centré.

Les contraintes imposées par les variations de trajectoire influent fortement sur les valeurs possibles de standoff. Plus la trajectoire sera rectiligne et peu perturbée, plus les contraintes mécaniques imposées au tubage, et par conséquent aux centreurs, seront faibles et plus le centrage sera efficace.

Dans un entrefer, l'utilisation de centreurs rigides (positifs) permettra un centrage optimal.

2.3 Mise en place du laitier

Pour assurer une bonne cimentation, le laitier doit prendre la totalité de la place qu'occupait la boue dans l'annulaire. Il doit faire en sorte de "déplacer" et "remplacer" la boue dans sa totalité sans laisser de poches résiduelles, et sans circuler par des chenaux préférentiels (channeling) qui laisseraient de la boue en place.

Dans le cas d'un annulaire restreint, la mise en place du laitier est particulièrement influencée par la régularité de l'annulaire, la vitesse (débit du pompage d'injection), et les caractéristiques rhéologiques des fluides (boue, spacer, laitier).

3. Précautions à appliquer

Les précautions à appliquer pour assurer une cimentation de bonne qualité dans un annulaire restreint correspondront à réaliser la meilleure gestion possible des trois spécificités mentionnées plus haut : géométrie du trou foré, efficacité du centrage et qualité de la mise en place du laitier dans l'annulaire (remplissage et adhérence).

En trou nu, ces trois paramètres seront déterminants et dépendants les uns des autres : une bonne géométrie permettra un centrage efficace et facilitera le déplacement du laitier et sa mise en place.

Dans un entrefer, les deux premiers paramètres ne sont plus véritablement une contrainte. La géométrie du forage est en effet lissée par le tubage existant et un centrage efficace est rendu plus facile à réaliser en utilisant par exemple des centreurs rigides adaptés.

Dans tous les cas, lorsque cela est possible, il est largement recommandé d'utiliser des laitiers comportant un adjuvant expansif (comme par exemple de la bentonite) permettant d'obtenir une adhérence de meilleure qualité.

On rappellera ici que les outils de mesure de la qualité des cimentations sont le plus souvent inopérants dans les conditions d'annulaires restreints, tout particulièrement dans le cas des "entrefers". Les données obtenues sont alors le plus souvent impossibles à interpréter en termes qualitatifs. Il conviendra donc de prendre en compte cette difficulté (ou impossibilité) lors de la préparation des programmes concernés et signaler clairement cette difficulté lorsque plusieurs options de construction sont proposées.

4. Récapitulatif

Dans un forage géothermique profond, un espace annulaire sera considéré comme restreint lorsque :

- en trou nu, cet espace est inférieur à 1,12" (28,45 mm).
- dans un entrefer, cet espace est inférieur à 0,75" (19,05 mm).

Lorsque le programme de forage ou de réhabilitation le permet, on choisira autant que possible une solution permettant d'éviter la présence d'un annulaire restreint. A défaut, la solution retenue devra être expliquée et motivée.

Lorsque le programme proposé impose la présence d'un annulaire restreint, tous les moyens seront mis en œuvre et une attention particulière apportée à assurer l'homogénéité et la qualité de la gaine de ciment : géométrie du trou foré, efficacité du centrage et bon placement du laitier de ciment dans cet annulaire.

Dans ce type d'annulaire, il est fortement recommandé, lorsque cela est possible, d'utiliser des laitiers comportant un adjuvant expansif permettant d'obtenir une adhérence de meilleure qualité.

Enfin, les moyens de contrôle des cimentations seront choisis en fonction des contraintes engendrées par ce type d'annulaire. Les difficultés et limites d'interprétation des outils de mesures choisis devront clairement être énoncées et explicitées dans les documents proposant l'interprétation des diagraphies de cimentation.



Novembre 2016

FICHE TECHNIQUE n°023

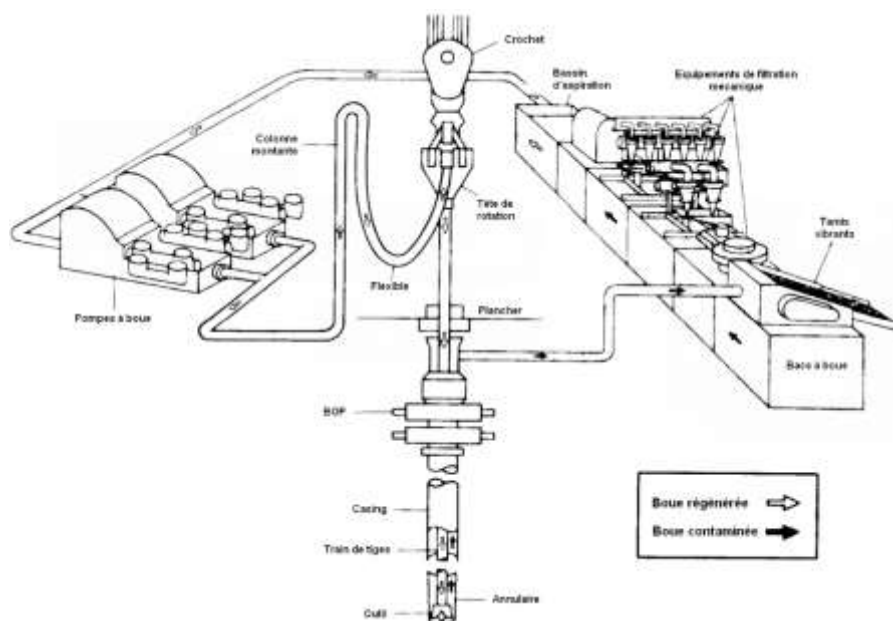
FLUIDES DE FORAGE ET DE COMPLETION

Cette note technique propose un retour d'expérience sur l'utilisation des fluides de forage et de complétion dans le contexte des forages géothermiques profonds du Bassin parisien. Elle est avant tout dédiée à la compréhension du rôle fondamental joué par la boue dans les opérations de forage. Les principales difficultés rencontrées dans ce domaine sont également abordées et analysées. Quelques recommandations qualitatives sont émises, en insistant particulièrement sur les précautions à prendre dans les circonstances spécifiques liées aux opérations de cimentations, aux diagraphies et au forage du réservoir.

1. Généralités

Pour réaliser la foration d'un puits, un fluide (souvent appelé boue de forage) est pompé à haute pression à l'intérieur des tiges de forage. Le fluide est injecté au niveau de l'outil de forage qu'il nettoie, refroidit et lubrifie, avant d'entraîner les morceaux de la roche forée (cuttings) jusqu'en surface par l'espace annulaire situé entre les tiges de forage et les parois du puits.

En surface, la boue subit des traitements mécaniques plus ou moins poussés en fonction des besoins (tamisage, dessablage, dessiltage, centrifugation) permettant d'éliminer les solides entraînés par la boue. Lorsque nécessaire, des dilutions ou des traitements chimiques complémentaires sont effectués de manière à ce que la boue nettoyée de ses solides retrouve ses propriétés initiales. Elle est alors stockée dans des bacs afin d'être à nouveau pompée et réinjectée dans la garniture de forage.



Équipement	Seuils de séparation
Tamis 30 mesh	> 440 μm
Tamis 80 mesh	> 150 μm
Tamis 425 mesh	> 35 μm
Dessableur	40-90 μm
Dessilteur	15-40 μm
Centrifugeuse	3-25 μm
Unité de filtration	1-10 μm

Exemples de traitements mécaniques

En pratique, les propriétés de la boue sont mesurées, contrôlées et ajustées en permanence par un technicien spécialisé dans ce domaine (le "boueux") afin d'assurer la sécurité et l'efficacité de la foration. Parmi les nombreux paramètres qui peuvent être contrôlés et mesurés (rhéologie, chimie, hydraulique), cinq sont reconnus pour affecter fortement les performances de la boue et les capacités de foration qui en dépendent : **la densité, la viscosité, le filtrat, le pH et la teneur en sable**. Il est possible d'évaluer la bonne adaptation et le niveau d'efficacité de la boue en observant les variations de ces paramètres tout au long d'une phase de forage.

La boue joue différents rôles dans le déroulement du forage :

- elle permet de maintenir le puits en sécurité, en exerçant une pression suffisante sur les formations forées afin d'éviter toute éruption des fluides contenus dans les différents réservoirs traversés ;
- elle nettoie le puits en remontant les déblais. L'étude de ces déblais permet d'obtenir un levé géologique donnant des informations précises sur les formations traversées ;
- elle maintient les parois du puits en créant une interface (filter cake) entre le trou foré et les formations traversées, particulièrement au droit des formations perméables. Le cake limite le passage de fluides vers les formations ;
- elle permet également de stabiliser et d'inhiber les interactions avec les argiles (hydratation, gonflement, délitage) ;
- elle lubrifie l'outil de forage et le refroidit ;

- elle réduit le poids de la garniture de forage (flottabilité) et surtout les frottements de celle-ci dans le trou foré ;
- elle transmet de l'énergie hydraulique aux outils (duses des tricônes, moteur de fond) et remonte des informations vers la surface ("mud pulse telemetry"). En géothermie, cette double capacité est utilisée pour les opérations de forage dirigé et la télétransmission des mesures de déviation.

La boue est conçue de manière à remplir tous ces rôles. Ses caractéristiques sont principalement définies en fonction des propriétés des formations traversées (nature des roches, pression interstitielle, présence de fractures, etc.). Ainsi, pendant la construction d'un forage, des boues sensiblement différentes peuvent être utilisées en fonction de chacune des phases de la foration.

L'utilisation des boues de forage présente toutefois des obligations ou certains inconvénients qu'il convient de bien maîtriser pour assurer la bonne réalisation des travaux. A défaut, des problèmes techniques peuvent survenir engendrant parfois des surcoûts importants :

- les fluides et boues résiduelles doivent être traitées et évacuées en respectant la réglementation applicable à ce type de déchets ;
- les fluides de forage doivent être mis en œuvre avec un ensemble d'équipements adaptés au puits à réaliser, traités et contrôlés en permanence de façon à leur permettre de conserver les caractéristiques souhaitées ;
- en phase réservoir, une boue inadaptée ou mal contrôlée peut endommager les formations captées, en diminuer la capacité de production ou poser des problèmes au moment de la mise en production (durée et succès des opérations de mise en production) ;
- les vitesses d'avancement obtenues en utilisant les boues à l'eau sont généralement inférieures à celles que l'on peut atteindre avec des fluides moins denses (eau, air, mousse). Avec la boue, la vitesse d'avancement doit être choisie, ni trop rapide ni trop lente, et surtout aussi régulière que possible afin de favoriser la stabilité des échanges avec les terrains forés ;
- en cas de pertes de circulation, de grandes quantités de boue peuvent être perdues ce qui, ajouté au temps supplémentaire passé à forer dans ces conditions, peut fortement influencer sur le coût des travaux ;
- dans certaines conditions, l'usage de la boue peut provoquer des collages du train de tiges par pression différentielle. Les opérations d'instrumentation qui peuvent en résulter sont parfois longues, complexes et coûteuses.

2. Les fluides de forage en géothermie

Les fluides mis en œuvre pour réaliser les forages géothermiques profonds du Bassin parisien sont des boues dites aqueuses (water-based mud ou WBM) par opposition aux boues ou émulsions non aqueuses (oil-based mud ou OBM), ou à des fluides synthétiques (synthetic-based mud ou SBM) souvent utilisées dans le domaine pétrolier.

Les boues aqueuses (WBM) sont constituées d'eau additionnée d'argiles et de divers produits chimiques, de manière à créer un mélange homogène. Leur consistance varie selon la viscosité. La phase argileuse est habituellement constituée de bentonite auquel vient s'ajouter un mélange d'argiles naturelles mises en suspension dans le fluide pendant la foration. La bentonite est souvent qualifiée de "gel", car en solution dans l'eau à un certain dosage, elle forme un fluide thixotrope qui, tant qu'il est pompé, reste fluide mais qui devient un gel relativement résistant à l'écoulement quand le pompage cesse. Dès qu'une force suffisante de pompage est appliquée pour « briser » ce gel, la boue redevient fluide.

Quatre types de boues aqueuses différentes sont généralement utilisés pour réaliser les forages au Dogger :

- pour la phase 26" couvrant les terrains de surface, une boue de type "bentonitique simple", avec injections de bouchons visqueux (polymères) selon besoins ;
- pour la phase 17"1/2 couvrant les réservoirs de l'Albien et du Néocomien et la prise d'angle de la déviation, une boue de type "bentonitique améliorée avec des polymères" ;
- pour la phase 12"1/4 en déviation stabilisée allant au toit du Dogger, une boue de type "bentonitique améliorée aux polymères" avec ajouts éventuels de lubrifiants pour limiter le couple de rotation de la garniture. Depuis assez récemment on observe également l'utilisation d'une boue de type " K_2CO_3 + Glycol". La boue au glycol permet en particulier un meilleur contrôle des argiles ;
- pour la phase 8" 1/2 (réservoir), une boue de type "eau saumurée avec polymères biodégradables". La densité requise est obtenue avec du sel. Les polymères dégradables apportent la viscosité nécessaire tout en garantissant un faible niveau d'endommagement du réservoir. Des bactéricides sont systématiquement ajoutés dans le cas des forages captant l'Albien et le Néocomien.

Les boues spécifiques utilisées pour la foration des réservoirs sont aussi appelées "boues de complétion". Elles sont conçues pour ne pas endommager les caractéristiques hydrauliques et la productivité des formations captées. Elles ne doivent pas être confondues avec les "fluides de fracturation" utilisés pour provoquer ou stimuler la production de certaines formations (comme pour les EGS ou pour permettre l'exploitation du gaz de schistes).

De nombreux produits chimiques sont ajoutés à la boue pour lui donner des propriétés particulières. Ces produits sont choisis pour influencer sur son poids et sa densité, sa viscosité, sa stabilité, sa résistance à la chaleur, ou en matière de taux de pénétration du substrat, de capacité de refroidissement et de lubrification des équipements, pour lui donner un caractère biocide ou pour limiter les risque d'entartrage ou de corrosion, etc. Les différents polymères hydrosolubles utilisés en géothermie ont généralement un triple rôle : celui d'agent viscosifiant permettant de contrôler la viscosité, celui de réducteur de filtrat limitant l'épaisseur du mud-cake et enfin celui d'encapsulateur permettant d'améliorer le rendement par un meilleur enrobage des particules et une limitation de leur dispersion.

1	Contrôleur d'alcalinité	11	Lubrifiant
2	Bacéricides	12	«Décoiçant »
3	Anti-calcium	13	Inhibiteur de gonflement des argiles
4	Inhibiteur de corrosion	14	Produits facilitant la séparation
5	Anti-mousse	15	Stabilisateur haute température
6	Agent moussant	16	Défloculant
7	Emulsifiant	17	Viscosifiant
8	Réducteur de filtrat	18	Alourdissant
9	Floculant	19	Fluide de base aqueux (saumure)
10	Colmatant	20	Fluide de base oléagineux

Principales catégories d'additifs utilisés dans les fluides de forage

Parmi les additifs les plus utilisés en géothermie, on trouve :

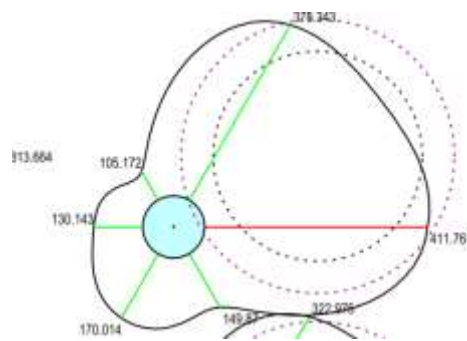
- des viscosifiants : argiles naturelles (principalement bentonite), différents polymères naturels et synthétiques et des biopolymères facilement dégradables ;
- des contrôleurs du pH : soude caustique (NaOH), lignite, lignosulfonates (FCL) ;

- de l'anti-calcium : carbonate et bicarbonate de soude, particulièrement pour traiter les contaminations dues au reforage du ciment ;
- des réducteurs de filtrat servant à consolider le cake de filtration afin de limiter l'invasion des formations par le fluide : amidons, carboxy-méthyl-celluloses (CMC), cellulose polyanionique (PAC) ;
- des inhibiteurs de gonflement et de dispersion des argiles : sels minéraux (KCl en particulier) et organiques, glycérol, silicates ou divers polymères comme le polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA), les polyglycérols (polyalkylèneglycols PAG) ;
- des agents alourdissants comme le sel (saumure NaCl), la calcite (carbonate de calcium CaCO_3), la barytine ("barite" ou sulfate de baryum BaSO_4), plus rarement l'hématite (Fe_2O_3) ;
- des colmatants granuleux (coquilles de noix), fibreux (fibres de bois, canne à sucre) ou lamellaires (coquilles d'huîtres, céréales, paillettes de micas) ;
- des anti-moussants (defoamer) ;
- des lubrifiants pour limiter le couple de rotation ;
- des biocides (bactéricide), principalement utilisés pour réaliser les forages à l'Albien et au Néocomien.

3. Problèmes rencontrés

Les principaux problèmes liés à la boue observés dans le Bassin parisien concernent la géométrie du trou foré, les pertes partielles ou totales de fluide et des collages de la garniture de forage par pression différentielle.

Géométrie du trou foré : certaines formations tendres, souvent argileuses ou sableuses (par exemple, l'Albien et le Néocomien) n'ont que peu de cohésion et s'érodent facilement, et ce d'autant qu'elles se situent souvent dans les zones de prise d'angle des déviations. Il peut en résulter des forages dont la géométrie (calibrage) va se trouver fortement perturbée, avec des possibilités de coincement de la garniture de forage (key-seat) ou des difficultés pour descendre le tubage en fin de phase. Le centrage des colonnes et leur cimentation sont également perturbés par ces défauts de calibrage et donner des résultats de mauvaise qualité.



Exemple de key-seat (extrait du log EMS de GVLP-2)

Pour éviter au mieux ce phénomène, il faut agir sur les trois principaux éléments suivants :

- disposer d'une boue et d'une hydraulique bien adaptée, que l'on conservera le plus homogène possible pendant toute la durée de la phase. Le choix de la boue et la conservation des paramètres de celle-ci, pendant la phase concernée, est un élément fondamental de la stabilité du trou foré ;
- réaliser une trajectoire de déviation aussi régulière, lisse et peu perturbée que possible afin de limiter la déstabilisation des parois par les frottements de la garniture. Réduire le nombre de manœuvres permet également de limiter la déstabilisation et l'érosion des parois ;
- il faut enfin maintenir une vitesse d'avancement régulière, ni trop lente, ni trop rapide, afin de conserver au mieux l'équilibre entre trou et formations.

Pertes ou gains de fluide : toute perte de fluide indique au foreur un changement de pression (dépression en l'occurrence dans le milieu foré). Elle indique généralement la présence de systèmes de fractures naturelles dans les terrains traversés. Dans le Bassin parisien, elle survient le plus souvent dans les premières phases de forage (principalement dans les terrains de surface et dans la craie).

La chute de pression induite peut poser des problèmes majeurs au foreur, principalement en ne permettant pas l'évacuation des cuttings. De ce fait, elle ralentit considérablement les vitesses d'avancement. Elle est donc doublement pénalisante, à la fois en perte de temps et en produits consommés.

Inversement un gain de fluide se traduira par l'augmentation du niveau dans les bacs à boue ("mud-pit gain") et sera le premier indice d'un risque d'éruption (blow-up). Ce risque est peu élevé en Bassin parisien, mais reste néanmoins non négligeable, sachant que la pression du Dogger atteint parfois plus de 10 bar au niveau du sol. Une éruption peut être maîtrisée par l'utilisation des BOP (Blow-Out Preventer) et en rétablissant la densité des fluides dans la colonne de forage.

Lorsque la pression dans la colonne de boue (PH) dépasse la pression de la formation géologique (PF), celle-ci peut soit se fracturer si elle est peu perméable, soit être envahie par la boue. En Bassin parisien, le risque de fracturation est très peu élevé en foration mais peut devenir crucial et très important pendant les opérations de cimentation compte tenu de la densité élevée des laitiers de ciment.

En cas de pertes de circulation, quatre possibilités peuvent être envisagées selon les conditions rencontrées :

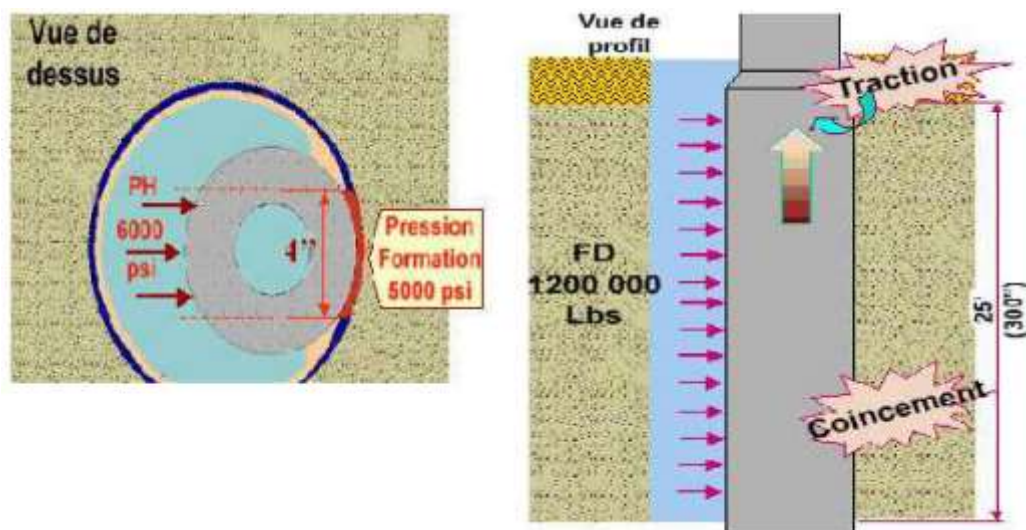
- poursuivre la foration en perte jusqu'à la fin de la phase. Cette solution est souvent retenue lorsque le métrage restant à réaliser est peu important ;
- utiliser une boue suffisamment allégée pour ne pas dépasser la pression de formation induisant les pertes. Les pertes se situant le plus souvent en sub-surface, cette option est rarement envisageable ;
- mixer des produits colmatants dans la boue et injecter des bouchons à viscosité élevée tout en poursuivant la foration ;
- boucher les zones de perte en injectant des produits reforables (le plus souvent des bouchons de ciment). Cette dernière option est la plus coûteuse mais également, le plus souvent, la plus efficace en termes de résultats pour garantir la cimentation de la colonne en fin de phase.

Les agents colmatants (Lost Circulation Matériel ou LCM) peuvent être, par exemple, du carbonate de calcium, des silicates (paillettes de mica) ou des produits à base de cellulose (cellophane). Ils doivent boucher les pores de la formation rocheuse et permettre ainsi de plus ou moins étanchéifier les parois du puits. Pour une efficacité optimale, les grains ou éléments des

agents colmatants doivent avoir, autant que possible, une taille équivalente à la moitié des espaces interstitiels ou de l'espace des fractures et ne pas obturer les duses de l'outil de forage. L'utilisation de ce type de produits doit être - bien évidemment - strictement prohibée dans la phase de foration du réservoir géothermique capté.

Collage par pression différentielle : les coincements par pression différentielle sont causés par la différence de pression pouvant survenir entre la pression de formation (PF) et la pression hydrostatique (PH) de la colonne de boue. Cette différence de pression s'exerce, tout particulièrement, sur les masse-tiges lorsque celles-ci sont immobilisées et en contact avec la paroi du trou, ce qui survient systématiquement lors d'un ajout de tige en puits dévié.

Le cake de la boue forme alors une interface qui empêche l'égalisation des pressions entre les deux faces des masse-tiges. Plus le cake est épais, plus augmente la surface sur laquelle s'exerce cette différence de pression.



Les coincements par pression différentielle requièrent que les cinq conditions ci-dessous soient simultanément satisfaites :

- puits assez dévié pour que la garniture vienne au contact de la paroi ;
- pression hydrostatique (PH) de la colonne de boue, supérieure à la pression de formation (PF) ;
- zone perméable au point de contact des masse-tiges avec la paroi ;
- filtrat élevé et surtout cake épais et de résistance médiocre ;
- moment d'immobilité de la garniture.

La prévention du collage requiert d'agir du mieux possible sur ces causes :

- **surface de contact** : il est possible de diminuer la surface du contact, en évitant les masse-tiges surdimensionnées, en stabilisant la garniture, et surtout en utilisant des masse-tiges spiralées ou carrées. L'utilisation de tiges lourdes "heavy-weight" en remplacement d'un certain nombre de masse-tiges permet de diminuer la longueur de garniture potentiellement dangereuse ;

- **force de collage** : la force qui "colle" la garniture est proportionnelle à la pression différentielle entre pression de formation (PF) et la pression hydrostatique (PH) de la colonne de boue. Pour minimiser cette force, il faut, d'une part, évaluer la pression de formation, avec le maximum de précision et, d'autre part, maintenir la pression hydrostatique avec la sécurité juste nécessaire pour le contrôle du trou (contrôle de la densité). Il s'agira également, lorsque nécessaire, de réduire les frottements en employant des produits lubrifiants ;
- **cake** : la qualité et l'épaisseur du cake à plus d'importance que la valeur du filtrat. Il s'agit donc avant tout d'améliorer les propriétés de filtration de la boue ;
- **immobilité** : la procédure qui semble assurer la meilleure protection préventive est de limiter autant que possible la durée d'immobilité de la garniture lors des ajouts de tiges ou des circulations.

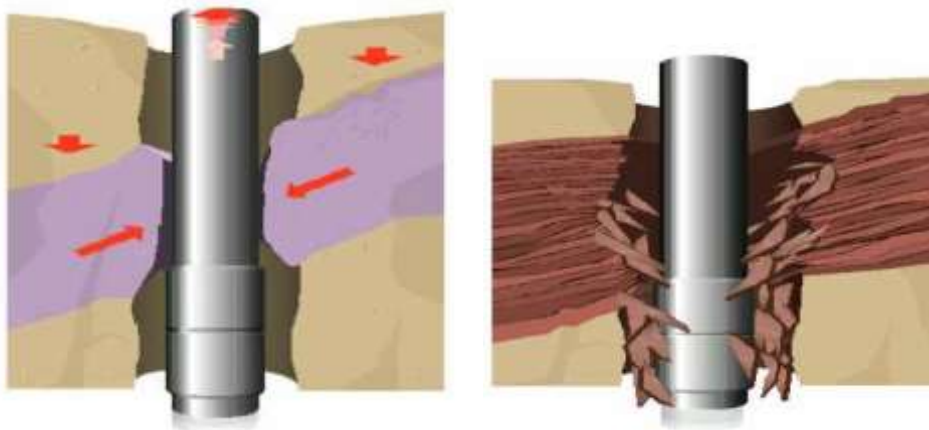
La réduction de la pression hydrostatique (via un contrôle de la densité) est la méthode la plus évidente pour résoudre les problèmes de collage par pression différentielle. L'abaissement de la pression hydrostatique diminue les forces latérales sur la garniture et réduit donc la force exigée pour la libérer du mud-cake. On portera toutefois attention à ne pas causer de ce fait un problème de déstabilisation ou de venue qui pourrait mettre en danger la sécurité du puits.

Quelques autres problèmes sont parfois observés, plus rares et plus spécifiques. On citera en particulier :

La prolifération bactérienne : le matériel de forage et l'utilisation de produits biodégradables dans les boues (polymères, cellulose, papier...) peuvent provoquer la prolifération de bactéries qu'on souhaite généralement éviter à proximité de forages d'eau potable, ou lors de la foration des aquifères stratégiques protégés (Albien, Néocomien). Pour ces raisons, les fluides de forage peuvent contenir des biocides. L'ensemble du circuit boue et du matériel de fond est, de la sorte, traité pour assurer la protection des zones aquifères concernées.

Le bullage : on observe parfois un "bullage" de la boue (mud gas cut) correspondant à la présence accidentelle dans la boue de gaz (H_2S , CO_2 , hydrocarbures, air) sous forme de bulles plus ou moins fines provenant des formations traversées ou provoqué par des problèmes dans le circuit de pompage ou à l'aspiration des pompes. Ce phénomène peut modifier les caractéristiques du fluide ou être à l'origine d'une diminution de la densité apparente de la colonne de boue et provoquer des venues.

La déstabilisation des argiles : quelques cas assez rares de déstabilisations de zones argileuses sont notés. Cette perturbation entraîne généralement une déformation du trou ou des effondrements de parois provoquant un coincement partiel ou total de la garniture. La circulation peut être complètement perdue. Il peut y avoir alors de grandes difficultés à poursuivre le forage. Il peut s'agir, soit d'un phénomène de décompression de la formation (ou de délitage), soit d'un gonflement des argiles elles-mêmes. Certaines argiles sont en effet constituées par des feuillets qui sont faiblement liés entre eux. Elles se gonflent en absorbant une grande quantité d'eau libre (provenant de la boue) entre les feuillets qui glissent alors les uns sur les autres, perdent leur cohérence et fluent vers l'intérieur du puits. Dans les deux cas, si ce phénomène n'est pas rapidement contrôlé, le trou peut se refermer et coincer la garniture de forage.



Phénomènes de gonflement (à gauche) et de décompression (à droite) des argiles

Pour éviter le gonflement des argiles, il faut principalement agir au niveau des caractéristiques de la boue, pour cela :

- augmenter la densité de la boue ;
- réduire la filtration (améliorer la qualité du cake et réduire son épaisseur) ;
- ajouter un lubrifiant approprié dans la boue ;
- augmenter le débit de circulation ;
- choisir une boue adaptée. Le KCl et les polymères cationiques (PHPA, amines) sont des additifs souvent utilisés pour inhiber le gonflement des argiles.

Le contrôle de la décompression (ou du délitage) peut quant à lui nécessiter la pose de bouchons de ciment pour stabiliser et maintenir la formation.

4. Traitement des boues résiduelles

A la fin des travaux, afin de respecter les exigences environnementales, les volumes de boue résiduels et les effluents sont traités en séparant les fluides des solides. Pour des raisons pratiques (volumes de stockage limités sur les chantiers, transport), ce traitement est souvent réalisé sur le site pendant les travaux.

Le traitement des boues résiduelles résultant de la foration est couramment appliqué par un processus de séparation / stabilisation / solidification. Le processus d'inertage des boues consiste à séparer les phases liquides et solides de la boue, puis à partir du résidu pâteux obtenu, à élaborer une masse pelletable ayant une intégrité structurale suffisante pour permettre le transport et la mise en décharge.

Cette technique transforme donc le produit liquide ou semi-liquide initial, susceptible de se répandre, en un solide facilement transportable. Toutefois, il est à noter que le processus consiste en un transfert et une réduction de la pollution et non en sa véritable élimination.

Il existe des procédés appliqués durant le forage sur le chantier (solution actuellement la plus fréquemment utilisée en géothermie), et après forage sur des sites spécialisés. Mais le principe reste le même. Le procédé de stabilisation commence par la réduction des volumes à traiter. On utilise pour cela des centrifugeuses qui séparent la phase solide de la phase liquide. On mélange ensuite la pâte obtenue avec des agents de stabilisation (ciment, chaux). Les matériaux ainsi inertés sont ensuite acheminés vers une décharge agréée. Après clarification, la partie liquide est si nécessaire traitée chimiquement (le pH principalement) ou/et diluée (pour réduire le niveau de

salinité) afin de répondre à la réglementation édictée par le gestionnaire local du réseau d'assainissement ou du réseau pluvial. Le fluide est ensuite progressivement évacué par pompage au débit maximum autorisé ou, si aucun réseau n'est disponible, par citernage.

Le coût de traitement et d'élimination des effluents et boues résiduelles fluctue en fonction des sites (transport, taxes). Il représente le plus souvent 50% à 70% du budget total alloué au poste "fluides de forage".

5. Développements et évolutions

Les fluides de forage et de complétion ont un rôle central dans la réalisation des travaux de forage, avec un impact qualitatif majeur sur l'ensemble des travaux. De la bonne maîtrise des fluides de forage va dépendre, pour une grande part, les performances d'avancement en foration, la bonne géométrie du trou foré, l'efficacité du centrage des tubages, le bon placement du ciment, la qualité de certaines diagraphies et enfin la bonne productivité de l'ouvrage. Dans le réservoir, ce sont les caractéristiques des fluides de forage qui permettront de minimiser les risques d'endommagement et de pollution de la nappe.

Le choix et le contrôle des boues de forage dans le cadre de la géothermie profonde du Bassin parisien sont pleinement maîtrisés par la grande majorité des Maîtres d'Oeuvre qui s'appuient pour ce faire sur des sociétés de services et des opérateurs spécialisés.

Le travail qui est effectué dans ce domaine vise principalement deux objectifs : diminuer, autant que possible, les risques en foration tout en limitant les coûts de mise en œuvre et de traitement des effluents. Pour ce faire, certains opérateurs recherchent une optimisation des produits (en particulier dans le choix des nombreux polymères disponibles sur le marché), des formulations alternatives plus performantes (les boues au glycol par exemple) ou des solutions de stockage ou de traitement des effluents toujours mieux adaptées aux conditions des chantiers en zone urbaine (surfaces restreintes, problèmes de rejets et de transports). D'autres proposent de mettre en œuvre des technologies pouvant permettre des économies d'échelle, au niveau de la réalisation des doublets (machines de forage à capacité de skidding).

6. Recommandations

Hormis d'assez fréquents problèmes de calibrage (principalement en phase 17"1/2, plus rares et moins marqués en phase 12"1/4) et des cas de collage par pression différentielle, il n'a été observé au cours de ces dernières années que très peu de problèmes directement provoqués par les fluides de forage, du moins pour ce qui concerne les forages au Dogger et à l'Albien, dans le Bassin parisien. Les recommandations qui peuvent être faites vont donc surtout avoir un objectif qualitatif et se limiter à des rappels, certes importants, mais bien connus de la profession. On retiendra principalement :

- le besoin de bien choisir la capacité du matériel utilisé (c'est à dire le circuit boue dans son ensemble), d'évaluer les volumes de boue (fabrication et traitement) et les besoins de stockage. Cette évaluation se base généralement sur la phase nécessitant le plus gros volume et sur le volume total de l'ensemble des phases. Mais elle peut aussi être fortement contrainte par les conditions de surface ;
- la nécessité de conserver, autant que possible, des paramètres de la boue les plus homogènes et constants possibles pendant toute la durée de chacune des phases de la foration. Le but est d'éviter de fragiliser ou de rompre l'équilibre qui se crée progressivement entre le trou et les formations forées ;

- pour les mêmes raisons, il est souhaitable de conserver des vitesses d'avancement aussi régulière que possible (ni trop rapide, ni trop lente) tout au long d'une même phase. Une vitesse trop rapide peut entraîner un dépassement de la capacité de traitement des boues en surface, et donc une détérioration de ses caractéristiques (augmentation de la densité par exemple) pouvant induire des problèmes de forage. Inversement, une vitesse trop lente est non seulement pénalisante en temps, mais peut conduire à une érosion des parois et à une déstabilisation progressive et qualitativement nuisible de l'équilibre boue-formations ;
- la nécessité de conserver une boue homogène et de bonne qualité pendant la durée de la foration est également un élément important pour la réussite des cimentations. Il ne s'agit pas de mettre en place une boue neuve au dernier moment, mais bien d'assurer un conditionnement du puits pendant toute la réalisation de la phase avec une boue aussi homogène et stable que possible. La mise en place du ciment en sera largement facilitée ;
- le besoin de disposer d'un fluide de remplissage homogène apparaît également nécessaire pour réaliser les diagraphies. C'est tout particulièrement vrai pour les diagraphies soniques et ultrasoniques dont la mesure est directement dépendante de la vitesse des ondes dans le fluide de remplissage et donc de son homogénéité et de sa qualité ;
- on rappellera que les fluides de complétion doivent impérativement exclure l'utilisation de produits colmatants (quels qu'ils soient). Il faut également dans ce contexte absolument interdire l'usage de bacs ou bassins ayant stocké des colmatants sans prendre la précaution de les avoir soigneusement récurés au préalable ;
- enfin, le niveau de dégradabilité des produits utilisés dans les boues de complétion doit assurer une absence totale de résidus. Certains produits non acidifiables ou difficilement destructibles (comme la baryte par exemple, ou certains polymères synthétiques) doivent donc être strictement bannis des opérations pendant la phase de forage du réservoir.



Avril 2019

FICHE TECHNIQUE 024

ARCHITECTURES NOUVELLES DE PUIITS

Cette note technique a pour objectif de présenter et de discuter certaines architectures nouvelles ou novatrices parfois proposées pour le captage des ressources géothermiques dans le Bassin Parisien.

Les architectures suivantes sont abordées :

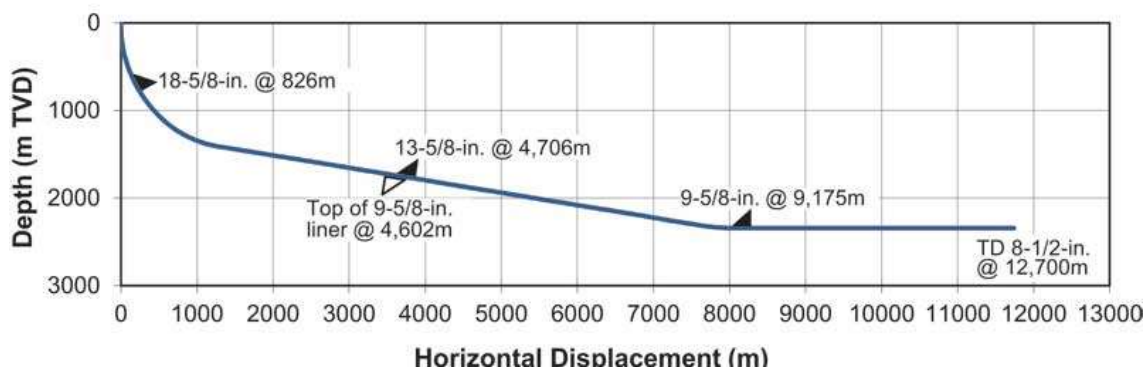
- le captage du Dogger par drain sub-horizontale (exemple de Cachan) ;
- le concept de puits anti-corrosion (exemple de Melun l'Almont et de Bonneuil-sur-Marne) ;
- l'option de sur-diamétrage des colonnes de production.

Dans chacun des cas, les spécificités, les avantages et les inconvénients de ces architectures inhabituelles seront analysés et discutés. On s'attachera également à déterminer les éléments les plus sensibles des programmes proposés et à définir d'éventuelles recommandations visant à assurer ou à améliorer la qualité des ouvrages.

1. LE DRAIN SUB-HORIZONTAL

Le principe du drain horizontal, ou sub-horizontale est de multiplier la capacité de production unitaire d'une formation (eau, gaz ou pétrole) en augmentant la longueur du captage. Le concept est très ancien : il a historiquement été mis en œuvre dans les "qanats" (ouvrages également appelés "foggaras" en Afrique du Nord) dans le but de mieux exploiter des nappes superficielles en milieu désertique. Le qanat de Zarch en Iran, le plus ancien connu, date de plus de 3 000 ans. Il formait un drain de 71 kilomètres de longueur et permettait de délivrer environ 8 000 m³ d'eau par jour par simple écoulement gravitaire (pente de 0,01%).

Beaucoup plus récemment, les compagnies pétrolières ont repris le concept, en réalisant d'abord des puits inclinés, puis, de façon courante à partir des années 1990, des drains horizontaux de plus en plus performants. Aujourd'hui, ce type d'ouvrage est devenu un quasi standard pour exploiter de nombreux gisements de gaz ou d'huile. Le record mondial serait actuellement détenu par Exxon Neftegaz (Sakhalin-1 Project, janvier 2012) avec la réalisation du puits Z-42 (voir la coupe schématique ci-après) présentant un déport horizontal de 11 739 m pour une longueur totale forée de 12 700 m.



Cette technologie de drainage a été utilisée en géothermie en 2013 sur le doublet horticoles de Schlattigen (Suisse). Il a récemment été proposé par GPC-IP pour réaliser un doublet au Dogger dans le Bassin Parisien sur le site de Cachan (site géré par Dalkia). Les ouvrages à drain horizontal GCAH-1 (producteur) et GCAH-2 (injecteur) ont été forés en 2017 et 2018 avec pour objectif d'obtenir un débit d'exhaure de 450 m³/h à partir d'un drain sub-horizontale (inclinaison 86°) d'une longueur d'environ 1 000 m.

1.1. Architecture générale

L'architecture proposée par GPC-IP pour capter le Dogger au moyen d'un drain horizontal est schématisée dans la coupe technique ci-après :

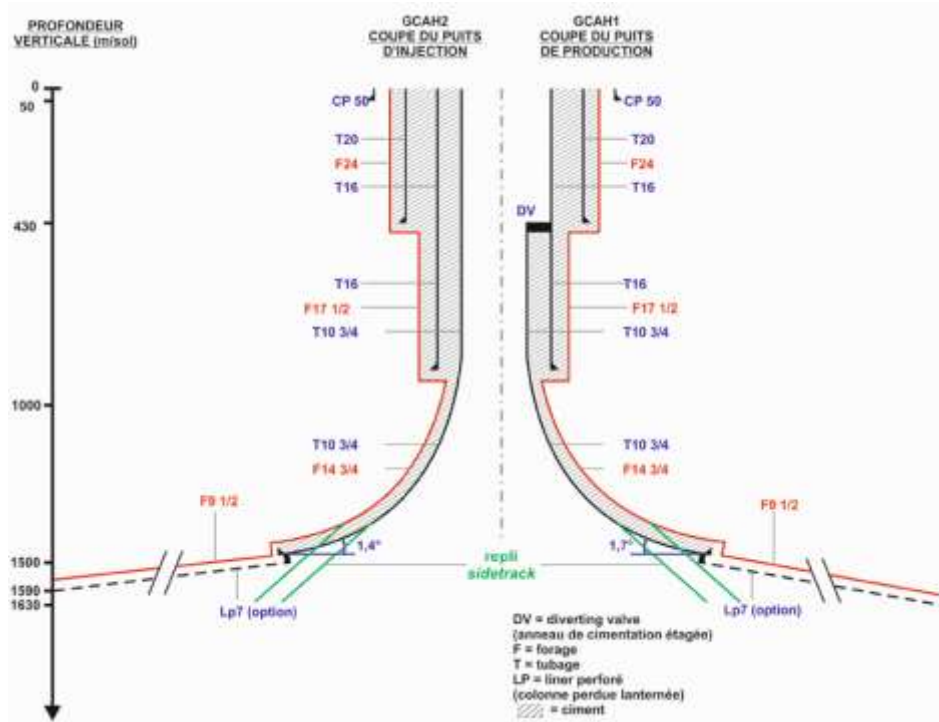


Figure 1. Illustration du doublet sub-horizontale à Cachan (source : GPC-IP)

Par rapport à un doublet classique au Dogger, cette architecture présente quelques éléments de construction et d'exploitation spécifiques :

- un diamètre de colonne de production important : afin de limiter les pertes de charge pour une exploitation à 450 m³/h, il est programmé une augmentation du diamètre de la colonne de production passant d'un tubage 9"5/8 (cas des programmes les plus standards exploitant jusqu'à 300-350 m³/h au Dogger) à un tubage 10"3/4. Cette augmentation de diamètre se répercute sur l'ensemble de l'architecture mise en œuvre. De ce fait, la chambre de pompage du puits de production est également de plus gros diamètre (16" au lieu de 13"3/8) ainsi que la colonne technique sus-jacente (20" au lieu de 18"5/8) ;
- un tubage 16" (0-1000 m) couvre la phase verticale avant le début de la déviation, participe à la protection des aquifères de l'Albien et du Néocomien et constitue la chambre de pompage sur le puits de production ;
- une plus grande longueur de la phase verticale : le programme prévoit un démarrage de la déviation (KOP) vers 1000 m de profondeur au lieu des 400 à 450 m habituels. Compte tenu de la faible distance séparant les deux têtes de puits (une dizaine de mètres), le risque potentiel de collision entre les deux ouvrages dans la phase verticale doit être évalué et maîtrisé ;
- l'exploitation du réservoir au moyen d'un drain sub-horizontale incliné à environ 86°. Cette solution est véritablement novatrice en ce qui concerne l'exploitation géothermique du Dogger dans le Bassin Parisien. Elle est justifiée par le gain important de productivité recherché (débit attendu de 450 m³/h) ;
- l'absence de "poubelle à sédiment" en fond de puits. Cette absence est la conséquence directe de la structure sub-horizontale au niveau du réservoir. Elle pourrait entraîner des perturbations - tout particulièrement dans le puits d'injection - dont il est difficile à cette date d'évaluer précisément les effets. On pourrait par

- exemple constater une baisse de productivité du fait de la réduction partielle du diamètre du réservoir ou du tubage en présence de dépôts ;
- les contrôles réglementaires périodiques (diagraphies de contrôle des cimentations et des tubages) seront d'autre part plus difficiles à réaliser. Ces outils - habituellement descendus par simple gravité - ne pourront pas atteindre le sabot du tubage sans utiliser une assistance adaptée à la forte inclinaison finale des tubages ($>70^\circ$). La mise en œuvre de cette assistance (tiges, coil-tubing ou autres) induira inévitablement un surcoût opératoire ;
 - concernant toujours les contrôles périodiques réglementaires, la réalisation des diamètres mécaniques de tubage sera très probablement perturbée par les sédiments qui se déposeront - inévitablement - sur la génératrice basse des zones très fortement inclinées ($>70^\circ$) ;
 - enfin une difficulté est à attendre au cours de la vie du doublet : il s'agit de l'entretien des puits. Lorsque des travaux de curage des tubages et de nettoyage du drain deviendront nécessaires, il s'agira d'une opération plus coûteuse parce qu'exigeant des moyens spécifiques sans commune mesure avec les opérations similaires régulièrement pratiquées en géothermie. Outre les surcoûts, ces interventions pourraient dans certains cas nécessiter la disponibilité d'une plateforme d'une emprise largement supérieure à celle imposée par un work-over classique.

1.2. Centrage des colonnes 10"3/4

Le centrage d'un tubage 10"3/4 dans un forage incliné à 86° nécessite du matériel spécifique. L'utilisation de centreurs de type "roller blade" a été utilisée afin de répondre aux contraintes de la déviation.



Figure 2. Centreur de type roller-blade

Ce type de centreur peut être assimilé à un centreur rigide. Pour obtenir un centrage suffisamment efficace de la colonne 10"3/4 dans la zone stabilisée à 86° , il s'agit donc de compenser la déflexion du tube entre deux centreurs. Sur une base théorique, le calcul montre que le plan de centrage nécessite entre 1 et 2 centreurs "roller-blade" par tube. Il est bien évident que ce plan n'atteint sa pleine efficacité que dans la mesure où le trou foré est bien calibré et que la trajectoire réelle du puits est suffisamment rectiligne et peu perturbée. Le pilotage de la trajectoire par RSS (Rotary Steerable System) est le moyen le plus pertinent pour atteindre cet objectif.

1.3. Programme de déviation

Le programme de déviation est certainement l'aspect le plus marquant de cette architecture, sinon le plus novateur. En effet de très nombreux ouvrages sub-horizontaux ou horizontaux ont déjà été réalisés dans le domaine pétrolier. Le programme proposé s'en distingue néanmoins par l'importance des diamètres de forage :

- diamètre de 14"3/4 pour le forage jusqu'au toit du réservoir (0-86°) ;
- diamètre de 8"1/2 pour la réalisation des drains (86°).

La réalisation de forage sub-horizontaux **en gros diamètres** sont des opérations assez peu courantes. Les risques restent élevés, même si la technologie est aujourd'hui plutôt bien maîtrisée. Les moyens nécessaires doivent être engagés - on retiendra en particulier le pilotage de la trajectoire par RSS - en privilégiant des opérateurs de déviation dont la maîtrise en la matière est reconnue par la profession.

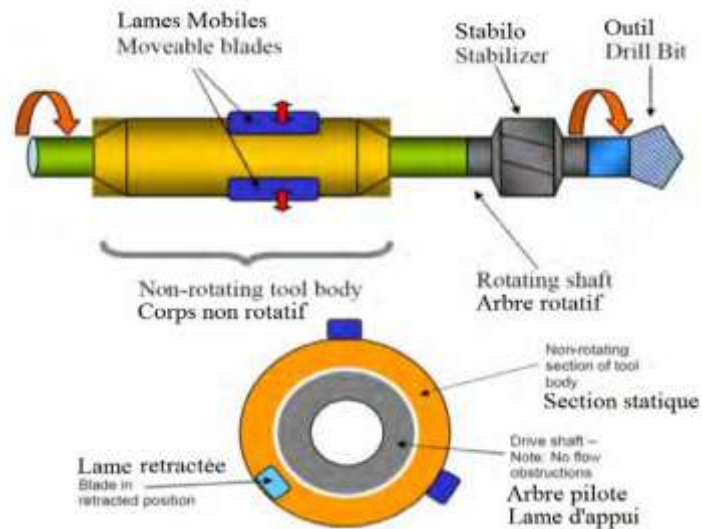


Figure 3. Rotary Steerable System (RSS)

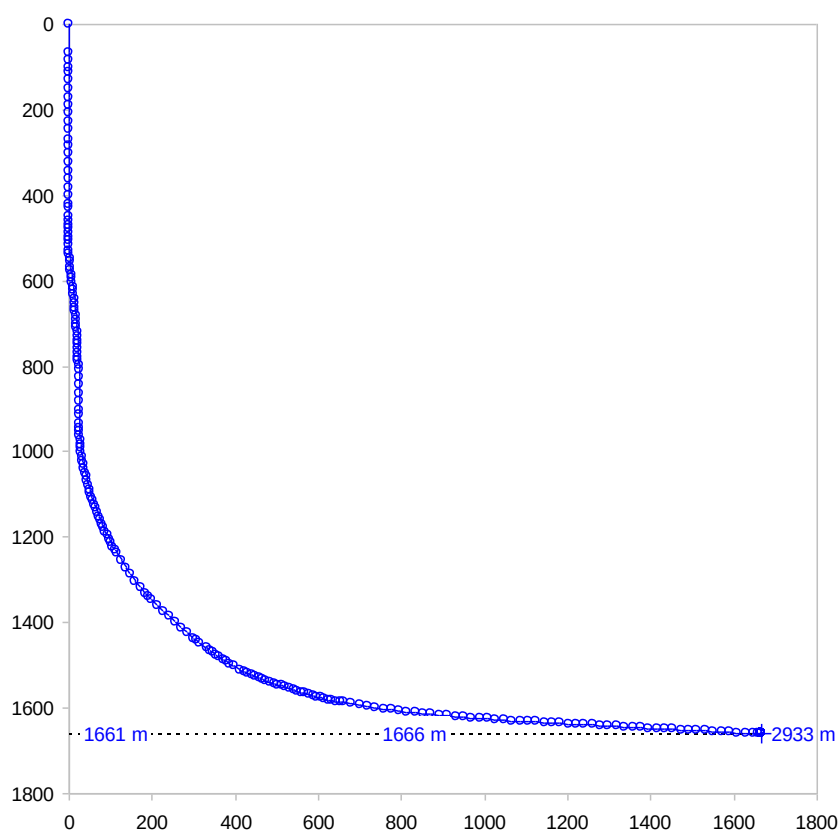


Figure 4. Trajectoire du puits GCAH-1

La trajectoire du puits GCAH-1 se caractérise par une amorce de la déviation assez profonde (KOP vers 950 m) suivie par une prise d'angle régulière ($0,84^{\circ}/10\text{m}$) jusqu'au toit du réservoir. Le drain est ensuite réalisé avec une inclinaison moyenne de 86° . L'inclinaison maximale enregistrée sur le puits atteint $87,7^{\circ}$.

Les travaux réalisés à Cachan ont montré que l'utilisation de la technologie RSS est essentielle mais qu'elle est - contrairement aux attentes initiales - insuffisante en elle-même pour assurer une trajectoire lisse et régulière. Dans la zone sub-horizontale du drain, les valeurs du DLS moyen s'élèvent en effet respectivement à $0,35^{\circ}/10\text{m}$ (GCAH-1) et à $0,49^{\circ}/10\text{m}$ (GCAH-2), soit des valeurs 3 à 4 fois plus élevées que celles que l'on pourrait attendre d'un pilotage RSS.

1.4. Exploitation des ouvrages et débit maximum envisageable

L'exploitation des programmes sub-horizontaux proposés à Cachan montre deux spécificités importantes en ce qui concerne l'exploitation des ouvrages et leur entretien :

- l'absence d'une "poubelle" effective permettant aux résidus solides, sédiments et autres matériaux de se déposer dans le puits sans interférer avec les zones productrices du réservoir ;
- un débit d'exploitation important (400 à $450 \text{ m}^3/\text{h}$) transitant dans un drain horizontal de diamètre $8\text{''}1/2$.

L'absence de "poubelle" pour recueillir les solides produits pendant l'exploitation pourrait provoquer des perturbations, tout particulièrement dans le puits d'injection. Les inconvénients de

cette situation directement liée à la structure sub-horizontale du puits est difficile à évaluer à ce stade des connaissances. On peut s'attendre à ce que les sédiments provenant de l'érosion des formations ou les dépôts résiduels de la corrosion des tubages se déposent à la base du tubage ou dans le drain lui-même - augmentant progressivement (ou brutalement en cas d'effondrement) les pertes de charge - et induisant une baisse de la productivité initiale de l'ouvrage.

Si l'on se réfère à la fiche technique n°021 (§5) du guide des bonnes pratiques, le débit maximum théoriquement admissible dans un tubage 10"3/4 est de 475 m³/h. Il est bien évident que ce débit peut être encore augmenté dès lors que l'on accepte des pertes de charge unitaires et des vitesses ascensionnelles plus élevées que celles couramment admises. Cette augmentation va toutefois le plus souvent se traduire par des surcoûts de pompage et par des désordres potentiellement plus importants en exploitation (accélération possible de la détérioration des tubages).

Le débit d'exploitation élevé souhaité sur le site de Cachan (450 m³/h) se situe dans les limites indiquées plus haut. La technique de captage par drain sub-horizontale permet d'atteindre ce débit mais ne réduit en rien les pertes de charge que l'on va rencontrer en tête du drain et dans la colonne d'exhaure. Il y a donc lieu de s'attendre à :

- des vitesses importantes dans l'open-hole de diamètre 8"1/2, particulièrement en tête de drain où le débit atteindra son maximum (soit 3,41 m/s pour un débit de 450 m³/h). On pourra y observer des écoulements fortement turbulents, pouvant s'opposer à une productivité uniforme le long du drain, voire même pouvant déstabiliser les terrains encaissants et conduire à un effondrement du dit drain ;
- des vitesses encore importantes (2,54 m/s), mais acceptables, dans la colonne de production 10"3/4. Les pertes de charge qui en découlent - de l'ordre de 0,21 bars par 100 m de tubage - réduiront nécessairement le débit artésien naturel de l'ouvrage.

D'autre part le débit maximum envisageable peut être fortement contraint par les interférences induites sur les projets voisins. Il ne serait en effet pas acceptable que la plus grande productivité obtenue sur un doublet grâce au drainage impacte trop fortement le fonctionnement des sites géothermiques situés à proximité.

On voit donc que la tenue mécanique des drains à haut débit pendant l'exploitation du doublet est probablement l'élément le plus déterminant et le plus crucial de la faisabilité de cette architecture. Il pourrait se traduire par une forte érosion des parois, voire des effondrements dans les niveaux les plus fragiles. La prochaine mise en exploitation de l'ouvrage devrait apporter des réponses à cette incertitude.

Enfin une difficulté technique (et financière) à attendre au cours de la vie du doublet doit être évoquée : il s'agit de l'entretien des puits. Lorsque des travaux de curage des tubages deviendront nécessaires, il s'agira dans le cas de cette architecture particulière d'une opération extrêmement coûteuse parce qu'exigeant des moyens lourds sans commune mesure avec les opérations similaires régulièrement pratiquées en géothermie

1.5. Longueur du drain

Deux questions peuvent légitimement se poser :

- quel gain peut-on envisager par la réalisation d'un drain horizontal si on le compare à un captage plus classique traversant le Dogger selon une inclinaison standard (35° à 45°) ou plus marquée (60° à 75°) ?

- qu'elle est la longueur maximale efficace du drain qui doit être envisagée pour obtenir un débit donné ?

Le gain de productivité escompté avec un drain horizontal augmente en fonction de sa longueur. D'après GPC-IP (rapport "Etudes APD et PRO1" d'octobre 2015), pour le drain de 1 000 m réalisé à Cachan, on atteindrait théoriquement un gain compris :

- entre 2,25 et 3,85 par rapport à un puits vertical ;
- entre 2 et 3,5 par rapport à un puits dévié à 35-40.

L'augmentation de productivité obtenue avec un drain sera d'autant plus importante que la perméabilité des formations est faible. Cela explique le niveau de gain relativement modeste (entre x2 et x4) attendu à Cachan, par rapport à des facteurs beaucoup plus importants (x10, x20 et plus) régulièrement observés par les pétroliers dans des formations généralement beaucoup moins perméables.

D'autre part, lorsque des débits très importants sont exploités - ce qui est le cas en géothermie - les pertes de charge quadratiques induites par l'écoulement turbulent à l'intérieur du drain vont limiter le bénéfice que celui-ci apporte en termes de productivité. Il y aura donc une longueur de drain à partir de laquelle les pertes de charge induites par son allongement seront supérieures aux gains de productivité que l'on peut en espérer.

La détermination d'une longueur optimale efficace du drain n'est pour l'instant pas abordée dans les documents rendus disponibles par les promoteurs de cette architecture. Le sujet reste à développer.

1.6. Conclusion

Bien que faisant partie d'une technologie aujourd'hui assez bien maîtrisée dans l'industrie pétrolière, la réalisation d'un drain sub-horizontale de 1000 m reste une opération complexe, délicate et comportant des risques miniers non négligeable, en foration comme en exploitation.

Cette nouvelle architecture permet d'augmenter fortement la productivité des puits. Mais dans certains domaines, elle présente des interrogations, des inconvénients et des difficultés (effets à long terme, méthodologie et surcoûts) encore difficiles à analyser à ce stade de l'opération expérimentale de Cachan. On retiendra :

- l'absence d'une "poubelle" pouvant déterminer une perte progressive de productivité ;
- la tenue mécanique du drain soumis à des écoulements turbulents intenses (risque d'effondrement) ;
- une évaluation encore incertaine de la longueur optimale de drainage ;
- des impacts hydrauliques possibles sur les projets voisins ;
- la méthodologie et les surcoûts de réalisation des diagraphies de contrôle réglementaires périodiques ;
- la méthodologie et les surcoûts des travaux d'entretien des puits (curage) et de leur éventuelle réhabilitation.

2. LE CONCEPT DE PUIITS ANTI-CORROSION

Le concept de puits anti-corrosion, tel que proposé par GPC-IP, associe une colonne de production en matériau composite suspendue à l'intérieur d'un tubage de soutènement en acier avec, entre les deux colonnes, un annulaire libre rempli par un fluide passivant. Il a été mis en

œuvre pour la première fois en 1995 à Melun l'Almont (puits PM4). Le nouveau puits de production réalisé sur le site de Bonneuil-sur-Marne (GBL-4) est basé sur le même concept.

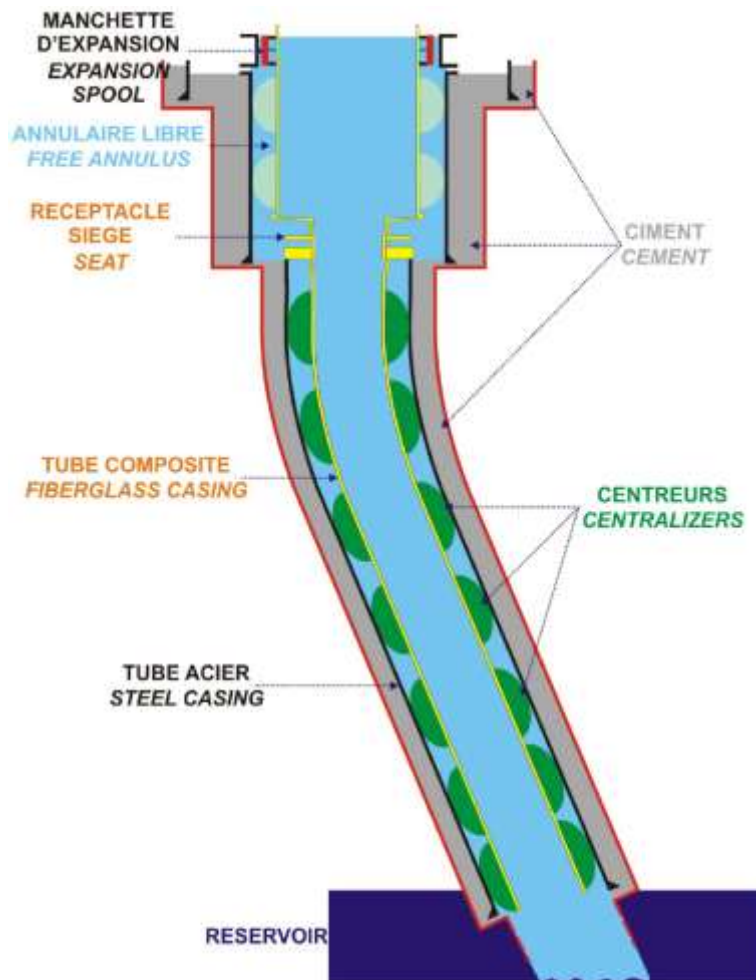


Figure 5. Schéma conceptuel du puits anti-corrosion (source GPC-IP)

Cette architecture est spécifiquement envisagée dans le but premier de pérenniser l'exploitation d'un ouvrage :

- le fluide géothermal produit n'est plus directement en contact avec un matériau sensible à la corrosion ;
- la colonne de complétion en matériaux composites est amovible. Elle peut éventuellement être facilement remplacée. Toutefois le caractère a priori "inaltérable" du matériau composite constituant cette colonne rend en principe cet avantage sans objet ;
- l'annulaire libre entre l'acier et le matériau composite est rempli d'un produit inhibiteur (ou passivant) protégeant l'intérieur du tubage de soutènement en acier ;
- ce même annulaire peut servir à l'injection en fond de puits de produits anticorrosion en remplacement des tubings de traitement de fond de puits ;
- les coûts de maintenance sont - sous réserve d'une réalisation parfaitement conforme - nettement inférieurs à ceux d'un ouvrage conventionnel.

L'analyse des programmes de forage proposés sur la base de ce concept anti-corrosion confirme ces différents avantages. Elle met également en évidence quelques points spécifiques et certaines contraintes que l'on abordera ci-après.

2.1 Conformité réglementaire

Dans les forages géothermiques du Bassin Parisien, les contraintes réglementaires imposent la présence d'un double tubage au droit des aquifères stratégiques de l'Albien et du Néocomien. En ce qui concerne l'architecture particulière proposée pour le puits anti-corrosion, dans l'absolu ce double tubage existe avec la présence simultanée d'un tubage acier 13"3/8 et d'une colonne en matériaux composites 9"5/8.

Toutefois, contrairement aux architectures classiques, l'annulaire entre les deux tubages n'est pas cimenté mais rempli par un fluide passivant (ou un inhibiteur) et se trouve en connexion hydraulique directe avec le réservoir du Dogger. Dans l'hypothèse où une détérioration du tubage de soutènement 13"3/8 permettrait une fuite au travers de ce tubage, c'est d'abord le volume de produit passivant placé dans l'annulaire, suivi directement par le fluide géothermal qui serait alors injecté librement dans les formations.

A contrario, grâce à cette architecture novatrice, la protection des colonnes est mieux assurée : la colonne en fibre de verre est réputée insensible aux agressions des eaux géothermales et l'annulaire entre acier et matériau composite est protégé par le produit passivant. Seul l'extrados du tubage 13"3/8 peut véritablement subir les effets de la corrosion. Il apparaît donc primordial que la cimentation réalisée à l'extrados du dit tubage soit d'excellente qualité pour assurer une protection efficace du puits.

Sous toute réserve d'une opinion de la DRIEAT qui pourrait être différente, on peut considérer que le concept de puits anticorrosion respecte suffisamment la contrainte réglementaire du double tubage, **avec toutefois comme réserve** l'obtention - sur le tubage de soutènement 13"3/8 - d'une cimentation de très bonne qualité, principalement en face des aquifères à protéger et avec un débordement de 50 m au mur et au toit des dits aquifères.

Un tel résultat peut toutefois se montrer difficile à atteindre dans ce schéma architectural particulier. Il faut en effet prendre en compte :

- une déviation souvent importante (>30°), réalisée en une seule phase et en très gros diamètre (17"1/2). D'autre part, les formations fragiles de l'Albien et du Néocomien seront le plus souvent traversés pendant la phase de prise d'angle ou, du moins, avec des inclinaisons importantes ;
- l'utilisation de laitiers allégés ou super-allégés (densité 1,30-1,20) dont la mise en œuvre est délicate. Ou - lorsqu'on utilise la solution alternative de la cimentation étagée - les dysfonctionnements fréquemment rencontrés de mise en œuvre des DV de gros diamètre en puits dévié ;
- la difficulté technique d'obtenir un centrage véritablement efficace sur un tubage en acier de gros diamètre et de poids important (2 000 m de tubage 13"3/8), tout particulièrement dans la zone de prise d'angle. Ces difficultés seront très largement supérieures à celles déjà régulièrement observées pour centrer les tubages 9"5/8 dans les programmes standards.

Dans l'hypothèse où le résultat de la cimentation - évalué par les logs soniques et ultrasoniques selon les critères de la fiche technique n°044 - serait jugé insuffisant pour garantir la protection

de l'extrados du tubage de soutènement 13"3/8 et la protection des aquifères sensibles, il sera nécessaire de réaliser des contrôles périodiques de ce tubage (3-5 ans). L'objectif de ces contrôles sera de s'assurer de l'absence de défaut mécanique (perte d'épaisseur avec risque d'écrasement) ou hydraulique (fuite potentielle avec risque de pollution) pouvant influencer sur la sécurité du puits et de son environnement.

Le traçage à l'eau douce, qui est le seul contrôle actuellement proposé, ne donne aucune information sur l'état de détérioration de l'extrados du tubage. Seule une perforation - et seulement si elle est suffisamment fuyarde - pourra être détectée par cette méthode. Des contrôles complémentaires de l'extrados du tubage 13"3/8 (USIT-CE ou similaire) devront donc être proposés dans le cas d'une cimentation jugée insuffisante pour garantir la protection externe du tubage. Ce contrôle complémentaire impliquera nécessairement le retrait provisoire de la colonne 9"5/8 en composite.

2.2 Détérioration des colonnes en matériaux composites

Il est indiqué dans les programmes proposés que l'intégrité des matériaux composites peut être fragilisée par les effets mécaniques d'une torsion ou d'une flexion trop importante. On peut donc considérer que les valeurs du gradient de prise d'angle (GBU) et des variations de trajectoire (DLS) dans le puits peuvent avoir un effet déstructurant sur la texture du composite et sur son vieillissement. Partant de là, il faut comprendre :

- qu'il s'agit d'un critère important à prendre en compte dans le choix des paramètres d'une trajectoire qui devra être adaptée à la mise en place de la colonne composite. Elle pourra dans certains cas se révéler contraignante ;
- qu'il s'agit également de s'assurer que les variations observées sur la trajectoire réelle du puits (DLS mesurés) sont compatibles avec les limites de torsion et de flexion du matériau. Une trajectoire lisse et peu perturbée devient dans ce cas un critère nécessaire ;
- que c'est aussi reconnaître - contrairement à ce qui est implicitement exprimé dans le concept architectural - que la structure fibreuse et multicouche d'une colonne en matériaux composites peut très bien se dégrader dans un forage lorsqu'elle subit (ou a précédemment subi) certaines contraintes mécaniques.

A partir de ce constat, il faut s'interroger sur la pertinence du caractère totalement "inaltérable" mis en avant dans le concept de puits anticorrosion. Le matériau peut vieillir, de façon naturelle, à la suite de contraintes physiques, des processus de fabrication ou des conditions hasardeuses des transports, des manutentions, des stockages ou des opérations de vissage. Il est bien évident que ce vieillissement n'est en rien similaire à la détérioration des tubages en acier : il peut en particulier être très restreint ou localisé en un point singulier, voir même ne concerner qu'un seul et unique tube sur la totalité d'une colonne. Il conviendrait également de proposer des moyens permettant de mieux évaluer les conditions de ce vieillissement, d'en détecter la présence et d'en observer l'évolution.

On notera qu'aucune information n'est disponible concernant le plan de centrage de la colonne composite : l'espacement, le type et les caractéristiques des centreurs sont inconnus. L'annulaire étant rempli d'un produit passivant, ce matériel n'est théoriquement pas exposé aux effets de la corrosion.

Aucune information n'est également disponible sur d'éventuels effets à très long terme sur le composite des produits passivants ou anti-corrosion injectés dans l'annulaire.

Enfin une dernière inconnue correspond à la possible usure - également à long terme - du composite par les inévitables mouvements de la colonne suspendue : dilatation, variations de température, variations de pression.

2.3 Etanchéité de l'annulaire libre

L'annulaire laissé libre entre le tubage de soutènement en acier et la colonne en matériau composite est une spécificité fort intéressante du concept de puits anticorrosion. Il permet de remplacer le tube de traitement de fond, donne un accès hydraulique direct au réservoir, protège l'intrados de la colonne de soutènement, et rend possible en cas de besoin le retrait de la colonne de production.

Le corollaire est qu'il doit être **parfaitement étanche** pour assurer correctement ces fonctions.

Il semble donc particulièrement important que, en fin de travaux, l'étanchéité de cet annulaire soit certifiée. Le test devra être réalisé de façon à ce que cette étanchéité soit garantie dans les conditions d'exploitation, en incluant une marge de sécurité adaptée.

La présence d'une (ou possiblement deux) DV sur le tubage 13"3/8 apparaît également comme un point sensible pour l'étanchéité à long terme de la colonne. Une DV constitue un point métallurgique singulier pouvant faire l'objet d'une corrosion privilégiée. Elle peut devenir une zone de fuite potentielle à long terme.

Dans le cas où une anomalie d'étanchéité est observée, elle devra être corrigée avant la mise en exploitation de l'ouvrage. La correction pourra correspondre à une cimentation complémentaire de la zone concernée (squeeze) ou/et à la mise en place d'un obturateur annulaire mécanique. L'étanchéité devra être ensuite à nouveau vérifiée et certifiée.

2.4 Pérennité d'un puits anticorrosion

Le concept de puits anticorrosion offre théoriquement une durée de vie supérieure à celle des ouvrages conventionnels. Il faut néanmoins émettre quelques réserves. On a vu plus haut que plusieurs facteurs déterminent la réussite à long terme du concept :

- la qualité nécessaire de la cimentation du tubage de soutènement 13"3/8 ;
- l'étanchéité certifiée de l'annulaire libre entre acier et matériaux composites ;
- le possible vieillissement des colonnes en fibre de verre, en particulier à la suite de contraintes mécaniques trop importantes.

D'autre part il faut bien remarquer qu'il n'y a pas de données factuelles de référence disponibles sur les puits similaires à part quelques observations visuelles très ponctuelles et le constat d'une exploitation sans incident. Sur ces mêmes bases, beaucoup d'exploitations conventionnelles pourraient être jugées "sans problème". Dans le cas des matériaux composites, l'absence de mesures de contrôle pourrait facilement dissimuler un vieillissement localisé ou ponctuel, sans incidence visible sur l'exploitation mais pouvant déterminer un impact environnemental marqué.

Malgré cette absence de données et d'informations, on peut néanmoins considérer « sur le principe », que le concept architectural anticorrosion donne un net avantage aux matériaux composites en termes de durée de vie, même s'il laisse pour l'instant de nombreuses questions sans réponse.

Il faut également s'interroger sur la pertinence de disposer d'un seul puits en architecture anticorrosion dans un doublet (ce qui est le cas sur le site de Bonneuil-sur-Marne). Avec un seul puits protégé, la durée de vie du doublet ne va pas en effet s'en trouver fondamentalement rallongée.

2.5 Conclusions

Dans l'absolu, le concept de puits anticorrosion apporte potentiellement de nombreux avantages par rapport aux ouvrages conventionnels. Il reste toutefois de nombreuses interrogations sans réponse, tant sur le plan administratif (réponse aux contraintes réglementaires, contrôles périodiques) que sur le plan technique (étanchéité, vieillissement et pérennité du composite, risques d'endommagement).

Les trois points les plus sensibles de l'architecture proposée sont la présence (éventuelle) d'une DV, la qualité de la cimentation du tubage de soutènement 13"3/8 et la garantie de l'étanchéité de l'annulaire libre entre acier et matériau composite. Le succès des travaux va principalement dépendre du résultat de ces opérations. Les risques miniers de ce type d'ouvrage sont donc loin d'être négligeables.

Le concept reste, aujourd'hui encore, novateur malgré une première mise en œuvre à Melun l'Almont en 1995. Il serait utile que le ou les puits répondant à ce concept fassent l'objet de contrôles et de mesures apportant les informations nécessaires à une évaluation des avantages et des inconvénients de cette nouvelle architecture. C'est à partir de ce retour d'expérience que le concept pourra démontrer toutes ses qualités et ne pas rester seulement une opération novatrice trop rarement mise en œuvre.

3. LE SUR-DIAMETRAGE DES COLONNES

Les besoins énergétiques de plus en plus importants requis par les projets géothermiques et le peu d'espace disponible pour réaliser de nouveaux doublets conduisent les opérateurs à vouloir exploiter les forages à des débits toujours plus élevés. La solution la plus basique permettant de répondre à ce besoin, tout en conservant les pertes de charge dans des limites acceptables, est d'augmenter le diamètre des colonnes de production. Cette approche implique une refonte générale des diamètres de construction des forages, tout en permettant d'en conserver les grandes lignes architecturales : déviation en "J", chambre de pompage, double tubage de protection.

	Ancien standard	Standard actuel	Sur-diamétrage
Débit d'exploitation potentiel	150/180 m ³ /h	300/340 m ³ /h	350/450 m ³ /h
Chambre de pompage	13"3/8	13"3/8	16"
Colonne de production	7"	9"5/8	11"3/4
Phase réservoir	6"	8"1/2	10"5/8

3.1 Les avantages

Les principaux avantages que l'on peut trouver à une augmentation du diamètre des colonnes de production sont de trois ordres :

- une augmentation du débit d'exploitation potentiel de l'ouvrage. Si on remplace, par exemple, une colonne de production 9"5/8 (standard actuel) par une colonne de production 11"3/4, il devient possible d'envisager une augmentation de débit de l'ordre de 100 à 150 m³/h. Pour évaluer le débit maximal admissible pour un tubage, on se référera à la fiche technique n°21 « Architecture des puits » du guide des bonnes pratiques ;
- à débit d'exploitation égal, une réduction des pertes de charge. Cette diminution des pertes de charge a nécessairement une influence positive sur les coûts de pompage ;
- un rechemisage ultérieur possible en plus gros diamètre. La durée de vie de l'exploitation peut s'en trouver plus facilement prolongée.

3.2 Les inconvénients

Un surcoût financier est inévitablement engendré par l'augmentation des diamètres. Il est le principal inconvénient d'une option de sur-diamétrage. Il faut également noter l'apparition de quelques difficultés techniques supplémentaires déroulant de l'architecture des puits.

- les surcoûts sont principalement fonctions de l'augmentation souhaitée en diamètre. Ils peuvent rapidement devenir sensibles puisque la quasi totalité des différents postes va être impliquée : matériel et outils de forage, tubages, volumes de boue à fabriquer et à traiter, quantité de ciment. De surcroît, lorsque la puissance de la machine de forage elle-même doit être revue à la hausse, l'impact pourra être encore plus significatif en impliquant les postes liés à la machine de forage : amenée et repli du matériel, tarif journalier de fonctionnement, fuel, et même plateforme ;
- en ce qui concerne la réalisation des déviations, le sur-diamétrage peut entraîner des difficultés à obtenir des gradients de prise d'angle (GBU) élevés. Dans les formations du Bassin Parisien où la déviation est habituellement initiée au début de la phase 17"1/2, il semble difficile de programmer des gradients supérieurs à 0,8°/10 m qui puissent être réalisés sans provoquer de fortes perturbations de trajectoire. Une augmentation de diamètre ne pourra qu'accroître cette difficulté ;
- la qualité du centrage des tubages - en particulier dans la zone de prise d'angle - sera également impacté par une augmentation de diamètre. Plus les tubages seront en gros diamètres, plus il sera difficile d'assurer un plan de centrage efficace. La qualité des cimentations peut s'en trouver sérieusement affectée (voir la fiche technique n°034 « Centrage des tubages » du guide des bonnes pratiques) ;
- les DV (Diverting Valve) utilisées pour réaliser les cimentations étagées ont une fiabilité qui dépend fortement de leur diamètre. Plus celui-ci est important, plus elles vont être structurellement fragiles et sensibles aux contraintes mécaniques. Le fait d'augmenter le diamètre de ce matériel peut donc être une source d'incidents de fonctionnement supplémentaires. Ces dysfonctionnements provoquent la plupart du temps des cimentations défectueuses avec des conséquences majeures sur la durée de vie des ouvrages et la sécurité de leur environnement ;
- la précision des diagraphies de contrôle des cimentations - et dans une moindre mesure celle des diagraphies de contrôle de l'état des tubages - est influencée par la taille des colonnes investiguées. On peut considérer que les diagraphies soniques ou ultrasoniques de contrôle des cimentations réalisées en puits déviés dans des tubages de diamètre supérieur à 13"3/8 seront souvent difficilement interprétables ou que l'interprétation qui pourra en être faite ne sera pas véritablement représentative de l'état de la cimentation ;
- l'augmentation du débit d'exploitation qu'autorise le sur-diamétrage des colonnes implique une augmentation de l'écartement entre les puits de production et d'injection. Le temps de percée thermique d'un doublet (correspondant généralement à une

baisse de 1°C au bout de 30 ans d'exploitation) est en effet fonction du débit annuel moyen. L'importance de ce facteur - qu'il ne faut pas négliger de prendre en compte en définissant l'architecture d'un doublet - dépendra toutefois principalement des caractéristiques hydrodynamiques du réservoir.

3.3 Les points délicats

L'élaboration d'un programme de forage basé sur des diamètres plus importants que ceux utilisés de façon standard, présente quelques points techniques délicats auxquels il convient de porter une attention particulière :

- lorsque les forages sont réalisés en plus gros diamètre, la qualité des trajectoires est plus délicate à assurer. On a déjà vu que le choix du gradient de prise d'angle est limité par le diamètre de la phase correspondante. La géométrie du trou foré sera également influencée par le diamètre de forage et les contraintes mécaniques du train de tiges. Le fait de proposer une nette augmentation de diamètre impliquera donc de paramétrer des déviations adaptées à ces nouvelles conditions ;
- lorsqu'un sur-diamétrage est envisagé, il est très tentant de limiter les diamètres des premières phases de forage en programmant des annulaires restreints. Par exemple, il pourrait être envisagé de poser un tubage 16" (au lieu d'un tubage 13"3/8) dans un forage en 17"1/2, ce qui est techniquement envisageable. Mais compte tenu des nombreux inconvénients que représente un annulaire restreint, cette pratique est à proscrire dans le cas des forages géothermiques. On se référera en la matière à la fiche n°22 « Annulaires restreints » du guide des bonnes pratiques ;
- un autre point délicat est d'assurer le centrage des colonnes. Plus celles-ci sont en gros diamètre, plus il devient difficile d'assurer un plan de centrage efficace. Dans certain cas, le nombre de centreurs qu'il faudrait mettre en place peut excéder les possibilités techniques d'installation de ce matériel (nombre excessif de centreurs par tube) ou empêcher la descente du tubage dans le forage (forces de frottement induites par les centreurs supérieures au poids apparent du tubage).

3.4 Conclusions

Lorsque des débits importants (plus de 300-340 m³/h) sont souhaités, le choix architectural d'une augmentation du diamètre des colonnes de production peut s'avérer comme une solution efficace pour y répondre. Ce choix implique nécessairement des coûts supplémentaires dont l'importance doit être précisément évaluée et comparée - chaque projet ayant des caractéristiques d'exploitation spécifiques - aux coûts d'une architecture basée sur des diamètres plus conventionnels.

Outre les coûts de construction, il convient de porter également une attention particulière aux implications que peut avoir ce choix sur les opérations de forage. Il faut vérifier en particulier la compatibilité du programme de déviation et des plans de centrage et prendre en compte le surcroît de risque engendré par l'usage éventuel des DV.

Enfin il faut impérativement éviter toute programmation d'annulaires de type restreint. Il s'agit d'une tentation majeure - tout particulièrement dans ce cas architectural - dont la pratique doit être absolument proscrite.

Annexe 3

Tubages



Décembre 2015

FICHE TECHNIQUE 033

UTILISATION DES TUBAGES EN MATERIAU COMPOSITE (MC) EN GEOTHERMIE PROFONDE

La totalité des doublets géothermiques en fonctionnement existants dans le Bassin parisien - excepté celui de Melun-l'Almont - sont équipés de tubages en acier au carbone. Ces tubages présentent l'inconvénient d'être sensibles au fluide géothermal. Ils se dégradent à son contact plus ou moins rapidement par des mécanismes de corrosion/dépôt, ce qui engendre des coûts de maintenance importants et surtout limite la durée de vie des ouvrages.

Dans deux projets récents (Chevilly-Larue, L'Hay-les-Roses), il a été installé des colonnes de rechemisage en fibre de verre. Des opérations similaires ou des projets de puits neufs réalisés en matériaux composites sont également à l'étude.

Cette note a pour objectif de faire le point sur les avantages, inconvénients et contraintes que pose l'usage de ce type de matériau.

1. Les expériences en géothermie

Quatre expériences concernant l'exploitation du Dogger sont répertoriées dans le Bassin parisien :

- Villeneuve-La-Garenne (1976) : il s'agit d'un doublet réalisé avec une chambre de pompage en acier et des tubages de production et d'injection 7" en fibre de verre. L'exploitation a été abandonnée pour des raisons économiques et les puits ont été rebouchés. Il n'y a pas ou très peu d'informations concernant l'utilisation de la fibre de verre, sinon l'observation de quelques traces de fibres recueillies dans les filtres de surface ;
- La Courneuve-Sud (1992) : un rechemisage partiel (de 338 m à 510 m de profondeur) a été réalisé sur la chambre de pompage du puits de production GCL-1 au moyen de tubes en matériaux composites de diamètre 9"5/8. Au bout de 13 ans d'utilisation, ce liner a été remonté pour partie en surface et détruit par reforage pour le reste. Les observations sur les tubes remontés font état d'un matériau intact, "à l'état neuf" (voir photo ci-après) ;



- Melun-L'Almont (1995) : il s'agit d'un projet innovant conçu et réalisé en 1995 par GPC-IP, dans le but de s'affranchir des problèmes de corrosion. Le puits de production PM-4, ne comportant pas de chambre de pompage, a été équipé d'une colonne amovible 9"5/8 en fibre de verre librement suspendue à l'intérieur d'un tubage technique 13"3/8 en acier placé au toit du réservoir. Ce puits est en exploitation continue, qui plus est en artésien (condition qui favorise la formation de dépôt), depuis 1995. Il y a peu de retour détaillé d'expérience sinon l'assurance d'un fonctionnement nominal sans intervention lourde, depuis une vingtaine d'années. Lors d'un changement de vanne maîtresse début 2014, l'exploitant a pu observer visuellement l'absence de dépôts au niveau du tubage de surface ;

Nota : en l'absence de toute mesure de contrôle, le retour d'expérience de l'exploitant du site ne permet pas de se faire une idée précise de l'état du puits. Il n'existe aucune information sur l'évolution de la fibre en profondeur, ni sur celui du tubage 13"3/8 en acier protégeant la colonne en fibre. Au bout de 20 ans d'exploitation, le même constat pourrait être établi pour la plupart des puits en acier si on les avait exploités en s'affranchissant de tout contrôle périodique. On ne pourra donc conclure sur la pertinence du concept qu'après un diagnostic approfondi du puits, incluant l'état de la colonne 13"3/8.

- Villeneuve-La-Garenne (1976) : il s'agit d'un doublet réalisé avec une chambre de pompage en acier et des tubages de production et d'injection 7" en fibre de verre. L'exploitation a été abandonnée pour des raisons économiques et les puits ont été rebouchés. Il n'y a pas ou très peu d'informations concernant l'utilisation de la fibre de verre, sinon l'observation de quelques traces de fibres recueillies dans les filtres de surface ;
- Chevilly-Larue, L'Hay-les-Roses (2015) : sur ces deux doublets, il a été réalisé une opération de rechemisage de puits anciens avec un liner 7" en matériau composite. Outre la mise en œuvre du tubage lui-même, les innovations majeures concernent la cimentation des annulaires composite-acier et le reforage du ciment et du matériel de cimentation. Le DOE des travaux n'est pas encore disponible. L'opération apparaît comme un succès, bien que des interrogations subsistent sur certains points particuliers. On peut citer :

- la pertinence de l'évaluation de la qualité des cimentations avec les outils de contrôle disponibles. La présence de ciment peut être observée mais il est très difficile de déterminer la qualité de l'adhérence (bonding) ;
- des endommagements inévitables du surfacage interne (coating) pendant les opérations de reforage du ciment. Ils sont particulièrement sensibles dans la partie incurvée des puits. Les conséquences à long terme de ces endommagements ne sont pas encore accessibles ;
- les moyens disponibles pour contrôler l'évolution de l'état des tubages dans le temps. Il n'existe actuellement que très peu d'outils d'analyse permettant de vérifier l'intégrité du matériau et son évolution en cours d'exploitation.

Le retour d'expérience sur les matériaux insensibles à la corrosion comme la fibre de verre des conduites de surface, le revêtement des tubes HAGUSTA ou des lignes d'inhibition en fond de puits (TCTFP ou TAI) permet de constater, d'une part, une absence majeure d'incrustation de sulfure de fer à la surface de ces matériaux et, d'autre part, une faible modification des propriétés mécaniques après une longue exposition dans le fluide géothermal. On remarque, uniquement dans certains cas, une fine pellicule de dépôts qui n'impacte que faiblement les caractéristiques hydrauliques de ces matériaux.

Il est dit également que l'usage des tubages en fibre de verre permettrait d'éliminer le risque de blocage des lignes de traitement, en fond de puits, dans les tubages en acier. En effet, en particulier sur les opérations exploitées par artésianisme, les incrustations à la surface des parois des tubages acier empêchent la remontée des lignes de traitement (augmentation de la rugosité entre la paroi du tubage et le revêtement de la ligne d'inhibition qui augmente considérablement la force de traction dans les puits notamment fortement déviés). Cette impossibilité de manœuvrer les TCTFP ou les TAI implique l'utilisation coûteuse d'un appareil de forage pour repêcher les lignes de traitement. Cet argument est toutefois sans grande valeur puisque l'usage de colonnes en fibre de verre est censé supprimer le besoin de traitement et donc, la mise en place de ces tubes.

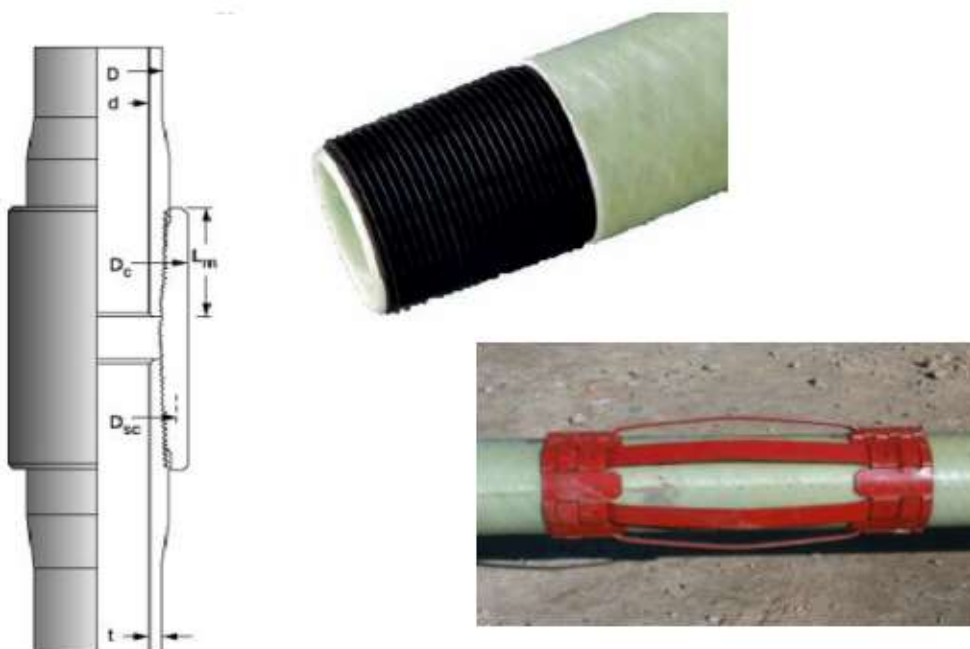
Un autre avantage de la fibre résiderait dans le fait qu'en cas de mauvaise cimentation de l'extrados du tubage, le risque de perforation au droit des zones aquifères (comme l'Albo-Aptien et le Lusitanien notamment) est inexistant. Avec l'acier il a en effet été constaté des perforations complètes du tubage acier en seulement 10 ans en face des zones aquifères non (ou mal) cimentées.

2. Le matériau

Dans le domaine pétrolier, les normes applicables en matière de tubages (casing) en fibre de verre sont définies par la norme DIN ISO 9001 et par les normes de l'API Q1, API 15 LR & API 15 HR. Les surfaces extérieures des tubes peuvent éventuellement être traitées pour permettre une meilleure adhérence (bonding) du ciment.

Les manchons peuvent être de fabrication spécifique mais répondent le plus souvent aux normes de l'API-5B avec des filetages 8 RD LTC. Il est parfois ajouté des joints d'étanchéité (o-ring) ou un revêtement en téflon (vissage, dévissage éventuel, étanchéité).

Le matériau constitutif est de la fibre de verre liée par une résine comportant des produits de charge. Les tubages en fibre de verre sont généralement conçus en longueur de 9 m, capables de résister à une température de 107°C et peuvent être installés jusqu'à 3 000 m de profondeur.



Tubes en fibre de verre, filetage et centreur

3. Résistance à la corrosion

Dans l'absolu, les tubages en matériaux composites (mélange fibre de verre + liant résine + charge) présentent l'énorme avantage d'être quasiment insensibles à la corrosion. Néanmoins, à la suite de défauts de fabrication ou d'endommagements de leur structure ou de leur revêtement de surface (coating), les composites peuvent potentiellement réagir à certaines attaques chimiques, devenir poreux et/ou perdre leur cohésion (bullage, désolidarisation de la fibre et du liant par hydrolyse). Une blessure du revêtement peut entraîner une détérioration de la structure composite, avec des conséquences directes sur la résistance mécanique de la colonne et sa durée de vie. A ce jour les références à travers le monde ne permettent pas toutefois d'identifier de problème particulier à ce niveau. Mais il est vrai qu'aucun retour d'expérience n'est véritablement disponible.

4. Aspects mécaniques

Structurellement, les tubages en fibre de verre sont beaucoup moins résistants mécaniquement que les tubages en acier, ce qui impose des épaisseurs de matière plus importantes et des manchons surdimensionnés. Il en résulte, à diamètre intérieur équivalent, un encombrement général nettement supérieur. Toutefois, il n'est peut-être pas nécessaire d'atteindre des résistances mécaniques similaires aux tubages en acier habituellement mis en place. Ceux-ci sont en effet volontairement surdimensionnés notamment pour pallier aux problématiques de corrosion.

Ce matériau est sensible aux agressions mécaniques : poinçonnages, rayures, frottements, battements. Dans le cas de puits déviés où les contraintes mécaniques sont plus marquées, ce phénomène sera encore plus sensible. Par exemple, la réalisation d'une opération classique de diagraphies dans un puits incliné pourra endommager une colonne composite par frottement du câble de logging le long de la génératrice de cette colonne (effet de sciage par le câble sous tension). Il y a donc lieu de prévoir des moyens et des précautions spécifiques pour limiter les détériorations lors de l'utilisation de la plupart des outils descendus dans les forages (tricônes, stabilisateurs, train de tiges, câbles de mesure ...).

Toutefois des progrès importants sont en cours, limitant certains inconvénients :

- amélioration des modes de raccordement (filetage ou collage, qualité des joints) ;
- réduction des encombrements des manchons ;
- augmentation des diamètres disponibles (13"3/8 et plus) ;
- amélioration de la résistance mécanique des surfaçages (coating).

5. Vieillessement

Il faut bien constater, à ce jour, la quasi-absence de données sur le vieillissement des tubages en composite dans les forages. Il faut aussi constater l'absence de moyens de contrôle efficaces et d'outils permettant le suivi de l'intégrité de ce type de colonne. On ne sait aujourd'hui suivre l'évolution de la structure des tubages composites installés dans un forage qu'en observant l'éventuelle présence de fibres dans les filtres installés sur le réseau de surface. Et ces observations purement informelles ne permettent de déterminer ni le niveau impacté, ni l'importance de la détérioration.

Il reste toutefois possible de contrôler l'étanchéité des ouvrages par de tests en pression ou par des techniques de type traçage à l'eau douce.

6. Contraintes d'installation

Les principaux éléments à prendre en compte lorsque l'on envisage la mise en place d'un tubage en fibre de verre à grande profondeur sont les suivants :

- résistance mécanique : les tubes devront résister aux contraintes hydro-mécaniques attendues dans le forage (poids, pression d'écrasement, pression d'éclatement), mais sans nécessairement avoir l'obligation de répondre aux recommandations de l'API (American Petroleum Institute) et de l'IADC (International Association of Drilling Contractors) ;

- joints de tubage : le type de raccords, le type de filetage, les éventuels joints complémentaires d'étanchéité, les graisses de vissage, la résistance mécanique (écrasement, arrachage) des tubes et raccords en matériaux composites varient en fonction des fournisseurs. De la même manière que pour le corps des tubes, on s'attachera à s'assurer que les recommandations de l'API et de l'IADC soient respectées. L'étanchéité des joints entre tubages, au moment de la mise en place et dans le temps, devra être strictement assurée. Si des éléments d'étanchéité complémentaires sont utilisés (par exemple, des joints toriques sur épaulement ou en butée), on s'assurera que les matériaux utilisés pour ces joints pourront eux aussi résister aux conditions d'exploitation (pression, température, chimie des eaux) et au vieillissement. Les procédures de vissage des tubes devront assurer une connexion fiable, au couple déterminé par le constructeur, sans détérioration du corps du tube, du filetage et de l'étanchéité des joints ;
- fabrication : la qualité et l'homogénéité de la fabrication des tubes doivent impérativement être assurées. Les tolérances de dimensionnement (diamètre intérieur, diamètre extérieur, épaisseur) doivent être respectées, tout autant que la résistance mécanique. La résine et la fibre doivent être parfaitement liées et homogènes. Une simple bulle d'air ou de gaz résiduelle peut en effet être soumise à des pressions telles en fond de puits (170 à 180 bar) qu'elle pourrait littéralement faire « exploser » la structure de la fibre dans la section de tubage concernée. Malheureusement, les outils permettant de vérifier la qualité de fabrication sont aujourd'hui insuffisants pour permettre autre chose que des contrôles de dimensionnement. D'autre part, les tubes en composite sont le plus souvent fabriqués, pour des raisons pratiques, en longueurs n'excédant pas 9 mètres. Cela impose des manutentions beaucoup plus longues (20 à 30%) que pour les tubes en acier dont la longueur standard est le plus souvent comprise entre 11 et 13 m ;
- procédures de mise en place : la faible densité des matériaux composites (1,95 au lieu de 7,85) pose le problème de flottaison lors de la descente de ce type de tubage. Les colonnes doivent être maintenues (chaînage de retenue) pour éviter la forte poussée verticale causée par l'augmentation de la pression différentielle au moment de l'injection du ciment ;
- les moyens, les précautions et les procédures spécifiques à mettre en œuvre pour permettre une descente et une mise en place correcte de la colonne impliquent obligatoirement des durées d'intervention légèrement plus importantes (30 à 50%). L'utilisation de procédure et d'outils de serrage adaptés est impérative pour éviter l'endommagement des tubes pendant les opérations de vissage.

7. Cimentation des colonnes

Les opérations de cimentation vont induire des difficultés particulières compte tenu du matériau composite :

- difficulté à réaliser certaines phases de cimentations. Les opérations de reforage du ciment, des bouchons et du matériel de cimentation vont s'avérer particulièrement difficiles : le ciment et le matériel résiduel peuvent en effet offrir une résistance mécanique égale ou supérieure au matériau composite. Le risque de reforer préférentiellement la colonne elle-même devient alors bien réel. Des précautions particulières sur le dimensionnement des garnitures et sur les paramètres de forage permettent de limiter ce risque ;
- difficulté à obtenir une bonne adhérence du ciment (bonding) sur l'extrados de ce type de matériau. Des études récentes semblent toutefois démontrer que l'adhérence serait

acceptable sans traitement spécifique pour certains produits disponibles sur le marché actuel ;

- difficulté à réaliser un contrôle fiable de la qualité de la cimentation. Ces mesures sont déjà difficiles à interpréter sur un tubage acier. Elles le deviennent encore plus sur un tubage composite.

8. Contraintes d'interventions après mise en place

Il faut malheureusement constater que les contraintes attendues lors des opérations postérieures à la mise en place des tubages (reforage du ciment, forage du réservoir, diagraphies de contrôle, travaux d'exploitation, travaux d'entretien) sont pour la plupart incompatibles avec l'usage des matériaux composites. Il est possible de mettre des protections sur la garniture de forage et d'utiliser des moteurs de fond. Cette procédure laisse toutefois un niveau de risque résiduel non négligeable, en particulier pour les opérations de reforage du ciment et de forage du réservoir. En puits déviés, la difficulté d'assurer la conservation de l'intégrité du surfaçage interne (coating) est accrue. L'utilisation de moyens spécifiques associée à une optimisation de la composition et de l'épaisseur de la couche de protection interne pourrait limiter son endommagement à un niveau acceptable pour garantir l'intégrité des tubes dans le temps.

Sur les puits de Chevilly-Larue et de L'Hay-les-Roses, on a pu constater une perte de matière atteignant localement 2 mm dans la zone de prise d'angle. La protection interne (coating) de cette zone est probablement détruite.

Les conséquences à long terme de ces détériorations sont encore inconnues. Les références à travers le monde ne permettent pas d'identifier de problème, à ce niveau. Les fabricants de tubes soutiennent qu'un endommagement de la surface interne des tubages n'affecterait pas les propriétés mécaniques des tubes. Ce n'est pas encore démontré.

9. Cas des tubages amovibles

Pour éviter certains des inconvénients mentionnés ci-dessus, il pourrait être envisagé d'utiliser des tubages en composite lorsque ceux-ci peuvent être rendus amovibles. Ce pourrait être le cas de certains tubings de recouvrement (colonne suspendue de Melun l'Almont) ou de rechemisage, ainsi que pour des complétions ou des colonnes de pompage.

Dans le cas d'une colonne amovible, il reste en effet possible de ressortir la colonne préalablement aux interventions et d'éviter les risques de détérioration induits par les outils. Cela implique de retirer le tubage avant l'intervention, puis de le remettre en place une fois celle-ci exécutée.

Outre les contraintes qu'impose l'usage des tubages amovibles, les inconvénients de cette solution sont encore importants :

- temps (et donc coût) augmenté à chaque intervention pour extraire et remettre en place la colonne.
- risque de détérioration du surfaçage des tubes pendant les manœuvres et les manutentions.
- fort risque de détérioration des filetages au dévissage et au vissage (tout particulièrement au dévissage).
- nécessité de protéger l'annulaire par un fluide passivant.

10. Développement des procédures et des moyens

Les procédures et les moyens actuellement utilisés lors de la mise en œuvre des tubages en composites doivent être améliorés et développés. De nombreux points restent actuellement insuffisants ou insatisfaisants. On note, en particulier, les besoins suivants :

- préciser les moyens à mettre en œuvre pour assurer la meilleure adhérence possible du ciment sur la fibre de verre : traitement de surface des tubes, utilisation d'adjuvants spécifiques dans les laitiers, ou toute autre solution améliorant le contact entre le ciment et la fibre ;
- déterminer les risques pour l'intégrité de la colonne induits par les interventions à l'intérieur des puits (diagraphies, manœuvre des trains de tiges, reforage du matériel de cimentation, contrôle du réservoir), particulièrement en puits déviés ;
- préciser les moyens et procédures de protection de la colonne en matériau composite qui devront être strictement appliqués pendant les périodes de reforage et de manœuvre de matériel à l'intérieur de cette colonne afin de limiter les risques d'endommagement ;
- déterminer clairement les modalités, les résultats et les incertitudes que l'on peut attendre de l'interprétation des diagraphies de contrôle des cimentations effectuées sur des matériaux composites ;
- proposer des moyens spécifiques (ou novateurs) adaptés au suivi et au contrôle de la réalisation des cimentations effectuées sur les matériaux composites ;
- définir des moyens de contrôle à mettre en place pendant l'exploitation des ouvrages qui permettraient de suivre l'évolution du vieillissement de la colonne ou d'observer les indices d'une détérioration éventuelle de la structure des tubes en composite. Le développement d'outils ultrasoniques adaptés à mesurer l'évolution de la structure des tubages en composite pourrait être une piste de recherche.

11. Récapitulatif

Les matériaux composites se montrent extrêmement résistants à la corrosion, mais très fragiles vis-à-vis de la plupart des actions de forage, de contrôle et d'entretien des puits. Cela explique en grosse partie le faible développement actuel de ce type de produit dans la construction des forages profonds, que ce soit en géothermie ou dans l'industrie pétrolière. Dans l'attente des retours d'expérience significatifs à venir, l'utilisation des matériaux composites peut toutefois être envisagée dans le cadre de projets innovants, encadrés et financés en conséquence et intégrant le développement d'outils et de procédures adaptés à ce matériau spécifique.

L'utilisation de tubage en matériau composite dans l'architecture des forages géothermiques profonds est une alternative d'avenir tout à fait crédible, nécessitant le développement de procédures de réalisation et de contrôle adaptées.

Résumé des avantages et des inconvénients par rapport aux casings en acier.

	Avantages	Inconvénients	Indéterminé
Résistance corrosion	Très forte, tant que le surfacage est intact	Problèmes potentiels lorsque la structure est atteinte	Pas d'outil de contrôle disponible. Peu de retour d'expérience
Inhibition	Inutile ou restreinte au seul corps de		

	pompe, tête de puits et réseau primaire		
Pertes de charge	Inférieures à diamètre nominal équivalent		
Vieillessement	Durée de vie théoriquement supérieure à l'acier	Très mal connu	Pas d'outil de contrôle d'intégrité
Poids	Faible, manutention aisée	Phénomène de flottation	
Longueur	Petite longueur, manutention aisée	Généralement en longueur de 6 à 9 m au maximum	
Diamètre	Normes de l'API (OD)		Résistance mécanique des très gros diamètres
Résistance écrasement	Normalisée pour puits jusqu'à 3000 m		
Résistance température	Jusqu'à 107°C		
Résistance mécanique	Fraisage facile	Très fragile, détérioration facile	Peu de procédure fiable de surveillance en exploitation
Filetage – vissage	Joints API 8RD LTC	Fragile, mise en œuvre difficile	
Manutention	Léger, transport facile	Fragile	
Mise en place	Idem acier	Temps de manœuvre supérieurs de 30 à 50%	
Centrage	Efficace vu le faible poids	Tolérance manchon	
Cimentation	Idem acier	Pas de DV	
Reforage matériel de cimentation		Opération très délicate, risque de détérioration	Procédures non agressives à déterminer
Accrochage cimentation		Fonction du surfaçage	Amélioration de l'adhérence
Contrôle de cimentation		Interprétation difficile	Pas d'outil spécifique
Logging		Risque de sciage de la fibre en puits dévié Coûts légèrement plus élevés	Peu d'outils disponibles
Intervention dans le tubage		Risque élevé de détérioration de la fibre	Moyens et procédures à déterminer

Coûts d'entretien	Très faible, pas d'intervention lourde		
Coûts d'achat		2,5 fois le prix de l'acier	
Surcoût global		20 à 25%	
Délai de fourniture	Equivalent, voire plus court que l'acier		



Version validée le 24 novembre 2015
Modifiée le 27 septembre 2021

FICHE TECHNIQUE 034

CENTRAGE DES TUBAGES

Le centrage des tubages est un des éléments décisifs qui détermine la qualité des cimentations. D'une bonne cimentation découleront directement la qualité des ouvrages et leur pérennité. Contrairement à la plupart des forages pétroliers, les puits géothermiques utilisent en effet des tubages techniques comme colonnes de production dans lesquelles vont circuler à gros débits des fluides corrosifs. La gaine de ciment mise en place renforce la résistance mécanique, assure l'étanchéité verticale des annulaires et protège l'extrados de ces tubages contre la corrosion. La qualité de cette gaine apparaît donc particulièrement cruciale et va nécessiter la mise en œuvre d'un centrage efficace pour l'obtenir.

Les programmes de centrage des tubages sont le plus fréquemment proposés sans accorder une attention précise aux variations des efforts mécaniques subis par le tubage tout au long de la trajectoire du puits. Il en résulte des annulaires pouvant être localement irréguliers ou fortement excentrés, ce qui induit généralement des effets négatifs pour les cimentations (chenalisation, remplissage incomplet, contamination du laitier). Des attentes de prise de ciment insuffisantes (cf. fiche technique n°042) peuvent également provoquer des défauts d'adhérence de la gaine de ciment (fracturation, micro-annulaire, décollement).

Cette note a pour objectif de rappeler les règles que propose l'industrie pétrolière en matière de centrage des colonnes et de déterminer les recommandations les plus adaptées aux conditions spécifiques de la géothermie

1. Les règles de l'industrie pétrolière

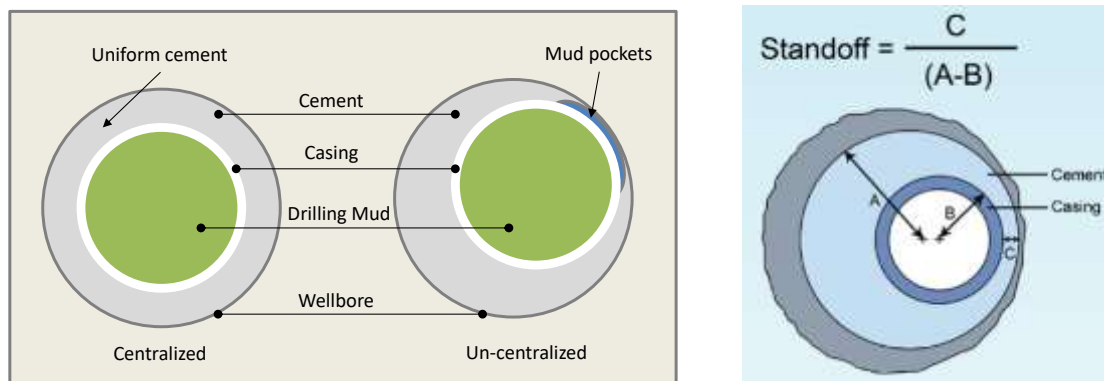
1.1. Phases verticales

Dans les phases verticales des forages (ou dans les puits verticaux), la règle la plus généralement appliquée par les pétroliers est de mettre systématiquement en place un centreur tous les 350 ft, c'est à dire tous les 100 m. On retiendra cette règle comme étant un minimum acceptable. Mais

il conviendra de moduler cet écartement en fonction des conditions réelles des puits dont la régularité du diamètre et la stricte verticalité est un fait rarement observé. Les écartements seront donc dans la plupart des cas généralement compris entre 50 m et 100 m (soit 1 centreur tous les 3 à 8 tubes) en tenant compte des variations d'inclinaisons et de la géométrie du trou foré. Il est inutile par exemple de positionner des centreurs en regard de zones qui seraient excessivement cavées.

1.2. Phases déviées : abaques et tableaux

L'écartement entre les centreurs est théoriquement déterminé pour assurer un espace annulaire suffisant pour permettre au laitier de ciment de se mettre en place de façon homogène tout autour du tubage. La règle généralement admise est d'assurer une gaine de ciment de 1" (C=25,4 mm) lorsque possible ou correspondant à un standoff de 70% de l'annulaire théorique.



Les espacements peuvent être évalués à partir d'abaques ou de tableaux. Pour des raisons de facilité, il est dans ce cas proposé un plan de centrage déterminant un écart constant entre les centreurs. Des valeurs différentes d'écartements sont parfois prévues selon qu'il s'agit de zones de build-up ou de zones stabilisées.

Cette façon de procéder comporte des lacunes :

- les caractéristiques mécaniques des centreurs correspondent aux valeurs standards de l'API. Les centreurs plus efficaces, spéciaux ou renforcés ne sont pas évalués.
- il n'est pas tenu compte des effets des variations de la trajectoire. Celle-ci est en effet considérée comme strictement rectiligne, c'est à dire avec une inclinaison constante et sans variation d'azimut.
- la déflexion du tubage entre deux centreurs, le poids total du tubage, les effets de flottabilité (buoyancy) et de tension sont globalisés.

Il s'agit néanmoins d'une base permettant de définir un plan de centrage théorique que l'on pourra considérer comme acceptable dans une partie stabilisée de la trajectoire lorsque celle-ci n'est pas trop perturbée. Le tableau ci-après (Brouse, World Oil 1983) propose des valeurs d'espacement pour obtenir un standoff de 1" avec des centreurs standards en fonction de la taille du tubage (de 5"1/2 à 13"3/8) et de l'inclinaison du puits (de 10° à 50°).

**Maximum Spacing Between
Centralizers, (ft) (Standoff = 1 in.)**

Hole Angle	*Casing size and **hole size					
	*5-1/2 in. **8-3/4 in.	7 in. 9-5/8 in.	7-5/8 in. 10-3/4 in.	9-5/8 in. 12-1/4 in.	10-3/4 in. 14-3/4 in.	13-3/8 in. 17-1/2 in.
10°	63	62	55	56	73	70
15°	57	53	55	56	60	53
20°	53	49	48	48	50	42
25°	50	45	40	43	40	36
30°	48	42	38	39	37	29
35°	46	38	33	36	33	26
40°	44	35	30	33	30	22
45°	42	33	26	29	27	20
50°	40	30	26	27	25	18

(Brouse, World Oil, 1983)

Sur la base des valeurs fournies dans ce tableau, pour un tubage 9"5/8 installé dans un puits incliné à 40°, il faudra ainsi prévoir un espacement de 33 ft (soit 10 m). Dans les mêmes conditions, un espacement de 22 ft (6,7 m) devra être retenu pour un tubage 13"3/8. Ces valeurs sont inférieures à celles que l'on peut calculer pour un puits parfaitement stabilisé (respectivement 13 m et 9,8 m). Elles sont acceptables, bien qu'assez conservatoires.

1.3. Les recommandations API

L'API 10D-2 (ISO 10427-2) définit précisément les procédures de test des centreurs mais ne fournit pas de guides précis en ce qui concerne leur placement. Les équations proposées (voir en annexe) permettent de déterminer la charge mécanique que va subir le centreur dans le puits (contraintes latérales, déflexion du tubage) mais, comme précédemment, ces règles laissent apparaître quelques imprécisions :

- la valeur du standoff recherché est laissée au libre choix des opérateurs. Le minimum retenu est généralement de l'ordre de 67% à 70%.
- il est uniquement déterminé une valeur plancher de la résistance mécanique des centreurs (Restoring Force) par diamètre de tubage et pour une compression de 67%.
- les contraintes axiales subies par les centreurs ne tiennent pas compte de la rigidité de la colonne (il s'agit d'un modèle "soft string").

L'application des recommandations décrites dans l'API 10D permet toutefois une approche beaucoup plus réaliste que celle déterminée au moyen des abaques du paragraphe précédent.

Divers modèles 3D "stiff string" beaucoup plus sophistiqués ont été développés pour améliorer la précision. A ce jour, ils n'ont pas été officiellement incorporés dans l'API. On peut observer néanmoins que les résultats obtenus par les deux types de modèle ne sont sensiblement différents que dans le cas de tubages très rigides (diamètre > 9"5/8) ou en présence de fortes variations angulaires et/ou de géométries très irrégulières.

L'industrie pétrolière donne quelques vagues recommandations concernant les espaces annulaires :

- la recommandation la plus fréquente est de respecter une gaine de ciment de 1". C'est celle qu'il est proposé d'appliquer autant que possible en géothermie. En ce qui concerne les petits diamètres (< 7") ou les entrefers, il est parfois mentionné de stricts minima variant de 0,35" à 0,5".
- les cimentiers conseillent pour la plupart de respecter un écart d'au moins 0,75" de part et d'autre du tubage.

Mémo historique : en géothermie, la valeur de standoff de 67% qui est le plus souvent retenue par les opérateurs et Maîtres d'œuvre pour déterminer le standoff minimal à appliquer à une colonne ne correspond à aucune référence qualitative officielle de centrage. Il s'agit à l'origine du niveau de compression retenu comme référence par la norme API afin de valider la résistance minimale à l'écrasement (restoring force) des centreurs. Pour une raison indéterminée, cette valeur est aujourd'hui considérée comme la valeur minimale de standoff devant être respectée dans les puits.

De nombreux opérateurs pétroliers retiennent d'ailleurs des valeurs de standoff allant de 70% à 80%. Certains majors imposent même systématiquement une valeur de 80% pour les colonnes soumises à des contraintes environnementales ou de production élevées.

1.4 Evolution du standoff

Lorsque l'on utilise des centreurs souples, la valeur du standoff évolue tout au long des opérations de cimentation en fonction du poids apparent de la colonne. Ce poids est fonction de la flottabilité qui varie au fur et à mesure du déplacement des fluides de densité différente à l'intérieur du tubage et dans son annulaire. On peut considérer 4 phases :

- phase 1 : pré-cimentation. Le tubage est descendu à sa cote définitive en fond de puits. L'intérieur du tubage et son annulaire sont remplis par de la boue. Le niveau de contrainte mécanique est moyen. Il dépend de la trajectoire du puits et du poids apparent de la colonne dans la boue ;
- phase 2 : pompage. Le laitier de ciment est pompé dans la colonne jusqu'au sabot du tubage. L'annulaire est encore rempli par de la boue. Au cours de cette opération, le poids apparent du tubage va progressivement augmenter jusqu'à atteindre son maximum au moment où le laitier atteint le sabot de la colonne. C'est alors que les centreurs sont le plus fortement sollicités et que le standoff devient minimal ;
- phase 3 : chasse. Dans cette phase, le laitier est chassé dans l'annulaire par de la boue injectée dans l'intérieur du tubage. Au fur et à mesure que le laitier remonte sur son extrados, la flottabilité de la colonne augmente et son poids apparent diminue. Les centreurs se décompriment et la valeur du standoff augmente jusqu'à atteindre son maximum en fin de phase. En fin de phase, la colonne est remplie par de la boue et son annulaire par le laitier ;

Un point intermédiaire remarquable de la phase 3 correspond au point d'équilibre des densités entre l'intérieur du casing et son annulaire. A ce point, la situation de contrainte est alors assez proche de celle de la phase 1.

Dans certains cas particuliers (cas des tubages en fibre de verre) le poids apparent de la colonne peut se réduire à un point tel dans cette phase qu'il devient nécessaire de prendre des dispositions pour l'empêcher de remonter vers la surface par flottaison.

- phase 4 : prise du ciment. Le durcissement du ciment fige les valeurs de standoff de la situation précédente. A la fin de cette phase, les centreurs ne sont plus mécaniquement sollicités.

Pour simplifier la validation d'un plan de centrage, il est proposé que le standoff soit systématiquement calculé à partir des conditions moyennes de contrainte rencontrées en phase 1, en se basant sur un fluide de remplissage de densité 1,10. Dans une telle situation, la valeur de standoff retenue comme référence devra être démontrée en tout point du découvert.

L'application de cette recommandation permet de conserver, dans la plupart des cas, un standoff de l'ordre de 40% à 50% en fin de phase 2. On évite ainsi la formation de poches de boue dans l'annulaire souvent à l'origine des phénomènes de chenalisation.

1.5. Les modèles des opérateurs de déviation

La plupart des opérateurs de déviation (tous les majors le font) proposent des modèles permettant de calculer le plan de centrage en se basant sur les mesures de déviation recueillies au cours des travaux. Les modèles proposés sont souvent sophistiqués. Ils prennent en compte les variations de la trajectoire dans les 3 dimensions, les effets de tension et de torsion, ainsi que la valeur de standoff souhaitée entre deux centreurs (déflexion).

Ce service est généralement facturé (mais pas toujours) en sus des opérations de déviation. Mais le surcoût correspondant est très marginal en regard du coût global de la déviation.

L'utilisation de ce service est très fortement recommandée puisqu'il permet de définir un plan de centrage répondant de façon beaucoup plus réaliste aux contraintes subies par le tubage tout au long de sa trajectoire.

2. Plan de centrage

Le plan de centrage d'une colonne se définit en deux étapes :

- un plan prévisionnel (modèle 2D ou 3D), basé sur la trajectoire théorique envisagée et sur le diamètre nominal de la phase. Ce plan doit démontrer la faisabilité de l'architecture envisagée (restoring force requise, standoff observé, manœuvrabilité de la colonne). Dans le cas contraire, cette architecture doit être revue et corrigée ;
- un plan définitif (modèle 3D), réactualisé à partir du plan prévisionnel sur la base de la trajectoire réelle (mesures de déviation) et - lorsque disponible - de la géométrie du découvert (log de diamétrage CAL-XY).

Les paramètres utilisés dans les modèles pour calculer les plans de centrage doivent être clairement décrits :

- diamètre nominal ou mesuré de la phase de forage ;
- diamètre et poids nominal du tubage à centrer ;
- trajectoire prévisionnelle ou définitive du puits ;
- densité des fluides de remplissage de l'annulaire et du tubage ;
- spécifications des centreurs choisis : type, diamètres minimum et maximum, caractéristiques mécaniques (starting force, running force, restoring force).

En géothermie, il est recommandé que les plans de centrage calculés avec ces paramètres déterminent **un standoff minimum de 70% en tout point de la colonne** (c'est à dire en incluant les points de déflexion entre centreurs) pour les conditions de contraintes moyennes de pré-cimentation. D'autre part, pour ce qui concerne l'espace annulaire, le forage doit avoir autant que possible un diamètre supérieur d'au moins 3" à celui du tubage (Bittleston et Guillot, 1991) - ce qui assure la présence d'une gaine de ciment de 1" avec un standoff de 70% - et éviter autant que possible de présenter des zones trop fortement cavées.

Il est grandement recommandé de privilégier des plans de centrage basés sur un écartement défini en nombre de centreurs par tube. Les plans proposant des espacements métriques variables basés sur la recherche d'une valeur de standoff, bien que visant à optimiser le nombre de centreurs et la qualité du centrage, sont en effet dans la pratique difficilement applicables sur le chantier.

Le plan de centrage prévisionnel sera ensuite réactualisé (plan définitif) avant la pose du tubage en tenant compte des mesures de déviation déterminant la trajectoire réelle du puits. Dans l'éventualité où un log de diamétrage du découvert est disponible, il convient également alors de remplacer le diamètre nominal de forage par la géométrie enregistrée.

Pour chacun des plans, il doit être vérifié qu'ils permettent la descente de la colonne dans de bonnes conditions de manœuvrabilité.

L'entreprise de forage ne doit pouvoir descendre le tubage dans le puits qu'à condition d'avoir au préalable :

- produit une copie de la commande des centreurs et de leurs spécifications ;
- fait valider par le maître d'œuvre le plan de centrage définitif qui va être appliqué.

La supervision en place doit ensuite s'assurer que ce plan est respecté lors de la descente du casing.

3. Spécifications des centreurs

Les spécifications des centreurs choisis doivent être systématiquement fournies dès l'élaboration des programmes prévisionnels :

- diamètre nominal, type (souple, rigide, ...) et référence du fabricant ;
- métallurgie et mode de confection (soudé, non-soudé, mono-pièce,....) ;

- diamètre maximum en extension totale ;
- diamètre minimum en compression maximale ;
- résistance à la compression (restoring force RF) pour un standoff de 67% (norme des tests API) et/ou pour un standoff correspondant au diamètre nominal du découvert ;
- résistance au déplacement dans l'ouvrage : starting force et running force.

Nota : l'utilisation de centreurs spéciaux rigides (type SpiraGlider) dans un découvert est rare en géothermie, généralement réservée à des forages très fortement inclinés (plus de 60° ou sub-horizontaux). Leur usage mériterait toutefois d'être développé pour équiper les zones de prise d'angle à fortes contraintes (cas de nombreux tubages 13"3/8) et les architectures en très gros diamètre (10"3/4 au Dogger). En raison de leur inconvénient (voir ci-après), il n'est toutefois pas recommandé d'utiliser des centreurs de ce type dans le seul but de remplacer du matériel standard qui pourrait satisfaire aux besoins.

Avantage : pour un diamètre de forage donné, le standoff obtenu au niveau du centreur reste constant quelques soient les contraintes subies. Les centreurs rigides ne sont pas soumis en effet au cycle de compression et de relâchement affectant les centreurs souples, souvent à l'origine d'un phénomène de chenalisation ou d'une contamination du laitier. Les valeurs de starting force et de running force sont nulles.

Inconvénient : le standoff maximal dépasse rarement 70% à 75%. Il est en effet directement fonction de la différence entre le diamètre extérieur du centreur - qui doit pouvoir descendre librement dans l'entrefer - et le diamètre du trou foré. Pour être pleinement efficace, ce type de centreur nécessite donc un puits bien calibré.

4. Règle de placement des centreurs

En complément du choix du type et de l'espacement des centreurs, il faut également considérer le mode d'installation des centreurs tout au long de la colonne.

Il est proposé d'installer préférentiellement les centreurs souples à cheval sur un stop-collar. C'est la configuration qui est généralement préconisée, sauf cas particuliers, pour obtenir un centrage optimal. Elle offre également une meilleure sécurité lors des manœuvres et permet de gagner du temps en étant réalisé avant la descente du tubage.

Dans des situations de faible espace annulaire (cas fréquents dans les opérations de réhabilitation), on préférera toutefois les configurations positionnant les centreurs entre deux stops-collars ou entre un stop-collar et un manchon, lui permettant ainsi de s'écraser pleinement en cas de besoin.

Dans les puits de production, il est généralement procédé à la coupe et au retrait de la partie supérieure de la colonne de production en vue de dégager la chambre de pompage. Cette zone doit être rigoureusement centrée afin d'éviter à la fois un endommagement du tubage externe par l'outil de coupe et un décentrement trop important de l'axe d'entrée de la colonne de production. Pour ce faire, il est recommandé d'installer un centreur rigide de part et d'autre de la DV située sous la coupe concernée ou, à défaut de DV, un centreur rigide sur chacun des deux tubes précédant la coupe.

5. Récapitulatif

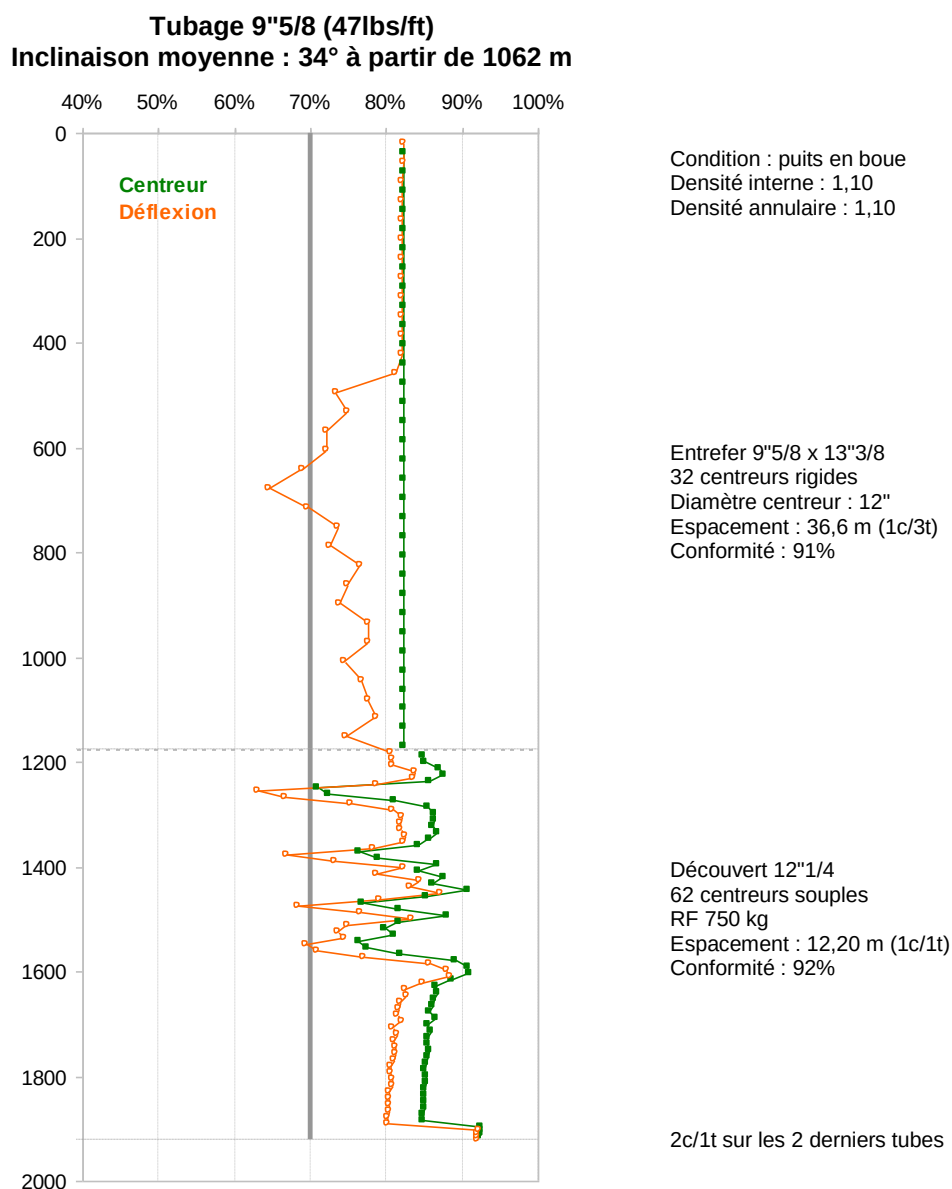
Pour obtenir des cimentations de bonne qualité, on a vu qu'il était important de porter une attention particulière à la détermination des programmes de centrage des différents tubages de façon à ce que ces programmes soient adaptés à la trajectoire des puits. Il sera appliqué les recommandations suivantes :

- inclure systématiquement les spécifications du matériel de centrage retenu dans les programmes de forage ;
- proposer un plan de centrage prévisionnel efficace et facilement applicable démontrant la faisabilité de l'architecture proposée sur la base d'un remplissage homogène du puits avec un fluide de densité 1,10, avec pour double objectif :
 - d'obtenir une gaine de ciment de 1";
 - de rechercher un standoff minimal de 70%.
- pendant les travaux, lors de l'établissement du plan définitif, assurer un espacement optimum des centreurs, en utilisant des modèles de calcul tridimensionnels basés sur les données de la déviation réalisée et - lorsqu'elle est disponible - sur la géométrie réelle du découvert ;
- s'assurer que la descente de la colonne ainsi équipée peut s'effectuer dans de bonnes conditions de manœuvrabilité ;
- placer les centreurs en respectant les configurations définies au §4.
- vérifier la bonne application du plan de centrage défini par le Maître d'oeuvre.

ANNEXE 1

Exemple de plan de centrage

Le centrage du tubage 9"5/8 ci-après est évalué au moyen du modèle "soft string" 3D de l'API. Le calcul est effectué pour des conditions moyennes de contrainte (phase 1, puits en boue). Les valeurs de standoff sont fournies au droit des centreurs (en vert) et aux points de déflexion entre centreurs (en orange). Le standoff minimal recherché est de 70% (trait gris).



Nota : les données numériques du log CAL-XY n'étant pas disponible, ce plan ne tient pas compte de la géométrie du découvert. On observera également que, dans le cas de ce tubage, l'obtention d'une gaine de ciment de 1" nécessiterait d'atteindre un standoff de 76%.

ANNEXE 2

Quelques équations permettant le calcul de la déflexion d'un tubage dans un puits dévié (références API 10D-2).

Modèle	Déflexion maximale
Modèle 1D, puits incliné stabilisé sans effet de tension axiale	$\delta = \frac{(W_b \sin \theta) l_c^4}{384 E \cdot I}$
Modèle 1D, puits incliné stabilisé avec effet de tension axiale	$\delta = \left(\frac{W_b \sin \theta l_c^4}{384 E \cdot I} \right) \left(\frac{24}{\mu^4} \right) \left(\frac{\mu^2}{2} - \frac{\mu \cdot (\cosh \mu - 1)}{\sinh \mu} \right)$ $\mu = \sqrt{\frac{F_t \cdot l_c^2}{4 E \cdot I}}$
Modèle 2D	$\delta = \left[\frac{F_l \cdot l_c^3}{384 E \cdot I} \right] \left(\frac{24}{\mu^4} \right) \left(\frac{\mu^2}{2} - \frac{\mu \cdot (\cosh \mu - 1)}{\sinh \mu} \right)$ $F_l = W_b \cdot l_c \cdot \sin \bar{\theta} + 2 F_t \cdot \sin \frac{\beta}{2} \text{ (angle décroissant)}$ $F_l = W_b \cdot l_c \cdot \sin \bar{\theta} - 2 F_t \cdot \sin \frac{\beta}{2} \text{ (angle croissant)}$
Modèle 3D	$\delta = \left[\frac{F_l \cdot l_c^3}{384 E \cdot I} \right] \left(\frac{24}{\mu^4} \right) \left(\frac{\mu^2}{2} - \frac{\mu \cdot (\cosh \mu - 1)}{\sinh \mu} \right)$ $F_l = \sqrt{F_{l,dp}^2 + F_{l,p}^2}$ $F_{l,dp} = W_b \cdot l_c \cdot \cos \gamma_n + 2 F_t \cdot \sin \frac{\beta}{2} \text{ (angle décroissant)}$ $F_{l,dp} = W_b \cdot l_c \cdot \cos \gamma_n - 2 F_t \cdot \sin \frac{\beta}{2} \text{ (angle croissant)}$ $\cos \gamma_n = \frac{\sin[(\theta_1 - \theta_2)/2]}{\sin(\beta/2)} \sin\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right)$

$$\beta = \cos^{-1}[\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)]$$

$$F_{l,p} = W_b \cdot l_c \cdot \cos \gamma_0$$

Symbol	Definition
δ	Déflexion maximale entre les centreurs
W_b	Poids unitaire du casing dans la boue
θ	Inclinaison
l_c	Distance entre centreurs
E	Module d'élasticité du tubage
I	Moment d'inertie de zone du tubage
F_t	Tension effective entre centreurs
$\bar{\theta}$	Inclinaison moyenne entre deux centreurs
r	Rayon de courbure de la trajectoire
β	Variation totale de trajectoire entre centreurs
γ_n	Angle entre verticale et le vecteur normal au forage
γ_0	Angle entre verticale et le vecteur binormal du forage
ϕ	Azimut
$F_{l,dp}$	Force latérale totale dans le plan de courbure
$F_{l,p}$	Force latérale totale perpendiculaire au plan de courbure

Annexe 4

Cimentations



Version validée le 24 novembre 2015

FICHE TECHNIQUE 041

MODES DE CIMENTATION ENVISAGEABLES EN CAS DE RISQUE DE FRACTURATION

Cette note fait un rappel des modes de cimentation envisageables lorsqu'un risque de fracturation hydraulique est attendu au cours des opérations. Les avantages et inconvénients de chacune des méthodes sont discutés.

1. La fracturation hydraulique

La résistance mécanique des roches varie fortement selon la lithologie des formations et leur profondeur. Les dépôts que l'on traverse en forage dans le Bassin parisien sont faits d'une alternance de roches faiblement indurées (argiles, sables, marno-calcaires, calcaires), et pour certaines, ces formations sont relativement fragiles. Deux éléments vont déterminer la réaction de la roche à une modification de la pression qu'elle subit :

- la pression des fluides (P_f) contenus dans cette roche ;
- la pression de fracturation mécanique (P_m) de la roche mise sous contrainte.

Prenons une roche située à 1200 m de profondeur verticale (PV) et considérons que cette roche a une pression des fluides de formation (P_f) de 130 bar et une pression de fracturation (P_m) de 180 bar. A partir de ces deux éléments, on peut évaluer la densité minimale de la colonne de fluide dans le forage pouvant déterminer un risque d'éruption et la densité maximale pouvant déterminer un risque de fracturation hydraulique. Pour simplifier l'exemple, les pertes de charges du fluide en circulation ne sont pas prises en compte : le puits sera considéré comme statique.

- Densité minimale : $P_f / PV \times 10 = 1,08$
- Densité maximale : $P_m / PV \times 10 = 1,50$

Si la densité de la colonne de fluide (boue ou laitier de ciment) dans le forage devient inférieure à 1,08, cette colonne ne peut plus contenir la pression des fluides des formations et une éruption des fluides contenus (eau, gaz, pétrole) peut survenir. Dans le cas décrit, la pression en surface

atteindrait 10 bar. C'est pour gérer ce genre de situation que des BOP (Blow Out Preventer) sont installés en tête de puits.



Blow-Out-Preventer (BOP)

Si la densité de la colonne de fluide (boue ou laitier de ciment) devient supérieure à 1,50, une fracturation hydraulique (ou frac) des roches encaissantes devient possible. Le fluide va fracturer la roche et s'injecter dans les fractures (pertes partielles ou totales) jusqu'à atteindre un équilibre avec la pression des fluides P_f dans les formations. Ce nouvel équilibre peut, dans certains cas, déclencher à son tour l'éruption des formations sus-jacente. Lors d'une opération de cimentation, on constatera qu'une partie importante du tubage ne sera pas cimentée et qu'un volume conséquent de ciment s'est injecté dans les formations fracturées. S'il s'agit du réservoir, celui-ci sera endommagé.

Le risque de fracturation est quasiment la règle dans le Bassin parisien. Il impose de prendre des dispositions particulières pour assurer la cimentation des colonnes sur leur totalité. Deux modes de cimentation sont retenues par les Bureaux d'Etudes :

- les cimentations multi-étagées (en 2 ou 3 étages) ;
- les cimentations au moyen de laitiers allégés, super-allégés, ou les cimentations mixtes de laitiers allégés et de laitiers lourds en un seul étage.

Dans la suite de cette note, on déterminera les avantages et les inconvénients respectifs de ces deux méthodes.

2. Les cimentations multi-étagées

Le principe des cimentations multi-étagées est de segmenter l'opération en plusieurs étapes successives (généralement 2 ou 3 étages). Tout en gardant une densité de laitier élevée, on peut, de cette manière, réduire la densité apparente de la colonne de fluide et éviter ainsi d'atteindre ou de dépasser la densité de fracturation des roches concernées.

Pour un tubage cimenté en deux étages à 1200 m de profondeur, avec un laitier de densité 1,80 et une boue de chasse de densité 1,05, on obtiendrait pour le premier étage (entre 1200 et 600 m) une densité apparente de : $(1,80 \times 600) + (1,05 \times 600) / 1200 = 1,43$.

Si on prend l'exemple proposé au §1, on constate que cette valeur est effectivement inférieure à la densité de fracturation hydraulique des roches (1,50), et ce malgré l'utilisation d'un laitier lourd de densité 1,80. Le risque d'une fracturation hydraulique peut donc être contrôlé.

La réalisation de cimentations étagées implique l'utilisation de matériel spécifique incorporé dans les colonnes cimentées : les DV (Diverting Valve). Elle implique également des procédures relativement délicates permettant le fonctionnement de ce matériel.

2.1 Les DV

Les DV (Diverting Valve) sont des éléments intégrés au niveau souhaité par simple vissage entre deux éléments d'une colonne. Leur diamètre correspond au diamètre nominal du tubage et leur longueur est généralement inférieure au mètre.



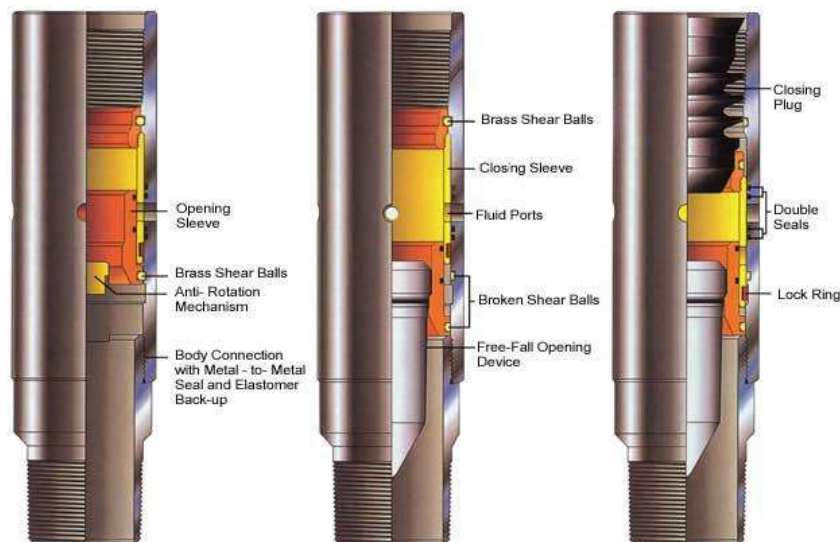
Diverting valve et bouchons

Les DV contrôlent des événements latéraux permettant, à la demande, un passage direct des fluides vers l'annulaire. Ces événements sont ouverts ou fermés au moyen de "chemises" coulissantes manœuvrées sous pression par l'envoi de bouchons successifs.

La procédure de mise en œuvre d'une cimentation étagée peut être résumée de la manière suivante. On prendra en exemple une colonne de 1200 m, cimentée en 2 étages, avec une DV positionnée à 600 m :

- la colonne est descendue à 1200 m dans le forage avec la DV en position fermée ;

- injection par l'intérieur du tubage du volume de laitier correspondant au 1er étage entre 1200 m et 600 m ;
- chasse à la boue ;
- la pression différentielle existant entre l'annulaire rempli de laitier de ciment et l'intérieur du tubage en boue est bloquée par le clapet anti-retour placé dans le sabot de cimentation ;
- ouverture de la DV par envoi d'un bouchon (free fall plug) ;
- circulation à la boue pour éliminer les éventuels résidus de ciment dans l'espace annulaire au-dessus de la DV ;
- attente de séchage (2 à 4 heures) ;
- injection par l'intérieur du tubage du volume de laitier correspondant au 2ième étage entre 600 m et surface ;
- chasse à la boue ;
- fermeture de la DV par injection d'un bouchon (closing plug) ;
- attente de séchage du tubage (WOC) ;
- Les bouchons de la DV sont reforés en même temps que les résidus de ciment et le matériel de cimentation.



Les 3 états successifs d'une DV : pose, ouverture, fermeture

2.2 Inconvénients

La méthode de cimentation multi-étagée présente les principaux inconvénients suivants :

1. La **procédure de mise en œuvre** est délicate. Le dysfonctionnement d'un bouchon ou d'une chemise peut empêcher le bon déroulement des opérations de cimentation.
2. La **métallurgie des DV** est différente de celle de la colonne (corps et chemises en aciers spéciaux). Dans un tubage de production, la DV sera donc un point singulier pouvant focaliser la corrosion.
3. Les DV sont **mécaniquement fragiles** par construction. Pour respecter les diamètres nominaux des colonnes dans lesquelles elles sont intégrées, l'épaisseur résiduelle d'acier est inférieure à celle du tubage. Elle constitue de ce fait un point singulier de faiblesse mécanique dans la colonne lorsque celle-ci est soumise à des efforts importants. Le

dysfonctionnement des DV est particulièrement observé et fréquent dans le cas de DV de gros diamètre (9"5/8 et plus) installés dans des puits fortement déviés (plus de 30°) ou dont les trajectoires perturbées soumettent les tubages à des contraintes mécaniques importantes (tension, torsion).

4. La **présence d'ouvertures sur l'extrados**. Même en position fermée, la DV ne garantit pas une étanchéité à long terme vers l'annulaire. Mis à part une éventuelle gaine de ciment, seule une chemise coulissante de quelques millimètres d'épaisseur assure cette étanchéité. Une anomalie de percement probable est d'ailleurs très souvent observée au niveau des DV sur les logs de diamétrage réalisés lors des contrôles de corrosion. On peut considérer qu'une DV constitue une anomalie dans la continuité hydraulique d'une colonne de production, tant en ce qui concerne le diamètre intérieur de cette colonne (perturbation des écoulements) qu'en ce qui concerne l'intégrité de son étanchéité.

2.3 Avantages

Les avantages de la cimentation multi-étagée sont les suivants :

1. Permet l'**utilisation de laitiers lourds standards** dont la résistance mécanique élevée répond bien aux contraintes mécaniques et thermiques que subiront les colonnes de production.
2. Autorise le **contrôle des cimentations** avec les moyens utilisés de façon standard (CBL-VDL). L'interprétation de ces diagraphies permet un contrôle assez simple (sinon aisé) de la qualité des gaines de ciments mises en place.
3. Détermine des **coûts modérés**, tant en ce qui concerne les opérations de cimentation elles-mêmes que pour les contrôles par diagraphies soniques.

3. Les cimentations avec des laitiers allégés

L'autre méthode utilisée pour tenter d'éviter le phénomène de fracturation des formations, historiquement plus récente, consiste à diminuer la densité des laitiers utilisés. Les cimentiers ont, en effet, développé depuis quelques années des formulations à très basse densité qu'ils ont rendues opérationnelles.

Pour un tubage posé à 1200 m de profondeur dans des formations dont la pression de fracturation est de 180 bar, la densité du laitier utilisé devra être inférieure à : $180 / 1200 * 10 = 1,50$.

Pour obtenir un laitier de faible densité (1,70 à 1,50), il faut incorporer à ce laitier des adjuvants ou des produits de charge (bentonite, pouzzolane, billes de verre) qui réduisent sa densité apparente. Des laitiers-super allégés (1,50 à 1,20) sont également disponibles : il s'agit alors de laitiers très spécifiques à base de produits moussants ou d'émulsifiants gazeifiés.

3.1 Inconvénients

La méthode de cimentation avec des laitiers allégés, super-allégés ou mixtes présente les principaux inconvénients suivants :

1. La **résistance mécanique définitive des laitiers** est plus ou moins fortement altérée par les adjuvants ou produits spécifiques incorporés dans le laitier. Outre les résistances mécaniques à la compression (CS) qui sont fortement diminuées, les durées de prise (WOC) pour une CS déterminée sont très largement augmentées. On peut néanmoins considérer que l'étanchéité des annulaires est normalement assurée à partir du moment où le laitier allégé a été mis en place de façon régulière et homogène.
2. Le **contrôle de la qualité des cimentations** s'avère difficile. Les outils disponibles pour ces contrôles, sonique (CBL-VDL) et, dans une moindre mesure ultra-sonique (USIT-CE ou similaires) ne sont pas vraiment capables de discriminer suffisamment les faibles variations de densité. Il est donc très difficile d'apprécier la qualité réelle des cimentations réalisées avec des laitiers allégés, et plus encore avec des laitiers super-allégés. Le faible niveau de fiabilité des contrôles s'avère être l'un des principaux handicaps de cette méthode.
3. Le **coût des opérations et des produits** est généralement très légèrement supérieur de celui d'une cimentation multi-étagée. Le coût des contrôles aussi puisqu'ils imposent, en toute rigueur, l'usage d'outils ultra-soniques en complément du classique CBL-VDL. Ces coûts baissent toutefois progressivement du fait de l'augmentation du nombre d'opérations.

3.2 Avantages

Les avantages des cimentations allégées (ou mixtes) sont les suivants :

1. La réalisation des cimentations s'effectue en **une seule opération homogène**. Les procédures de cimentation restent relativement simples et fiables, et, nonobstant la fabrication du laitier lui-même, comparable à une cimentation classique.
2. **L'absence de DV** diminue les risques de dysfonctionnement en cours d'opération et garantit une colonne intègre sur le plan métallurgique et hydraulique.

4. Récapitulatif et recommandations

Il ne sera pas proposé de choix entre les deux méthodes décrites, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. Il appartient aux Maîtres d'Oeuvre de déterminer et - surtout - de justifier les choix qu'ils feront en fonction des conditions attendues dans les puits.

Les recommandations que l'on peut faire concernent quatre éléments :

1. le choix qualitatif des DV : il apparaît important que les DV choisies soient de la meilleure qualité possible afin d'éviter au mieux les dysfonctionnements fréquemment observés particulièrement en gros diamètre (9"5/8 et plus) et dans les puits déviés ou comportant de fortes contraintes mécaniques. L'achat de ce type de matériel auprès de fabricants (ou de revendeurs) de produits génériques, peu réputés, de marques inconnues ou de produits re-conditionnés, devra absolument être évité.
2. Le choix des outils de contrôle : pour contrôler les cimentations allégées, il est suggéré d'utiliser un outil ultra-sonique (type USIT ou similaire) venant **en complément** du CBL-VDL

3. Il est également suggéré de favoriser le développement de nouveaux outils de contrôle mieux adaptés à l'évaluation qualitative des cimentations ou de faire évoluer des outils existants.
4. Lorsque des contraintes mécaniques ou thermiques sont attendues en exploitation, ce qui est le cas le plus fréquent pour les forages géothermiques profonds, il apparaît important que les Maître d'Oeuvre justifient clairement, dans les documents proposés (PER-DOTEX, APD, documents techniques), le choix de la méthode de cimentation retenue pour répondre à ces contraintes. Un comparatif clair et documenté des deux méthodes devrait être fourni dans ces documents afin d'argumenter le choix qui aura été fait, en s'appuyant si nécessaire sur les résultats des tests de fracturation ("leak off test").



Décembre 2015

FICHE TECHNIQUE 042

EVALUATION DE LA DUREE DES ATTENTES DE SECHAGE DES CEMENTS

La durée des attentes de séchage du ciment (WOC pour "Wait On Cement to dry") est un des éléments qualitatifs essentiels de la cimentation des tubages. C'est particulièrement vrai en géothermie profonde où les tubages servent à la fois au soutènement du puits et à l'extraction des fluides produits.

Cette fiche rappelle les règles les plus généralement appliquées dans l'industrie pétrolière et propose des adaptations de celles-ci aux conditions spécifiques de la géothermie.

1. Détermination de la durée de l'attente de séchage

Le début de l'attente de séchage est facile à définir : elle correspond classiquement à la fin du déplacement du laitier dans le puits (fin de la chasse sous pression). Il s'agit du moment où le dernier laitier de ciment a été mis en place à l'extrados de la colonne. L'ensemble des laitiers installés est alors définitivement statique. Cet instant marque le début de l'attente.

La fin de l'attente est plus controversée :

- pour certains, la fin est définie comme l'heure de reprise de la foration des restes de ciment et du matériel de cimentation en pied de tubage (anneau, sabot) ;
- pour les autres, elle intervient dès qu'un élément du tubage concerné est soumis à des efforts (pression hydraulique, stress mécanique). Toute intervention sur le tubage cimenté (frottements, vibrations, chocs), comme par exemple la descente d'un train de tiges à l'intérieur du tubage ou sa mise en pression, signe alors la fin de l'attente. La réalisation d'opérations n'impliquant pas de contrainte mécanique sensible, comme les diagraphies standards, reste toutefois envisageable pendant la durée du WOC.

Nous retiendrons la deuxième définition, plus restrictive, comme étant le WOC dit " efficace ". Il est clair, en effet, que **toute intervention mécanique ou hydraulique** subie par la colonne pendant son séchage contribue à réduire la qualité de l'adhérence du ciment sur l'acier du tubage

(micro-annulaire). Il est donc justifié de considérer le WOC efficace comme la durée de référence à prendre en compte.

Ce choix est d'autant mieux adapté à la géothermie qu'il existe de très fortes contraintes sur les tubages (colonnes en gros diamètre, déviations souvent importantes), des impératifs environnementaux particulièrement strictes (milieu urbain à forte densité, protection des nappes, réinjection des fluides) et des coûts d'exploitation sensibles (la calorie géothermique n'atteint pas la plus-value pétrolière ; on ne peut se permettre d'avoir à refaire des ouvrages).

Enfin, contrairement à ce qui se pratique le plus souvent dans l'industrie pétrolière - c'est une importante différence - **les tubages servent aussi de colonne de production** (débits importants, fluides agressifs, stress thermique en production) et ne sont pas amovibles. Prendre les moyens d'obtenir des cimentations de qualité et de garantir la pérennité des tubages apparaît donc comme une nécessité primordiale.

2. Les règles dans l'industrie pétrolière

Les normes de l'industrie pétrolière sont généralement assez minimalistes et peu restrictives, dès lors qu'il s'agit d'obtenir un niveau de qualité sans intérêt à court terme, sans retour financier immédiat ou sans plus-value sécuritaire. Dans le contexte pétrolier, les contraintes sur les tubages sont souvent très fortes en foration, mais disparaissent ensuite, dans la plupart des cas, pendant l'exploitation des ouvrages qui se fait quasi systématiquement avec du matériel spécifiquement descendu dans les puits (tubings de production), généralement amovible et remplaçable à moindre frais. Les cimentations peuvent donc le plus souvent être exécutées sans véritablement prendre en compte les contraintes d'exploitation, ce qui n'est pas le cas en géothermie.

Les spécifications de l'API-10A fournissent deux valeurs extrêmes entre lesquelles les opérateurs peuvent appliquer leurs propres règles :

- la prise de ciment est considérée comme suffisante pour permettre la reprise de la foration lorsque la résistance à la compression du ciment (Compressive Strength ou CS) atteint 500 psi (35 bar). Cette valeur est décrite dans l'API comme le " minimum de forabilité " ;
- l'API définit également la résistance minimale définitive d'un ciment pour chaque classe de laitier : la classe G par exemple doit atteindre un CS d'au moins 3000 psi (210 bar) en fin de séchage.

La résistance du ciment à la compression (CS) est fortement influencée par de nombreux paramètres : type de ciment, densité du laitier, température, eau de mixage, additifs, rhéologie, etc... On considère qu'avec les ciments standards généralement utilisés en forage (type Portland) on obtient 80 à 90% de la résistance mécanique définitive 7 à 10 jours après la cimentation. La progression du CS est approximativement la suivante :

- CS à 2 jours : 150 bar (2180 psi),
- CS à 7 jours : 500 bar (7 260 psi),
- CS à 28 jours : 560 bar (8 130 psi),
- CS à 90 jours : 600 bar (8 700 psi).

Beaucoup de sociétés pétrolières ajoutent une contrainte de temps à la préconisation de l'API : elles considèrent, en effet, que la durée de l'attente doit permettre au ciment d'atteindre à la fois

une certaine résistance à la compression (500 psi ou plus) **et en même temps** respecter une durée minimale (12 heures, 18 heures ou plus).

Dans certains pays où la réglementation permet à l'administration d'imposer des contraintes techniques dans les permis de recherche, le minimum de forabilité de l'API est très souvent relevé à plus de 500 psi. Au Canada, par exemple, pays minier pourtant assez peu strict en matière environnementale, ce minimum est de 750 psi (50 bar).

Il est également systématiquement recommandé par les opérateurs de logging d'attendre au minimum 48 heures avant de réaliser les "bond logs", c'est à dire les diagraphies permettant d'évaluer l'adhérence du ciment sur les tubages (comme le CBL-VDL par exemple).

On note aussi que lorsque des opérations spécifiques sous haute pression (squeeze, fracturation) sont engagées, il est largement recommandé (et même imposé) par les compagnies pétrolières que les tubages impliqués par ces opérations soient cimentés depuis un temps suffisamment long pour avoir quasiment atteint leur CS maximum. Par exemple, avant de réaliser les opérations de fracturation pour le shale-gas (gaz de schistes) il est requis un délai minimum de 7 jours entre l'opération de fracturation et la dernière cimentation.

Enfin, il est partout clairement énoncé que les règles proposées par l'industrie pétrolière sont des valeurs minimales. Toute augmentation de la durée des attentes participe à une meilleure qualité des cimentations.

3. Proposition pour la géothermie basse énergie

En géothermie profonde, il est généralement fait largement application des normes et des règles de l'art de l'industrie pétrolière. On a vu plus haut que les contraintes que subissent les tubages y sont toutefois différentes, particulièrement en exploitation et que le besoin de qualité à long terme s'avère de ce fait beaucoup plus élevé.

Il est proposé ci-après deux méthodes permettant de définir la durée **MINIMALE** du WOC "efficace" à observer dans le cas des ouvrages géothermiques.

Mesure du CS : Lorsque la relation CS / temps du laitier est fournie par le cimentier pour la température la plus basse subie par la colonne, il est proposé de retenir comme WOC la plus grande des deux valeurs ci-dessous :

- la durée nécessaire pour atteindre un **CS de référence de 1000 psi** (70 bars).
- la durée minimale indiquée dans le tableau ci-dessous.

Laitiers	Minimum
Laitiers lourds classe G ($d \geq 1,90$)	18 h
Laitiers denses classe G ($d \geq 1,75$)	24 h
Laitiers allégés ($d \geq 1,50$)	36 h
Laitiers super-allégés ($d \geq 1,20$)	48 h

Valeurs conservatrices : en l'absence de données fournies par le cimentier sur la résistance mécanique des laitiers utilisés, il devra être observé, à titre conservatoire et qualitativement sécuritaire, les durées minimales suivantes :

Laitiers	WOC
Laitiers lourds classe G ($d \geq 1,90$)	24 h
Laitiers denses classe G ($d \geq 1,75$)	36 h
Laitiers allégés ($d \geq 1,50$)	48 h
Laitiers super-allégés ($d \geq 1,20$)	72 h

Règles générales :

- l'attente minimale "efficace" de séchage de ciment (tel que décrite au §1) d'une cimentation sera déterminée en se basant sur le laitier dont la densité est la plus faible et le niveau de température le plus bas. Une température "plancher" de 25°C pourra être retenue pour les laitiers remontant à moins de 300 m de profondeur. Au-delà, le gradient géothermique sera appliqué (3°/100 m en moyenne) ;
- on utilisera **en priorité** la méthode basée sur la valeur du CS, tout particulièrement dans le cas des laitiers allégés ou super-allégés. Les données et/ou justificatifs fournis par le cimentier pour permettre l'évaluation du WOC (mesures ou courbes CS/durée, température de référence) devront impérativement apparaître dans les documents transmis par le chantier et dans les DOE ;
- si la durée trouvée pour obtenir le CS de référence est inférieure au minimum indiqué, c'est ce minimum qui sera obligatoirement retenu et appliqué. Dans tous les cas un WOC maximal de 72 heures sera appliqué lorsqu'il s'avèrera impossible d'atteindre le CS de référence dans ce délai (cas de certains laitiers super-allégés) ;
- les valeurs de référence indiquées sont des valeurs **minimales**. Toute augmentation des durées de WOC ne peut que renforcer la qualité des travaux ;
- il est recommandé de ne jamais accepter de mettre en œuvre :
 - des formulations de laitier à faible densité proposant des temps de prise (minimum de forabilité à 500 psi) inférieurs à 40 heures ;
 - des formulations de laitier incluant des adjuvants susceptibles d'avoir un effet corrosif sur l'acier des tubages. C'est le cas par exemple du chlorure de calcium (CaCl_2) et de ses dérivés utilisés comme accélérateur de prise ;
- les programmes de cimentation proposés (PER-DOTEX, DCE, ...) devront indiquer la durée minimale des attentes de séchage de ciment et mentionner la méthode de détermination utilisée lors des travaux.

4. Exemples

Exemple 1 : les valeurs suivantes sont fournies par le cimentier pour un ciment de classe G standard ayant une densité de 1,84.

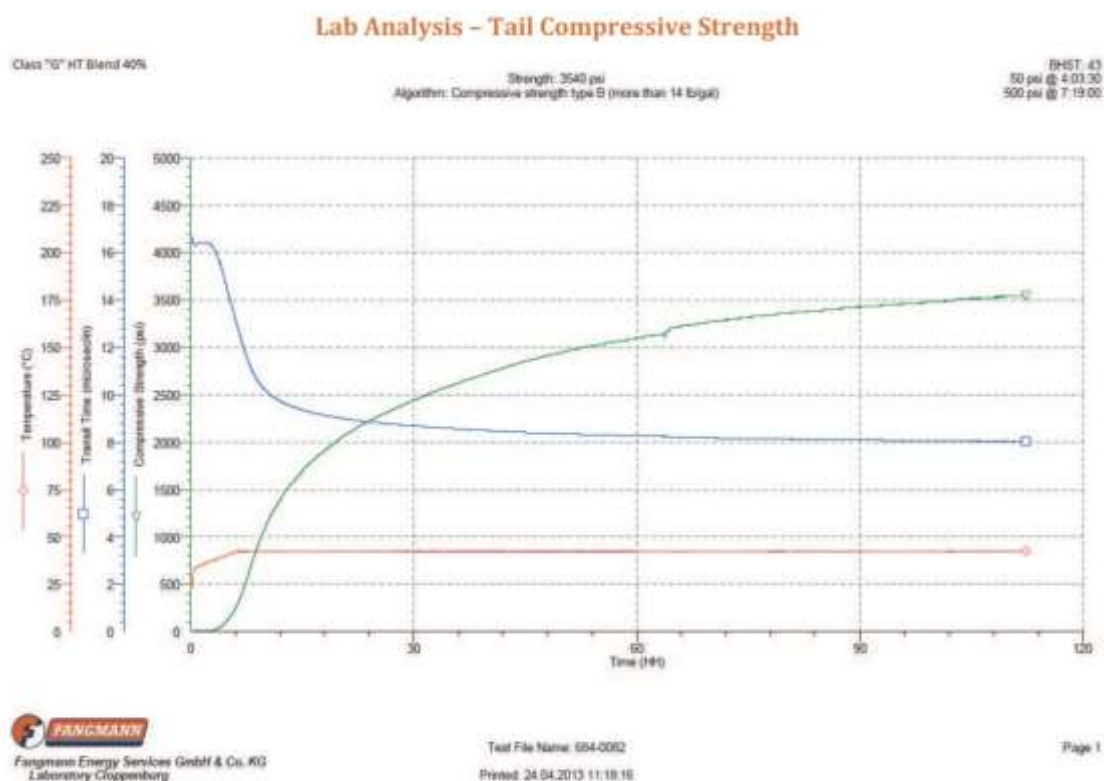
- Température de référence : 38°C
- Durée de séchage pour CS 500 psi : 10h28
- Durée de séchage pour CS 1000 psi : 25h30
- Durée de séchage pour CS 2066 psi : 47h44

La valeur du CS pour 1000 psi est supérieure à 24h. On retiendra donc cette durée, soit 25h30, comme durée de séchage.

Exemple 2 : un test est effectué en laboratoire sur un laitier allégé de ciment Portland classe G de densité 1,66 (40% de silice). Ce test fournit les données suivantes (voire le graphe ci-après) :

- Température dans le puits : 38°C
- Durée de séchage calculée pour CS 500 psi : 7h19
- Durée de séchage calculée pour CS 1000 psi : 11h20
- Durée de séchage calculée pour CS 3540 psi : 114h00

Les résultats pour 1000 psi étant inférieurs à 36 heures, il faut retenir la condition minimale : on prévoira donc un WOC efficace de 36 heures. Pour cette durée, la résistance à la compression CS peut être estimée sur la courbe à 2600 psi. Une telle valeur (qui est une évaluation de laboratoire) permet d'espérer une bonne adhérence entre tubage et ciment avant que soient imposées les contraintes mécaniques de la reprise du forage.



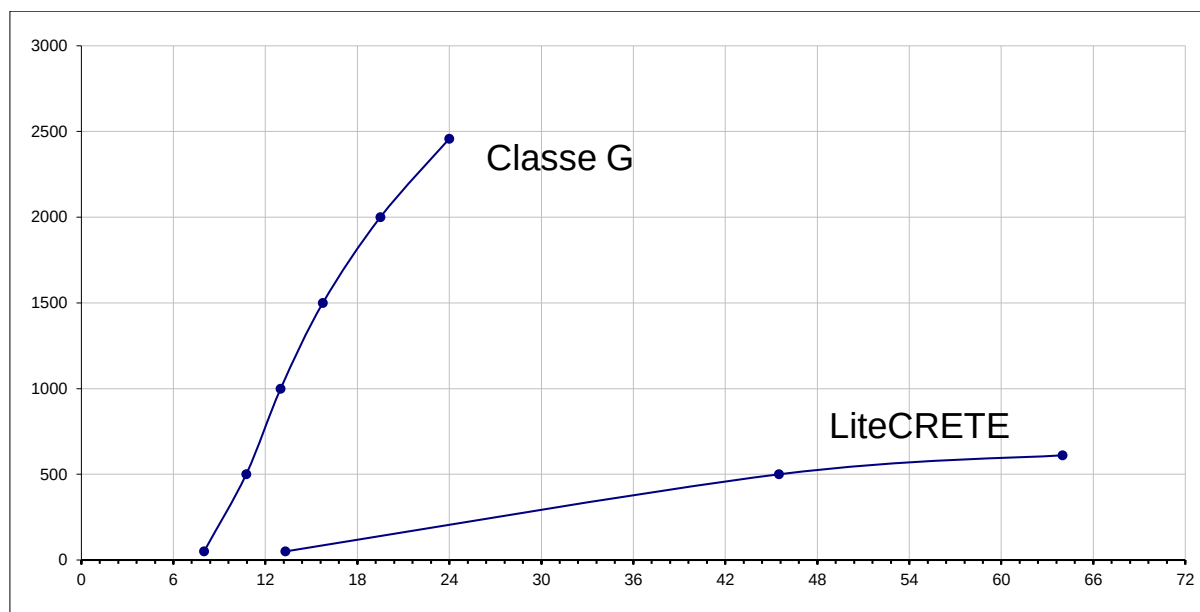
Exemple 3 : un tubage 13"3/8 est cimenté au moyen de deux laitiers : un laitier de tête super-allégé (LiteCrete de densité 1,20) et un laitier de queue dense (Classe G de densité 1,90). Les données suivantes sont fournies par l'opérateur de cimentation (voir graphique) :

LiteCrete Densité : 1,20
 Température : 29°C
 CS 500 psi : 45h29
 CS 611 psi : 64h00
 CS 1000 psi : > 72h

Classe G Densité : 1,90
Température : 31°C
CS 500 psi : 10h47
CS 2458 psi : 24h00

On prend comme référence le laitier le moins dense (LiteCrete) et on applique la durée minimale de 72 heures puisque ce laitier n'atteint pas le CS de référence de 1000 psi au bout de 72 heures.

Nota : on peut constater le très faible niveau de résistance mécanique du ciment super-allégé LiteCrete dont le CS atteint seulement 611 psi au bout de 64 heures de séchage. Cela ne veut pas dire qu'il n'est pas étanche mais qu'il est fragile. Il sera donc d'autant plus sensible aux effets mécaniques d'une reprise trop précoce des travaux. Une attente minimale de 72 heures apparaît donc pleinement justifiée.





Mai 2016

FICHE TECHNIQUE n°043

CONDITIONS D'ABANDON DES PUITES

Cette note technique récapitule les conditions d'abandon des forages géothermiques et propose des guides pour certains cas spécifiques.

1. Conditions d'abandon

La procédure d'abandon survient lorsque l'exploitation d'un site géothermique est arrêtée, le plus souvent après un diagnostic ayant démontré le mauvais état des ouvrages ne permettant plus l'exploitation de la ressource. Les puits sont abandonnés en appliquant la réglementation et les règles de l'art en la matière. L'objectif est la mise en sécurité des ouvrages et de leur environnement en rétablissant une étanchéité définitive des différentes zones traversées par les ouvrages :

- mise en sécurité ciblée des zones du forage dont le diagnostic a montré une détérioration importante. Des bouchons de ciment spécifiques pourront être installés au droit de ces zones ;
- protection spécifique des sabots des tubages et des zones de raccordement ou de télescopage entre tubages ;
- protection des différents aquifères traversés par le forage, en particulier de celui de l'Albien-Néocomien, qui est une réserve stratégique protégée d'eau potable pour la région parisienne. Le programme de rebouchage des puits est établi de façon que ces zones soient rendues étanches à une invasion par des fluides géothermaux ;
- mise en sécurité du puits vis-à-vis des risques de fuite de fluides géothermaux (de l'intérieur vers l'extérieur du puits) ou de contamination des nappes via les annulaires. Il s'agira d'assurer par un rebouchage adéquat (bouchons étanches résistants aux pressions) que les fluides géothermaux ne puissent circuler ni à l'intérieur du puits ni dans les annulaires. De la même façon, on

s'assurera que les eaux de surface (ruissellement, inondation) ne puissent pénétrer à l'intérieur de l'ouvrage ou par les annulaires depuis la surface.

Une spécificité des champs géothermiques du Bassin parisien est que leur exploitation est réalisée avec réinjection du fluide géothermal : la totalité du fluide prélevé est réinjecté après extraction des calories. Contrairement aux champs pétroliers, la pression globale du réservoir reste donc quasiment inchangée. Aucune recompression importante du réservoir, pouvant influencer sur l'étanchéité future des ouvrages, n'est attendue après l'arrêt de l'exploitation.

2. Rôle des cimentations

L'étanchéité des forages dépend avant tout de l'efficacité des cimentations qui remplissent les espaces annulaires résultants de la foration. Les cimentations ont pour rôle de :

- maintenir les tubages installés dans les puits en les fixant aux terrains traversés ;
- prendre en charge une partie des contraintes mécaniques supportées par les différents cuvelages et par le tubage de production : pression des formations, pression de la colonne de fluide, surpression due à la réinjection, dilatations axiales et verticales dues aux variations de température ;
- protéger l'extrados des tubages contre les agressions chimiques facteurs de corrosion (étanchéité horizontale) ;
- rétablir, après les opérations de forage, une étanchéité verticale au droit des annulaires et d'empêcher ainsi tout écoulement vertical entre nappes superposées et/ou avec la surface ;
- participer à l'intégrité mécanique et hydraulique des colonnes de production.

Une cimentation devra impérativement garantir l'étanchéité de l'ouvrage et protéger du mieux possible son intégrité mécanique et hydraulique pendant toute la durée de sa vie. Elle participe également à l'étanchéité de l'ouvrage après son abandon. C'est un élément primordial pour la sécurité des aquifères traversés par l'ouvrage et pour le contrôle de l'environnement des puits.

Le tubage lui-même et la gaine de ciment qui l'entoure peuvent être affectés par des défauts, subir des contraintes pendant l'exploitation et se détériorer au fil du temps en perdant leur étanchéité :

- le tubage peut se percer sous l'effet de la corrosion, perdant ainsi son étanchéité initiale ;
- le ciment peut avoir été mal installé dans l'annulaire, ou de mauvaise qualité ou se dégrader au fil du temps. Un passage de fluides, même très lent, peut être suffisant pour accélérer une dégradation de l'étanchéité ;
- l'adhérence du ciment avec le tubage et avec les formations (qualifiée de bonding) peut également être de mauvaise qualité (présence d'un micro-annulaire) ou se dégrader au fil du temps par suite de contraintes mécaniques.

Inversement, les formations encaissantes (particulièrement les formations argileuses) peuvent fluer, se resserrer sur la gaine de ciment et améliorer de la sorte son étanchéité.

On peut considérer qu'il existe six zones annulaires distinctes, qui participent et ont un rôle dans l'étanchéité finale d'un forage. Chacune de ces zones a une perméabilité propre. La zone dont la perméabilité sera la plus forte donnera le niveau d'étanchéité final de l'ensemble. De l'extérieur vers l'intérieur de l'ouvrage, on trouve :

- les formations naturelles : il s'agit des couches de perméabilité variable traversées par le forage ;
- les formations naturelles plus ou moins remaniées par l'action de foration. Les effets mécaniques résultant des actions de forage (vibrations, frottements du train de tiges, pressions hydrauliques, décompression des formations) peuvent engendrer des micro-fracturations ou des déstructurations de la roche dans un rayon variable autour du trou foré. La porosité initiale des formations situées dans cette zone peut être augmentée ;
- le contact entre le terrain naturel et le ciment. Ce contact peut être constitué par un cake (résidus de la filtration des boues de forage) d'épaisseur variable ou/et constituer un micro-annulaire en cas de mauvaise adhérence du ciment ;

Nota : les terrains argileux ont tendance à fluer au cours du temps en se resserrant sur l'espace annulaire du forage. Cet effet concourt à améliorer l'étanchéité de l'annulaire dans le temps en favorisant une meilleure adhérence entre terrain et ciment.

- le ciment proprement dit, qui a lui-même une porosité définie et peut être fracturé par des efforts mécaniques transmis par le tubage ;
- le contact entre le ciment et le tubage. Ce contact peut être franc ou présenter un micro-annulaire en cas d'adhérence insuffisante du ciment ou par le jeu des effets mécaniques transmis par le tubage. Le contact peut également être influencé par la présence d'un revêtement de protection du tubage (coating).
- le tubage en acier qui peut avoir subi certains effets de la corrosion (dépôts, percements) ou des contraintes mécaniques (variation de température et de pression).

Dans le cas d'un abandon de forage, on rajoutera deux zones internes :

- un nouveau contact entre acier et ciment ;
- le remplissage intérieur du tubage par le ciment.

Les ciments Portland classiquement utilisés dans les forages pétroliers et géothermiques ont une perméabilité résultante inférieure à 0,01 milliDarcy (i.e. très faible). Mais cette perméabilité peut être largement augmentée par les effets d'un mauvais placement (channeling), par une adhérence insuffisante (retrait) et par des fracturations ou fissurations liées à des stress mécaniques, thermiques, et à des altérations chimiques.

On peut donner des propriétés « gonflantes » à un ciment en incluant un peu de bentonite pré-hydratée dans l'eau de mixage servant à la fabrication du laitier (4 à 8 % en volume). Le ciment augmentera légèrement de volume en séchant, permettant une

meilleure adhérence (ou bonding) au détriment toutefois d'une légère perte de la résistance mécanique.

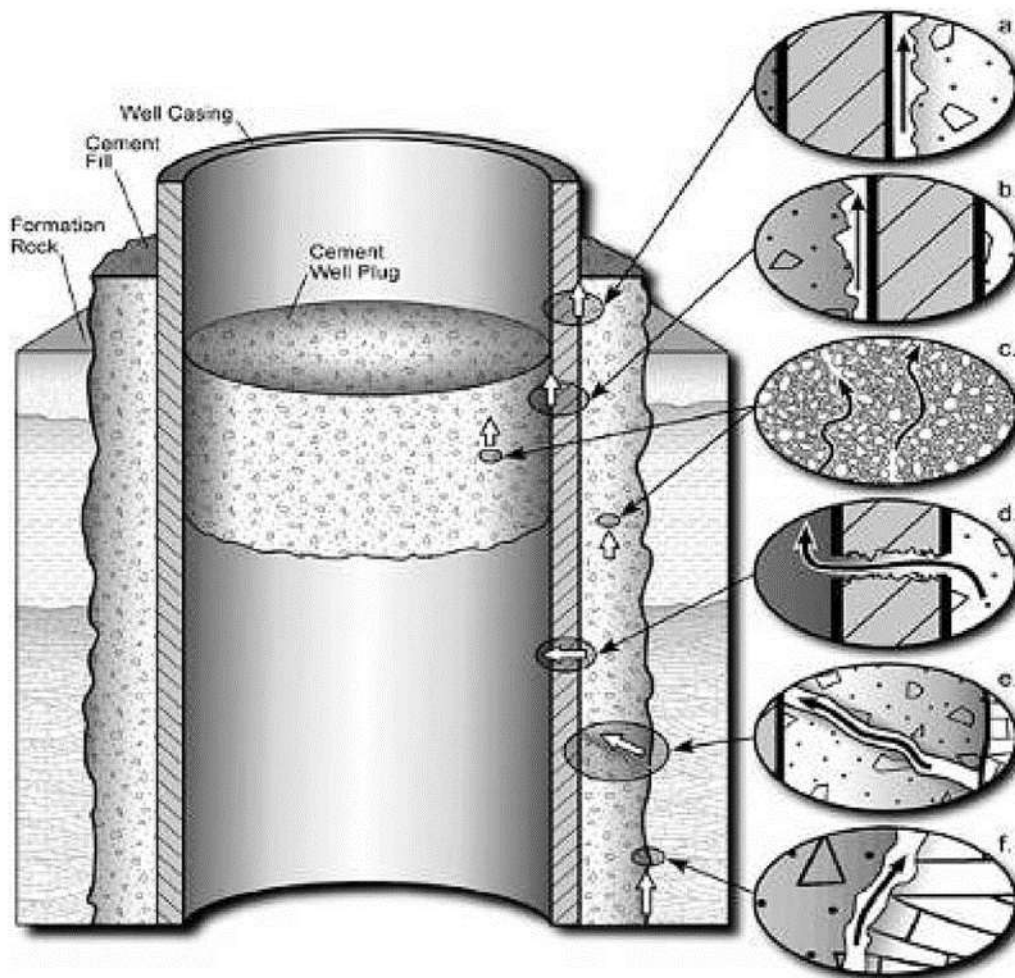


Illustration des différentes possibilités de migration des fluides dans et autour d'un tubage cimenté (d'après Gasda et al., 2004)

Mauvais accrochage du ciment sur le tubage.

Formation d'un micro-annulaire (bonding défectueux)
Retrait du ciment au séchage, effets mécaniques

Idem à l'intérieur du tubage pour un bouchon de fermeture.

Ciment de mauvaise qualité.

Porosité trop importante, fissuration et fracturation
Pollution du laitier par la boue de forage

Tubage percé (DV, corrosion) ou déboité.

Ciment endommagé

Fracturation mécanique

Mauvais accrochage du ciment sur les formations.

Cake trop épais, retrait du ciment, effets mécaniques

3. Vieillissement des tubages et des ciments

Le vieillissement des tubages et des ciments est provoqué par de nombreux phénomènes mécaniques (stress thermique), biologiques (développement bactérien) et chimiques : attaque par les sels (présence de sulfates), attaque par les gaz acides dissous dans l'eau (CO_2 , H_2S), processus de carbonatation, pénétration des chlorures. Après abandon, la vitesse de vieillissement de l'ensemble tubage/ciment dépendra principalement de la possibilité qui sera laissée aux gaz et aux fluides de migrer dans et autour de ces matériaux.

3.1 Corrosion des aciers

Dans des conditions normales, un acier enrobé dans un matériau cimentaire est naturellement protégé des risques de corrosion par un phénomène de passivation. Ce dernier résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$ (dite de passivation). Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant l'acier. La présence de Portlandite dans le ciment induit un pH élevé (de l'ordre de 12 à 13) de sa solution interstitielle. Le cuvelage est protégé tant qu'il se trouve dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13,5.

Deux principaux phénomènes peuvent, dans certaines conditions, détruire cette protection et initier la corrosion des cuvelages en acier :

- la carbonatation du ciment (annulaire et/ou bouchon) par adsorption du CO_2 .
- la pénétration des ions chlorures jusqu'au niveau du cuvelage.

La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers agents est fonction de l'humidité ambiante, de la porosité du ciment et de la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou des liquides agressifs.

La carbonatation

Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la dissolution de la Portlandite du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe la réaction d'oxydation à la surface du cuvelage.

L'action de chlorures

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du ciment et atteindre le cuvelage. Les conséquences sont la dépassivation et la corrosion de l'acier par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydo-réduction :



Cette réaction est d'abord ponctuelle (corrosion par piqûres), puis généralisées à toute la surface (corrosion généralisée par piqûres).

La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau de l'acier atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5% par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le ciment est carbonaté.

Effets de la corrosion

Le développement de la corrosion de l'acier peut provoquer par gonflement une poussée au vide sur le ciment d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le ciment qui peuvent être supérieures à sa

résistance en traction). Les conséquences pourraient être des éclatements localisés et des formations de fissures, pouvant être préjudiciables pour l'étanchéité du puits.

3.2 Altération des ciments

Les processus d'altération présentés ci-après ne concernent que les ciments de puits composés essentiellement de Portlandite (Ca(OH)_2 , ou CH) et de silicates de calcium hydratés $((\text{CaO})_x(\text{SiO})_y(\text{H}_2\text{O})_z$, ou C-S-H).

Attaque par les sels

Les attaques par les sels sont essentiellement dues à la présence de sulfates dans la saumure saturant la couche aquifère. Les sulfates réagissent avec les matériaux cimentaires selon deux réactions chimiques :

- combinaison des ions sulfates contenus dans l'eau agressive avec les ions calcium (libérés durant l'hydratation du ciment) pour former du gypse ;
- combinaison des ions sulfates et aluminates de calcium hydratés pour former de l'ettringite.

Dans les deux cas, les phases secondaires formées (gypse et ettringite) peuvent causer une expansion, voire un endommagement de la matrice cimentaire.

L'expansion qualifie le phénomène d'accroissement de volume de la matrice dû à la néoformation de minéraux dont le volume molaire est plus grand que ceux qu'ils remplacent. Cette altération physique peut augmenter d'autant plus l'altération chimique : l'expansion peut provoquer l'apparition de micro-fissures qui augmentent la porosité et donc la pénétration des espèces réactives au sein du ciment et qui fait chuter les propriétés mécaniques du ciment.

Attaque acide

L'introduction d'un milieu acide (gaz acides H_2S , CO_2 ... dissous dans l'eau) au sein d'un milieu cimentaire basique (pH normalement supérieur à 12,5) provoque un déséquilibre thermochimique entre le fluide et les minéraux.

Les conséquences de ce déséquilibre sont classiquement la dissolution de la portlandite et la décalcification des silicates de calcium. Ces réactions entraînent l'augmentation des paramètres hydrauliques (porosité, perméabilité) et la diminution de la résistance du matériau.

Cas particulier de la carbonatation

Lorsque du CO_2 se trouve en solution, environ 1% du CO_2 réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique H_2CO_3 pouvant ensuite réagir avec la matrice cimentaire. Cette réaction se nomme la carbonatation. Elle se décompose en deux étapes successives :

- lixiviation des minéraux de la matrice cimentaire par les protons produits par dissolution-dissociation du CO_2 dans l'eau. Ceci conduit notamment à la libération d'ions Ca^{2+} ;
- combinaison entre le calcium ainsi libéré avec les ions CO_3^{2-} de l'acide pour former du carbonate de calcium solide.

Par ailleurs, si le CO_2 est en excès dans le milieu, la calcite néoformée peut être transformée en bicarbonate de calcium ($\text{Ca(HCO}_3)_2$), très soluble dans l'eau. Il en découle un accroissement de la porosité matricielle. Simultanément, le bicarbonate de calcium peut réagir avec la Portlandite (Ca(OH)_2) pour reformer de la calcite et de l'eau.

L'intensité de l'attaque chimique dépend de la qualité du ciment, de la concentration en dioxyde de carbone et surtout des conditions aux expositions extérieures.

Les résultats de carbonatation peuvent être avantageux ou défavorables. En effet, les carbonates étant généralement moins denses, plus rigides et plus résistants que les minéraux cimentaires qu'ils remplacent, la carbonatation a, dans un premier temps, tendance à réduire la porosité et la perméabilité, ainsi qu'à augmenter les caractéristiques mécaniques du ciment. Cependant, une carbonatation continue peut causer une réduction de l'alcalinité de la pâte de ciment (jusqu'à des valeurs de pH inférieures à 5), ce qui peut avoir pour conséquence la lixiviation du matériau. De plus, sous ces conditions, le ciment ne remplit plus son rôle de passivation de l'acier du cuvelage.

4. Réglementation et procédures

La fermeture des forages géothermiques relève de la même réglementation et des mêmes pratiques que celles appliquées aux puits d'hydrocarbures. Les mesures d'abandon sont définies par des textes réglementaires et techniques (Code Minier, Loi sur l'Eau), notamment par le Décret n°2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers et par le Décret n°2000-278 du 22 mars 2000, modifiant le Décret 80-331 du 07 mai 1980. Il introduit un Titre "Recherche par Forage, Exploitation de Fluides par Puits, Traitement de ces Fluides" dans le Règlement Général des Industries Extractives qui se substitue au Titre "Forage" (Article 49 - Fermeture définitive des puits).

La procédure détaillée, décrite par le Maître d'Ouvrage dans le programme d'abandon, est préalablement proposée à la DRIEAT pour approbation, conformément à l'arrêté d'exploitation qui la prévoit. Cette procédure reprend habituellement les recommandations du Comité des Techniciens de la Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production relative à la fermeture définitive des puits pétroliers. Ces règles précisent en particulier :

- l'isolement du découvert et des niveaux réservoirs: un premier bouchon de ciment doit être placé de part et d'autre du sabot du tubage de production, à cheval sur le réservoir et la partie inférieure de ce cuvelage ;
- l'isolement complémentaire, à l'intérieur du cuvelage, au droit des niveaux aquifères stratégiques de l'Albien et du Néocomien : un bouchon de ciment doit couvrir ces niveaux et déborder de 50 m de part et d'autre des épontes de ce système aquifère ;
- l'obligation de placer un bouchon de ciment sur la tête des liners et des coupes de tubage (discontinuité). Un bouchon de ciment de 100 m de hauteur doit être mis en place au niveau et de part et d'autre des réductions de diamètre ;
- le bouchage de surface : un bouchon de ciment sera mis en place entre 100 m de profondeur et la surface (fond de cave) ;
- la procédure pour tester les bouchons après leur mise en place : les bouchons doivent être testés hydrauliquement à 20 bar (test en pression depuis la surface), et mécaniquement par application d'un poids de 5 tonnes sur le sommet du bouchon de ciment.

Il est indispensable de connaître parfaitement l'état du cuvelage avant de procéder aux opérations d'abandon. Pour ce faire, un diagnostic de l'état du puits doit être réalisé préalablement aux opérations de fermeture. Il sert à établir la liste des opérations nécessaires au processus d'abandon. Le plus souvent, ce diagnostic comporte un curage du puits, suivi par une recherche d'éventuelles perforations du cuvelage (diagraphies de calibrage, diagraphies acoustiques, outils électromagnétiques, tests de pression, traçages) et de niveaux de pressions anormales dans les annulaires.

Les travaux de fermeture font l'objet d'un rapport de bouchage qui indique, avec précision, le déroulement séquentiel des opérations, la recherche des fuites et les moyens utilisés pour le

faire, la position des bouchons, leurs compositions et les contrôles effectués. Un schéma détaillé de la structure du puits abandonné est fourni.

En surface, les travaux de remise en état des sols sont proposés par l'opérateur dans un dossier qui est soumis à la consultation des services administratifs concernés. Ce dossier décrit l'état de la tête de puits à l'issue de l'abandon et indique l'usage des sols envisagés par la suite. Des travaux spécifiques peuvent être prescrits lorsque des contraintes environnementales particulières sont attendues. Lorsque l'accès au site est ultérieurement rendu impossible par de nouveaux aménagements, cette contrainte doit être inscrite, évaluée et si nécessaire prise en compte dans le programme de rebouchage.

5. Cas particuliers

Comme on l'a vu plus haut, les programmes de travaux de bouchage d'un puits doivent être transmis à la DRIEAT qui peut demander les compléments d'information ou les modifications qu'elle juge nécessaire. Certains cas spécifiques ne sont en effet pas abordés dans les textes ou demandent l'application de procédures particulières. On peut citer :

- les zones de perforations, DV ou autres équipements spécifiques intégrés aux cuvelages induisant des faiblesses mécaniques. Ces zones doivent être traitées de façon particulière (selon recommandations de la DRIEAT) ou peuvent être considérées comme une discontinuité du cuvelage. Dans ce dernier cas, comme pour une réduction de diamètre, l'obligation est de placer un bouchon de ciment de 100 m de hauteur au niveau et de part et d'autre de la zone concernée ;
- à la demande d'un Maître d'Ouvrage soucieux d'éviter tout désordre à long terme ou en raison d'une détérioration globale importante des cuvelages, le puits peut être rempli sur toute sa hauteur par du ciment. Dans la partie basse des puits où le cuvelage est unique, cette façon de procéder est généralement plus fiable car l'intérieur du cuvelage est totalement cimenté et obstrué. Elle est également plus onéreuse ;
- lorsque des tubages télescopés en surface (0-100 m) apparaissent peu ou mal cimentés, il peut parfois s'avérer nécessaire d'extraire (après coupe ou sur-forage) un ou plusieurs de ces tubages afin de garantir l'efficacité du bouchon de surface et une meilleure protection des aquifères superficiels. A défaut de pouvoir extraire les tubages après la réalisation d'une coupe, l'annulaire concerné sera cimenté par injection sous pression (squeeze) au travers de la coupe avant la mise en place du bouchon de surface.

Trois autres situations spécifiques peuvent être envisagées :

1/ Les forages rechemisés : la spécificité de ces forages est de disposer de colonnes télescopées plus nombreuses, couvrant généralement toute la hauteur du puits. La protection du puits est théoriquement mieux assurée par ces colonnes ; par contre, l'accès aux différents annulaires et leur contrôle est rendu difficile sinon impossible.

Lorsque la cimentation des annulaires est de bonne qualité, l'abandon du puits peut être réalisé selon les procédures standards. Mais quand un ou plusieurs annulaires montrent une absence partielle ou totale de ciment, ou présentent des défauts d'étanchéité, la DRIEAT peut recommander, préalablement aux travaux d'abandon, de faire réaliser des opérations spécifiques visant à améliorer la situation.

Parmi ces travaux, on peut citer : le retrait des tubages ou des éléments de tubage endommagés et l'injection sous pression de ciment. Le retrait de la colonne peut se faire

par coupes successives ou par sur-forage de l'annulaire. Du ciment peut être injecté sous pression (squeeze) au niveau de la coupe du tubage, si celui-ci n'a pas pu être extrait ou par perforations si la profondeur d'intervention permet de réaliser cette opération.

2/ Les annulaires restreints : les colonnes installées dans des annulaires restreints disposent, par construction, d'une gaine de ciment réduite, donc potentiellement moins efficace. Ces colonnes peuvent faire l'objet d'un traitement particulier s'il apparaît que leur cimentation est insuffisante pour garantir l'étanchéité à long terme de l'ouvrage :

- par la mise en place de bouchons spécifiques positionnés de façon à mieux garantir l'étanchéité finale du puits ;
- ou par un remplissage complet au ciment de l'ensemble de la zone concernée par l'annulaire restreint.

3/ Les forages avec complétion de captage (Albien-Néocomien) : ces forages disposent d'équipements de captage spécifiques (colonne de suspension, crépines, massif de gravier) installés au niveau du réservoir. Le retrait de ces équipements étant rarement possible, il convient de procéder à un rebouchage complet et soigneux du réservoir et de la complétion (entre le fond des crépines et le sommet de la colonne de suspension) avant d'appliquer les procédures normales d'abandon.

Pour ce faire, il est proposé qu'un bouchon de ciment, correspondant à minima au volume total externe de la zone concernée (réservoir + colonne de production), soit injecté sous pression (10 bar) en tête de complétion. Après séchage, le bouchon est arasé jusqu'en tête de la colonne de suspension, puis testé à 20 bar. Si le débit de fuite observé à cette pression est supérieur à 100 l/mn, un nouveau bouchon devra être injecté sous pression. Dans le cas contraire, un bouchon de 50 m sera installé en tête de la complétion et la procédure d'abandon poursuivie selon le programme standard.

6. Accès à l'ouvrage après abandon

A la fin de l'opération d'abandon, la tête de puits résiduelle est généralement constituée d'une bride de base située en bas de la cave. Cette bride peut soit être laissée en place en la fermant par une plaque pleine soudée ou boulonnée, soit être arasée pour laisser apparaître les différents annulaires concentriques.

Dans les deux cas l'étanchéité de la cave doit être assurée pour interdire toute possibilité de passage vertical de fluide le long du forage ou par ses annulaires. Généralement, la cave est remplie de béton. Mais lorsque de nouveaux ouvrages de remplacement sont envisagés sur le même site, il est parfois préférable que l'accès à l'ancien puits reste possible pour permettre son observation et toute intervention ultérieure qui pourrait s'avérer nécessaire.

Lorsqu'un site géothermique est définitivement abandonné, l'accès à l'ancien puits peut être rendu impossible par de nouveaux aménagements. Dans ce cas, l'existence du puits abandonné doit impérativement être prise en compte par les aménageurs qui ne devront en aucun cas intervenir sur la tête de puits existante ou la modifier sans une autorisation préalable de la DRIEAT.



Avril 2019

Version modifiée le 27 septembre 2021

FICHE TECHNIQUE 044

CRITERES QUALITATIFS D'ANALYSE DES DIAGRAPHIES DE CONTROLE DE CIMENTATION (METHODES SONIQUES ET ULTRASONIQUES)

Cette note technique vient en complément de la note 072 " Contrôles de cimentation soniques et ultrasoniques ". Elle propose de déterminer des critères qualitatifs d'analyse des diagraphies soniques (CBL-VDL) et ultrasoniques (USIT, URS, CAST, IBC, ...) utilisées pour le contrôle des cimentations de tubages des forages géothermiques profonds. L'objectif est d'obtenir des interprétations quantifiées, moins suggestives et plus homogènes que celles le plus souvent proposées pour caractériser la qualité de la cimentation des ouvrages, et de rendre possible des analyses comparatives entre puits.

1. Données utilisées et éléments influençant les mesures

L'évaluation des critères s'effectue à partir du traitement des données numériques (fichiers aux formats Excel, *.las, *.dlis ou tous fichiers ASCII) issues des diagraphies soniques et ultrasoniques de cimentation. Les données suivantes sont utilisées :

- profondeur de la mesure en mètre ;
- diagraphies soniques :
 - valeurs du temps de transit (en μ s) entre l'émetteur du signal et le récepteur 3' de l'outil ;
 - valeurs des amplitudes (en mV) du signal sur le récepteur 3' de l'outil;
- diagraphies ultrasoniques :
 - valeurs des impédances (en MRayl) minimales, moyennes et maximales du matériau dans l'annulaire.
 - données concernant les taux de remplissage.

Le pas d'enregistrement de ce type de diagraphies est le plus souvent de 0,1524 m (6 pouces, soit environ 6,5 mesures par mètre). Certaines diagraphies peuvent toutefois atteindre un pas de 0,025 m (soit 40 mesures par mètre). Pour en réduire le nombre et/ou pour limiter un bruitage trop accentué, les données brutes analysées sont lissées avant extraction en utilisant une moyenne mobile centrée sur la valeur extraite. Ce type de lissage affecte les valeurs extrêmes (minimum et maximum) mais n'a pas d'effet sur les valeurs moyennes. **Un lissage avec un pas de 1 m** (moyenne mobile de ± 1 m centrée sur le point de mesure extrait) a été retenu dans cette note comme référence pour les analyses.

De nombreux éléments peuvent influencer les mesures. Il est donc important d'aborder les résultats fournis par les diagraphies avec beaucoup de prudence et de compléter l'analyse numérique par une évaluation critique des enregistrements fournis. Les paramètres utilisés pour le calage des diagraphies doivent être systématiquement transmis en même temps que les données mesurées.

Éléments pouvant perturber la mesure du temps de transit :

- qualité et homogénéité du fluide de remplissage dans le puits ;
- forte variation de la température dans le puits ;
- excentration de l'outil de mesure dans le tubage investigué ($> 0,2''$) ;
- saut de phase, mauvais pointé de phase.

Éléments pouvant perturber les mesures d'amplitudes (diagraphies soniques) :

- évolutions importantes et rapides du temps de transit ;
- stress mécaniques, hydrauliques ou thermiques trop précoces sur le tubage, temps de prise du ciment insuffisant ;
- nature du laitier (faible densité, rétractation au séchage, relargage d'eau de fabrication).
- micro-annulaires et phénomènes de chenalisation.
- pertes partielles ou totales de laitier en fin de chasse (mouvement retour) ;
- présence d'un revêtement de protection sur l'extrados des tubes (coating ou peinture).

Éléments pouvant perturber les mesures d'impédance (diagraphies ultrasoniques) :

- qualité et homogénéité du fluide de remplissage dans le puits ;
- excentration de l'outil de mesure ;
- variations excessives de la géométrie de l'annulaire : sur ou sous-diamétrage, ovalisation ;
- centrage défectueux du tubage investigué, annulaire trop excentré (offset) ou gaine de ciment insuffisante (annulaire restreint) ;
- qualité rhéologique des fluides déplacés dans l'annulaire (boue, spacer, laitier), contraste insuffisant de la densité des matériaux ;
- défauts ou anomalies opératoires pendant la cimentation : à-coups de débit, arrêt-reprise de l'injection ;
- très gros diamètres du tubage (au-delà de $13\frac{3}{8}$) ;
- paramètres de calage, sensibilité des outils de mesures.

2. Analyse des diagraphies soniques

2.1. Analyse du temps de transit des ondes acoustiques

Dans une première étape, l'analyse du temps de transit (Transit Time ou TT) des ondes acoustiques permet de vérifier la qualité de la diagraphie sonique.

Le temps de transit correspond au temps le plus court mis par l'onde sonore pour parcourir la distance entre l'émetteur et le récepteur de l'outil. Outre les caractéristiques géométriques de

l'outil de mesure (diamètre, écartement entre émetteur et récepteur, qualité du centrage), il varie principalement en fonction du diamètre intérieur du tubage et de la vitesse acoustique du fluide de remplissage.

Le temps de transit mesuré doit être proche du temps de transit théorique et rester raisonnablement stable sur toute la hauteur cimentée. Le critère d'analyse proposé est basé sur la valeur des écarts du temps de transit mesuré par rapport à la moyenne des mesures. Un écart ne dépassant pas **5 µs** correspond généralement à une diagraphie de bonne qualité (réf. US-EPA Environmental Protection Agency). Sans justification particulière, un écart de plus de 10 µs peut conduire à ne pas valider la diagraphie.

Ce critère est sensible au lissage des données. On trouvera ci-après les valeurs du temps de transit moyen obtenues sur une même diagraphie en utilisant différentes valeurs de lissage. Comme attendu, le niveau de lissage a un effet optimiste sur le résultat :

Données brutes avec un pas de mesure de 0,025 m : TT moyen = 9,5 µs

- **lissage avec un pas de 1m (référence) : TT moyen = 8,0 µs**
- lissage avec un pas de 2 m : TT moyen = 7,5 µs
- lissage avec un pas de 5 m : TT moyen = 7,0 µs
- lissage avec un pas de 10 m : TT moyen = 6,7 µs

2.2 Analyse de la qualité de l'adhérence (indice CBL)

L'analyse de la qualité de l'adhérence du ciment est faite à partir de la diagraphie classique de type CBL, en utilisant la méthode dite du "Bond Index" (BI) proposée par la société Schlumberger.

Sur le log analysé, le BI est calculé en utilisant :

- la valeur de l'amplitude du signal sonore réfracté sur le tubage non cimenté, section dite de " free-pipe " (FP correspondant à un BI de 0%) ;
- la valeur de l'amplitude du signal pour une adhérence maximale du ciment sur le tubage, ou " Bond " (BI100% correspondant à un BI de 100%) ;
- la valeur de l'amplitude au point de mesure (AMPL) ;

et la relation suivante :

$$BI = (\log (FP / AMPL) / \log (FP / BI100\%)) * 100$$

Pour la valeur d'amplitude du signal correspondant au " free-pipe " :

- on utilisera le niveau d'amplitude maximale observé sur une section du tubage réputée non cimentée.
- à défaut, on appliquera l'amplitude théorique de " free-pipe " du tubage analysé, soit 62 mV pour un tubage 7", 51 mV pour un tubage 9"5/8 et 42 mV pour un tubage 13"3/8.

Pour la valeur de " Bond " (BI 100%), l'amplitude du signal est généralement inférieure à 7 mV. On utilisera :

- par défaut, l'amplitude minimale du signal relevée sur le log pour les sections cimentées ;
- de préférence, l'amplitude moyenne des 30 m de tubage les mieux cimentés ;
- ou l'amplitude directement choisie en fonction de la densité du laitier : 3,4 mV (laitier lourd), 4,7 mV (laitier allégé) et 7 mV (laitier super-allégé) ;

On observe les valeurs de référence suivantes selon le type de laitier utilisé:

- niveau de Bond Index pour laitier lourd : 80%-100% (amplitude généralement inférieure à 10 mV) ;
- niveau de Bond Index pour un laitier allégé ou super-allégé : 60%-70%-80% (amplitude généralement inférieure à 20 mV) ;

Une méthode alternative est proposée par la société British Petroleum. Egalement appelée méthode des "Amplitudes Relatives", elle est beaucoup plus optimiste sur le plan qualitatif. La relation ci-dessous est utilisée en remplaçant les valeurs de " free-pipe " et de " Bond " par les valeurs des amplitudes minimales et maximales observées sur le log.

$$BI = ((FP - AMPL) / (FP - BI100\%)) * 100$$

Le tableau ci-après compare les bonds index des sociétés Schlumberger et British Petroleum pour un tubage 9"5/8 avec un " free-pipe " de 51 mV et un " Bond " de 3 mV :

Bond Index	Schlumberger	British Petroleum
BI 60%	9,3 mV	22,2 mV
BI 80%	5,3 mV	12,6 mV
BI 90%	4,0 mV	7,8 mV

Compte tenu du niveau de qualité attendu en géothermie, on appliquera systématiquement l'équation de la méthode proposée par la société Schlumberger.

Certains logs ne fournissent pas les amplitudes en millivolts mais en coups par seconde (cps). Dans un tel cas on relèvera sur le log la valeur de l'amplitude FP(cps) correspondant à la valeur de " free-pipe " du tubage et on appliquera la relation suivante :

$$\text{Amplitude(mV)} = \text{Amplitude(cps)} / \text{FP(cps)} * \text{FP(mV)}$$

Pour calculer l'indice CBL, on utilise la répartition du BI en pourcentage de la longueur de la colonne, auquel on affecte un coefficient pondérateur. Ce coefficient varie de 0 (aucune influence sur l'indice) à 10 (100% d'influence). Un BI > 80% est considéré par la société Schlumberger comme un niveau d'adhérence efficace (coefficient 10). Dans cette méthode d'analyse, les BI compris entre 80% et 60% seront également jugés acceptables mais affectés d'un coefficient plus faible (8 et 6). Il est proposé dans cette note la pondération suivante :

- Pourcentage BI 100-90% x coef 10 (adhérence efficace)
- Pourcentage BI 90-80% x coef 10 " "
- Pourcentage BI 80-70% x coef 8 (adhérence acceptable)
- Pourcentage BI 70-60% x coef 6 " "
- Pourcentage BI 60-30% x coef 0 (adhérence déficiente)
- Pourcentage BI <30% x coef 0 (pas d'adhérence)

L'indice fournit une valeur allant de 0 (adhérence nulle) à 10 (adhérence maximale) :

$$\text{Indice CBL} = \sum(BI \times \text{coef})$$

Il est directement représentatif du degré d'étanchéité horizontale déterminant la protection de l'extrados du tubage.

Nota : les logs soniques réalisés sur des tubages en gros diamètres (13"3/8 et supérieurs) sont souvent difficiles à interpréter en raison de l'amplitude plus réduite disponible pour la mesure

entre les conditions de freepipe et de bond. La présence d'un ciment allégé ($d < 1,7$) ou fortement aqueux renforce encore cette difficulté.

D'autre part, les diagraphies soniques sont particulièrement sensibles aux effets des micro-annulaires et aux phénomènes de chenalisation. Un micro-annulaire peut réduire très fortement la réponse sonique et indiquer faussement une absence d'adhérence ou de ciment. Une chenalisation se caractérise souvent par des variations importantes et rapides du niveau d'amplitude qui empêchent une évaluation pertinente de l'adhérence réelle. L'interprétation peut alors faussement conduire au constat d'une cimentation dégradée ou même à une absence de ciment.

Lorsque de tels cas sont rencontrés, il est fortement recommandé de compléter le log sonique par une mesure ultrasonique. L'interprétation conjointe des deux mesures permet en effet de déterminer les causes ayant provoquées la mauvaise réponse sonique et conduit à une interprétation plus réaliste de la situation.

2.3 Analyse de la qualité du remplissage annulaire par les diagraphies ultrasoniques (indice USIT)

L'analyse de la qualité du remplissage de l'espace annulaire par du ciment se fait à partir des valeurs d'impédance enregistrées par les logs ultrasoniques.

L'indice USIT calculé dans le cadre de cette analyse dépend de la densité des matériaux (noté "D") dans l'annulaire et de quatre différents phénomènes influant sur l'isolation verticale : taux de remplissage (noté "R"), free-pipe (noté "FP"), chenalisation (noté "C"), micro-annulaire (noté "M"). Il est estimé de la manière suivante :

1. Evaluation de la répartition de la **densité des matériaux (D)** à partir des impédances moyennes :
 - seuil de laitier lourd de densité $> 1,8$: valeur d'impédance de 4,2 MRayl par défaut;
 - seuil de laitier moyen de densité $> 1,6$: par défaut 3,3 MRayl ou la moyenne lourd-léger ;
 - seuil de laitier allégé de densité $> 1,2$: par défaut ZTCM ou 2,4 MRayl ;
 - seuil liquide : par défaut ZMUD ou seuil laitier allégé ;
 - seuil gazeux : par défaut ZTGS ou 0,3 MRayl.

$$D = (\text{lourd} \times 10) + (\text{moyen} \times 10) + (\text{allégé} \times 6)$$

ZTCM, ZMUD et ZTGS sont les sigles correspondant respectivement aux seuils ciment, boue et gaz utilisés par Schlumberger pour le paramétrage des logs.

2. Evaluation du **taux de remplissage solide (R en %)**. Le remplissage est considéré comme effectif (c'est à dire sans défaut de remplissage) lorsque l'annulaire est intégralement rempli de matériaux solides, c'est à dire lorsque la valeur de l'impédance minimale est supérieure à celle de l'impédance liquide. Le taux de contamination correspond à son inverse, soit $1-R$.
3. Un **free-pipe (FP en %)** - ou une cimentation suffisamment déficiente pour être assimilée à un free-pipe - est constaté lorsque l'impédance moyenne devient inférieure au seuil liquide. On a $FP = \text{Liquide} + \text{Gaz}$.
4. Un phénomène de **chenalisation (C en %)** est mis en évidence lorsqu'un défaut de remplissage est constaté, qu'il ne s'agit pas d'une zone de free-pipe (ou assimilée) et que, dans le même temps, la valeur de l'impédance minimale est suffisamment inférieure au seuil

liquide (écart initial par défaut 0,2 MRayl). On peut modifier cet écart pour adapter la réponse du modèle à la cartographie des impédances proposée dans les logs.

5. Un défaut de remplissage qui n'est ni un free-pipe ni une chenalisation est interprété comme étant une cimentation très faiblement contaminée. On l'assimile ici à un (pseudo) **micro-annulaire (M en %)**.
6. **L'isolation verticale (Iv en %)** est fonction du niveau de remplissage. Il est arbitrairement considéré dans cette analyse que le free-pipe (FP) et la chenalisation (C) influent négativement sur l'isolation verticale, mais que le micro-annulaire (M) est sans effet sur ce paramètre. On aura :

$$Iv = 1 - FP - C \quad \text{ou} \quad Iv = R + M$$

In fine, la qualité du remplissage va dépendre à la fois de la densité des matériaux présents dans l'annulaire et de l'isolation verticale observée, selon la relation suivante :

$$\text{Indice USIT} = D \times Iv$$

Cet indice fournit une valeur allant de 0 (qualité du remplissage annulaire nulle) à 10 (qualité du remplissage annulaire maximale). Il est représentatif du degré d'étanchéité verticale de l'espace annulaire du tubage.

On trouvera en annexe 2 un schéma conceptuel récapitulant le modèle d'analyse utilisé pour déterminer les différents niveaux de remplissage de l'annulaire (R, M, C, FP).

Nota : la société Weatherford fait parfois application d'un calage particulier de l'URS favorisant la détection des laitiers de faible densité (allégés ou super-allégés). Le niveau d'impédance des laitiers lourds peut dans ce cas être fortement sous-évalué au profit des laitiers allégés. Par contre, l'effet de chenalisation est surévalué. En ce qui concerne l'indice USIT, ce calage induit une augmentation de la notation des densités qui ne sera que partiellement compensée par l'effet de chenalisation.

3 Eléments particuliers liés à l'étanchéité structurelle des ouvrages

L'architecture des puits peut avoir une influence sur l'étanchéité des cimentations. La présence des éléments suivants doit être prise en compte :

- le ou les tubage(s) de recouvrement venant en protection de tout ou partie de la colonne de production (ou d'injection), créant une zone d'entrefer dont l'étanchéité horizontale est de ce fait mieux assurée. Les indices CBL et USIT correspondant à la section du forage en simple tubage seront donc les plus sensibles ;
- les équipements spécifiques de la colonne pouvant dégrader ponctuellement son étanchéité : DV, coupe ou perforations du tubage ;
- les formations aquifères (corrosion externe) ;
- les formations argileuses encaissantes susceptibles d'améliorer dans le temps l'efficacité de la cimentation initiale. Les diagraphies gamma-ray permettent si nécessaire de localiser ces zones.

4. Analyse qualitative des diagraphies de cimentation

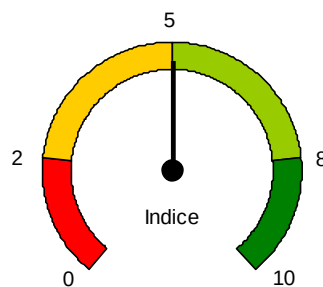
Les indices de cimentation CBL et USIT peuvent être lus indépendamment de la manière suivante :

De 0 à 2 : cimentation défectueuse. Des mesures complémentaires de diagnostic ou des interventions adaptées aux défauts de qualité observés peuvent être requises en fonction des observations effectuées.

De 2 à 5 : cimentation à problème plus ou moins sévère. Dans le cadre des contrôles périodiques réglementaires, il peut être défini un suivi renforcé ou des seuils d'alertes pouvant déclencher des mesures ou des interventions spécifiques.

De 5 à 8 : cimentation acceptable pouvant présenter quelques défauts mineurs sans gravité mais ne nécessitant pas de vigilance particulière. Application standard des contrôles périodiques réglementaires.

De 8 à 10 : cimentation de bonne à très bonne qualité. Application standard des contrôles périodiques réglementaires.



L'observation de certaines anomalies ponctuelles peut toutefois sensiblement modifier les résultats de l'analyse, par exemple :

- une cimentation localement défectueuse entre deux niveaux aquifères ;
- une cimentation défectueuse au sabot du tubage ;
- un tubage fortement dégradé, perforé ou endommagé ;
- des anomalies constatées dans le déroulement des procédures de cimentation ;
- un calage inhabituel ou anormal des diagraphies soniques et ultrasoniques.

Pour assurer une meilleure lisibilité de la qualité des cimentations, il est conseillé d'effectuer une analyse séparée des sections du forage couvertes par de multiples tubages (zones " entrefer ") à la section en simple tubage (zone " open-hole "). La qualité de la cimentation de la section en simple tubage est particulièrement importante pour maîtriser l'impact environnemental du forage : isolation verticale de l'annulaire, protection de l'extrados de la colonne de production (ou d'injection).

Il est rappelé qu'il est important de prendre en compte les résultats des analyses avec prudence et d'en faire une évaluation critique. De nombreux facteurs peuvent en effet influencer les mesures et leur interprétation.

5. Influence des pondérations

Le rôle des coefficients de pondération utilisés dans les calculs est d'impacter la note obtenue afin qu'elle soit représentative :

- pour l'adhérence (étanchéité horizontale), du niveau de protection de l'extrados du tubage ;
- pour le remplissage (étanchéité verticale), de l'isolation verticale de l'annulaire.

En ce qui concerne l'indice CBL, le choix des coefficients correspond aux niveaux qualitatifs proposés par la société Schlumberger : une adhérence est considérée comme efficace en termes d'isolation pour un BI allant de 100% à 80%. Elle se réduit ensuite pour devenir inefficace à partir d'un BI < 60% et inexistante pour un BI < 30%. En cas de cimentation avec des laitiers allégés et super-allégés, il est possible de modifier la répartition en choisissant pour l'adhérence maximale une valeur d'amplitude plus importante fonction de la densité (par exemple 7 mV pour un laitier super-allégé de densité 1.2). Dans la plupart des cas, cette correction n'entraîne toutefois qu'une faible modification du résultat final.

En ce qui concerne l'indice USIT, le choix des coefficients de pondération est avant tout basé sur l'observation. On part de la répartition des densités que l'on pondère avec le taux de remplissage, lui-même influencé par la tendance à la chenalisation. C'est un choix en partie arbitraire. Mais il quantifie le niveau d'isolation et permet des comparaisons.

Par exemple une répartition à 100% d'un laitier dense et moyen donne une notation de 10/10. Si le taux de remplissage n'est que de 80%, la note sera diminuée d'autant, soit 8/10, ce qui est qualitativement recevable. Et si la tendance à la chenalisation est de 20%, la note sera encore diminuée de 10%, soit 7,2/10.

On voit donc que, si la répartition de la densité est l'élément de base permettant de déterminer la notation, le résultat est ensuite nettement pondéré par les deux autres facteurs.

6. Evaluation du taux de remplissage annulaire

Un troisième critère important de la qualité des cimentations est le taux de remplissage de l'annulaire par le ciment. Les trois solutions présentées ci-dessous permettent d'évaluer le taux de remplissage annulaire à partir des données numériques des logs ultrasoniques USIT, IBC ou similaires.

Données CEMR :

Des données CEMR (Ratio of Cement Measurements to Total) sont proposées par Schlumberger dans les logs USIT. Elles sont calculées à partir de l'ensemble des mesures d'impédance. Selon les outils, la résolution horizontale peut atteindre jusqu'à 5° de la circonférence du tubage, ce qui correspond à l'enregistrement de 72 valeurs à chaque point de mesure. Ces valeurs font ensuite l'objet de diverses corrections et traitements avant d'être restituées dans une carte d'impédance.

Le dénombrement sur cette carte des valeurs supérieures au seuil liquide permet de déterminer le taux de remplissage CEMR.

Nota : les données MDR (Micro-Debonding Ratio) correspondent à un microannulaire sec. Elles ne doivent être considérées ni comme un matériau solide, ni comme un liquide.

Données USLGCR :

Les valeurs utilisées correspondent aux données USLGCR (Solid Liquid Gas Cement Ratio) proposées par Schlumberger dans les logs USIT de nouvelle génération et dans les logs IBC. Comme dans le mode précédent, le calcul utilise les valeurs de la carte des impédances enregistrées à chaque mesure. Il ajoute par contre un niveau de pondération supplémentaire obtenu au moyen des mesures d'atténuation flexurale. Celles-ci permettent de compenser certaines erreurs de mesure liées au tubage lui-même (interférences, variations d'épaisseur, présence de joints, ...). Ces données apportent, en théorie, une plus grande précision.

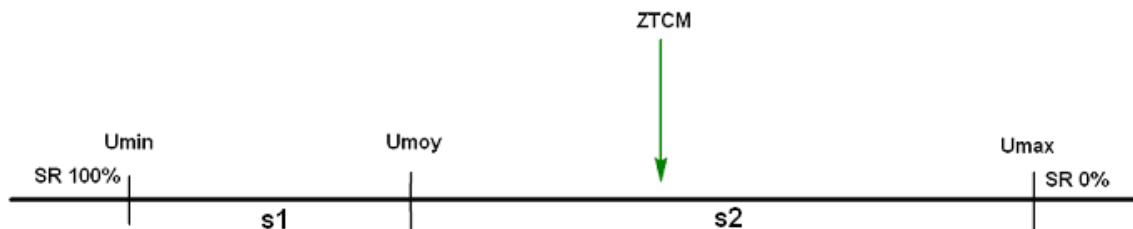
Données d'impédance :

En l'absence des données USLGCR et CEMR, il est possible d'estimer un taux de remplissage à partir des 3 valeurs d'impédances servant à l'analyse des logs ultrasoniques : impédance minimale (Umin), moyenne (Umoy) et maximale (Umax). Dans ce cas, le remplissage SR (Solid Ratio) est évalué en fonction du seuil ciment ZTCM (Acoustic Impedance Threshold for Cement) généralement indiqué dans les paramètres de calage du log.

L'estimation de la dispersion des valeurs d'impédance autour de Umoy est fondée sur l'utilisation d'une loi normale dont l'espérance est Umoy et dont l'écart type est estimé à partir des valeurs de Umin et de Umax. On aura :

- si $ZTCM \leq Umin$ SR=100%
- si $Umin < ZTCM < Umax$ SR=1-LOI.NORMAL($ZTCM; Umoy; Ecart\text{-}type; VRAI$)
- si $ZTCM \geq Umax$ SR=0%

Avec $Ecart\text{-}type = \sqrt{(Umax - Umoy)^2 + (Umoy - Umin)^2} / 3$



Les données qui doivent être récupérées dans les logs Schlumberger pour effectuer cette estimation sont les mesures d'impédance acoustique minimale, moyenne et maximale (AIMN, AIAV et AIMX) et bien sûr la valeur du seuil ciment ZTCM.

Restitution :

La restitution des données de remplissage peut être réalisée de façon graphique et numérique. Le calcul peut, bien sûr, être effectué sur tout ou partie seulement de la colonne (entrefer, open-hole, épontes entre aquifère, ...). Les valeurs les plus significatives sont :

- le remplissage moyen.
- le taux de remplissage efficace ($\geq 90\%$).
- le taux de remplissage acceptable ($\geq 80\%$).

Le remplissage moyen permet d'évaluer la qualité de l'étanchéité verticale dans la zone étudiée.

Le taux de remplissage **efficace** ($\geq 90\%$) sert de référence : il garantit l'étanchéité de l'annulaire. Le taux de remplissage **acceptable** ($\geq 80\%$) est considéré par certains comme suffisant pour assurer l'étanchéité verticale. Ce peut être effectivement le cas lorsque le secteur analysé comporte de fréquentes alternances de remplissage plus complet. L'étanchéité pourra par contre être mise en doute dans le cas d'une zone homogène.

En dessous d'un taux de 80%, on considère par contre que le remplissage est incomplet et peut permettre une circulation verticale des fluides.

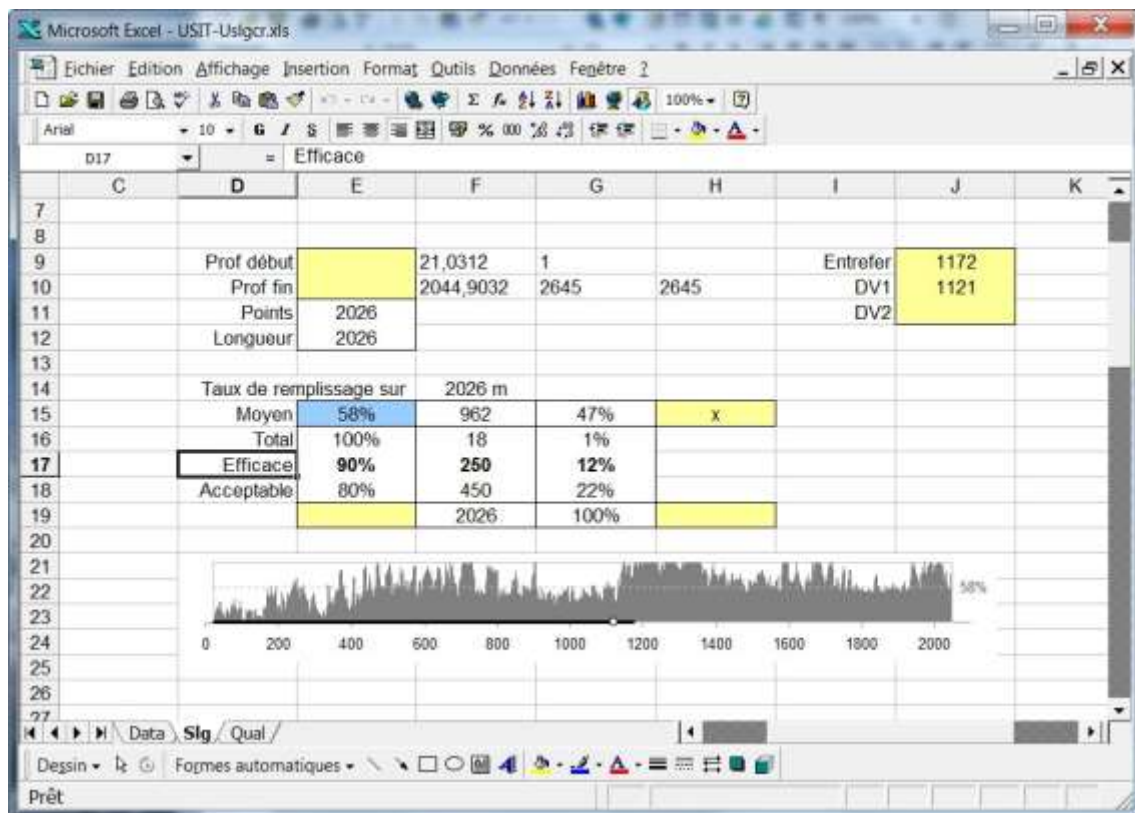
Pour une zone ciblée, l'annulaire sera considéré comme étanche lorsque il sera observé un taux de remplissage efficace ($\geq 90\%$) sur une longueur **consécutive** d'au moins 50 m.

L'exemple présenté ci-après est issu des données USLGCR d'un tubage 9"5/8 :

- le remplissage moyen de l'ensemble de la colonne atteint 58%.
- Le taux de remplissage efficace correspond à 12% de la hauteur totale (soit 250 m).
- Le taux de remplissage acceptable est de 22%, soit 450 m en longueur cumulée sur un total cimenté de 2026 m.

Le remplissage moyen de la zone open-hole (1172-2045 m) s'élève à 72%. Entre 1150 m et 1350 m on peut toutefois observer un pont de 200 m consécutif dont le taux de remplissage atteint 91%.

Sur ces bases, on peut conclure que la cimentation est de mauvaise qualité mais que, dans la zone comprise entre 1150 et 1350 m, l'étanchéité de l'annulaire est suffisante pour assurer la protection des aquifères de l'Albien et du Néocomien vis-à-vis du Dogger.



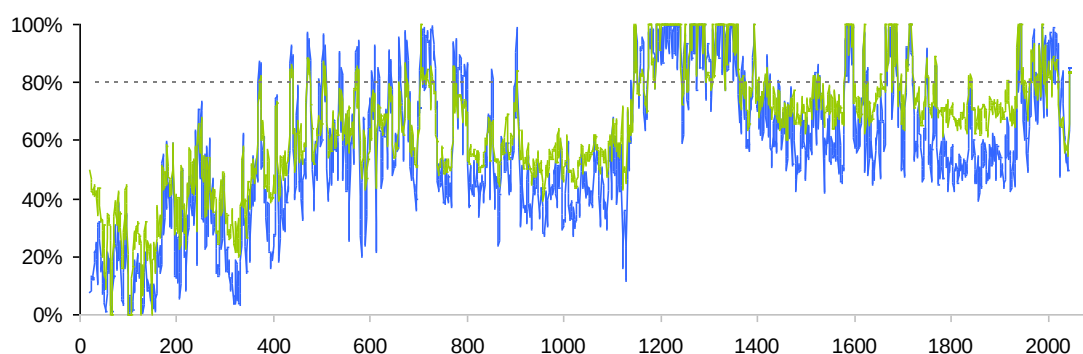
Comparatif des 3 méthodes :

La précision des résultats varie selon la méthode utilisée. On utilisera de préférence les données USLGCR (les plus précises) ou CEMR. A défaut de disposer de l'une ou l'autre de ces données, on pourra effectuer le calcul à partir du modèle basé sur les impédances. Ce modèle est sensible aux valeurs extrêmes enregistrées sur Umin et Umax. Il permet toutefois d'accéder à une estimation acceptable du taux de remplissage. Les résultats suivants sont obtenus sur le tubage 9"5/8 proposé en exemple :

Taux de remplissage	USLGCR	CEMR	Impédances
Moyenne	59%	64%	65%
Total 100%	8%	9%	9%
Efficace 90%	17%	19%	10%
Acceptable 80%	25%	28%	21%

Comparaison des 3 méthodes appliquées à un tubage 9"5/8

Le graphique ci-dessous permet de comparer les données USLGCR (en bleu) et les données modélisées à partir des valeurs d'impédance (en vert).



Analyse des volumes :

Pour affiner la compréhension de la qualité de la cimentation, l'évaluation du taux de remplissage doit être associée à un bilan des volumes mobilisés pendant les opérations de cimentation :

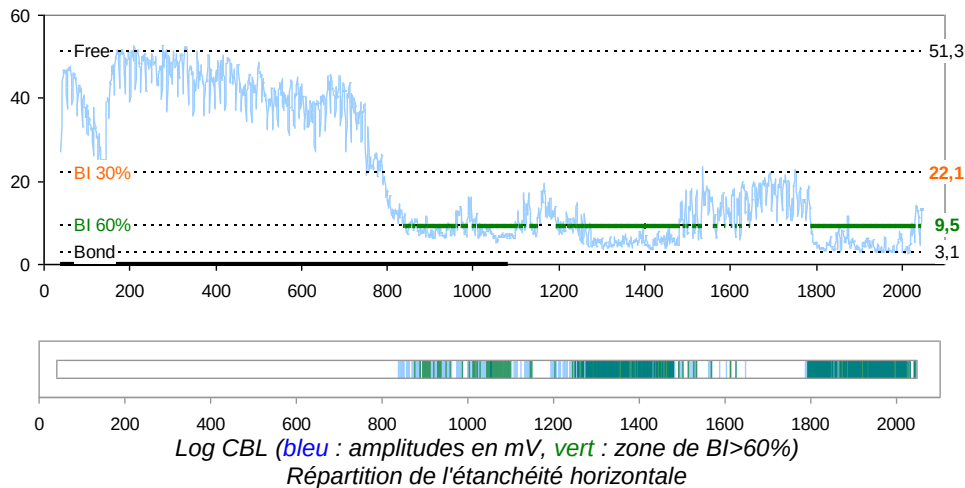
- volumes théoriques ou mesurés de l'annulaire, estimation des excès ;
- volumes pompés dans le puits : spacers, laitiers, chasse ;
- volume total récupéré en surface dans les bassins : évaluation des pertes ou des gains ;
- le cas échéant, volumes et densité de boue contaminée, de spacers et/ou de laitier récupérés en surface : évaluation de la contamination et de la chenalisation.

ANNEXE 1

EXEMPLE D'ANALYSE CONTRÔLE DE LA CIMENTATION D'UN TUBAGE 9"5/8

Les diagraphies de contrôle de type CBL-VDL (Cement Bond Log – Variable Density Log) et URS (Ultrasonic Radial Scanner) de la cimentation d'un tubage 9"5/8 sont analysées ci-après. Pour chaque diagraphie, il est présenté un log synthétique, une visualisation des étanchéités annulaires obtenues et un tableau récapitulant l'analyse des données. Les indices CBL et USIT sont calculés pour la colonne complète ainsi que pour les sections du forage couvertes par de multiples tubages ou en simple tubage.

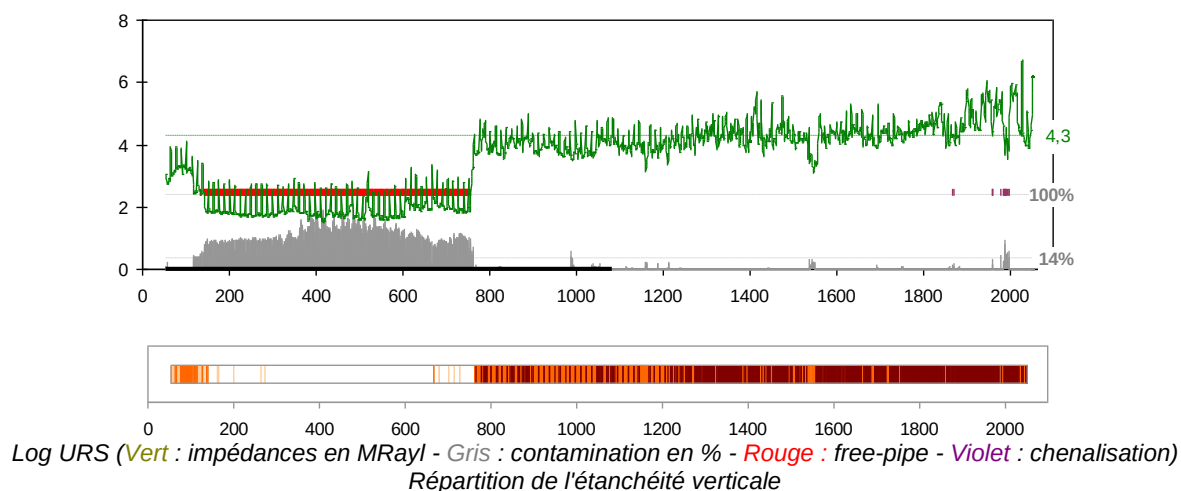
Analyse de la diagraphie CBL : le CBL enregistre une adhérence médiocre sur l'ensemble de la colonne avec une amplitude moyenne de 21,3 mV, équivalent à un Bond Index (BI) de 31%. Seulement 39% des amplitudes dépassent un BI de 60%. La partie inférieure - à partir de 797 m - bénéficie d'une meilleure adhérence avec un BI moyen de 60% (9,3 mV).



BI 0-30%	51,3 - 22,1 mV	37%	749 m
BI 30-60%	22,1 - 9,5 mV	24%	491 m
BI 60-70%	9,5 - 7,2 mV	12%	241 m
BI 70-80%	7,2 - 5,4 mV	12%	231 m
BI 80-100%	5,4 - 3,1 mV	15%	294 m
Indice CBL		3,1	2005 m

Tableau d'analyse des amplitudes sur la colonne complète

Analyse de la diagraphie URS : en ce qui concerne le log URS, la cimentation est de mauvaise qualité dans la partie supérieure, avec une zone de " free-pipe " et " assimilé free-pipe " détectée entre 135 m et 756 m. Au-delà de 756 m, l'isolation verticale de l'annulaire est par contre acquise avec à la fois la présence d'un matériau de densité élevée (4,3 MRayl en moyenne) et un très faible taux de contamination se répartissant entre une quasi absence de micro-annulaire (2%) et une rare tendance à la chenalisement (7%).



Dense > 4,2 MRayl	35%	708 m
Moyen 3,2 - 4,2 MRayl	31%	621 m
Allégé 2,2 - 3,2 MRayl	9%	173 m
Liquide 0,3 - 2,2 MRayl	25%	499 m
Gaz <= 0,3 Mrayl	0%	0 m
Free-pipe	3%	68 m
Assimilé free-pipe	22%	431 m
Chenalisation	7%	134 m
Micro-annulaire	2%	37 m
Solide	67%	1330 m
Indice USIT	4,9	2000 m

Tableau d'analyse des impédances sur la colonne complète

Une transition entre ciment lourd et ciment allégé est vaguement discernable vers 1550 m sur le log URS. Cette transition n'est pas clairement confirmée par le log CBL.

Analyse par sections : les indices CBL et USIT obtenus pour différentes sections du tubage sont fournis dans le tableau ci-après. Les indices de la section en simple tubage, qui correspondent à la partie de la colonne la plus sensible en termes d'étanchéité, seront ceux qui détermineront la qualité de la cimentation à retenir pour l'exploitation de l'ouvrage.

	Profondeur	Indice CBL (/10)	Indice USIT (/10)
Colonne complète	40-2045 m	3,1	4,9
Section à tubages multiples	40-1082 m	1,2	1,8
Section à simple tubage	1082-2045 m	5,2	9,9

Section à tubages multiples : de 40 à 1082 m, l'analyse met en évidence une cimentation de très mauvaise qualité avec un indice CBL de 1,2/10 et un indice USIT de 1,8/10. Cette zone apparaît fortement contaminée par des liquides et marquée par un phénomène de " free-pipe " ou " assimilé free-pipe " (cimentation déficiente) bien visible entre 135 m et 756 m.

Section à simple tubage : de 1082 à 2045 m, l'extrados du tubage apparaît assez mal protégé avec un indice CBL de 4,9/10 seulement. On observe par contre un excellent taux de remplissage (98%) par des matériaux de densité élevée, ainsi que l'absence presque totale de chenalisation (1%). De ce fait, l'isolation verticale de l'annulaire y est très bien assurée avec un indice USIT de 9,9/10.

BI 0-30%	51,3 - 22,1 mV	0%	4 m
BI 30-60%	22,1 - 9,5 mV	39%	379 m
BI 60-70%	9,5 - 7,2 mV	13%	125 m
BI 70-80%	7,2 - 5,4 mV	17%	164 m
BI 80-100%	5,4 - 3,1 mV	30%	292 m
Indice CBL		5,2	963 m

Tableau d'analyse des amplitudes sur la section à simple tubage

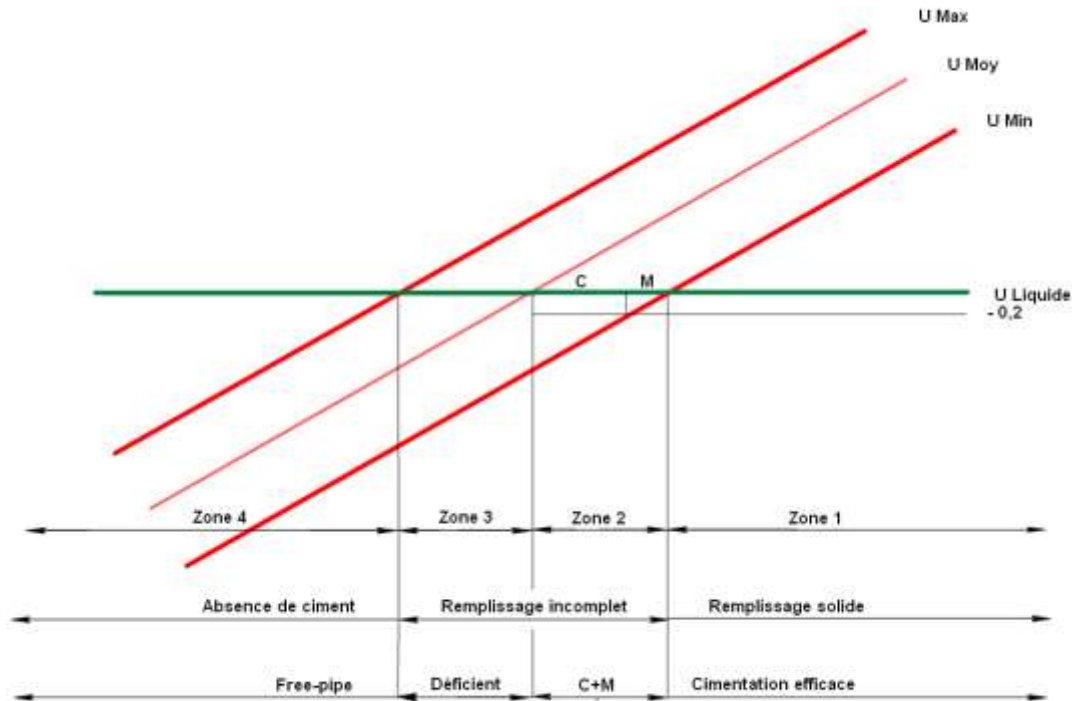
Dense > 4,2 MRayl	65%	632 m
Moyen 3,2 - 4,2 MRayl	35%	336 m
Allégé 2,2 - 3,2 MRayl	0%	3 m
Liquide 0,3 - 2,2 MRayl	0%	0 m
Gaz <= 0,3 MRayl	0%	0 m
Free-pipe	0%	0 m
Assimilé free-pipe	0%	0 m
Chenalisation	1%	8 m
Micro-annulaire	2%	15 m
Solide	98%	948 m
Indice USIT	9,9	971 m

Tableau d'analyse des impédances sur la section à simple tubage

Conclusions : dans la section en simple tubage, l'analyse des diagraphies de contrôle montre une cimentation d'un niveau moyen mais acceptable en ce qui concerne la protection externe du tubage (indice CBL 5,2/10). Elles confirment par contre une excellente isolation verticale de l'annulaire (indice USIT 9,9/10). Pour ce forage, il est donc possible d'appliquer de manière standard des contrôles périodiques réglementaires.

ANNEXE 2 MODELE D'ANALYSE DES LOGS ULTRASONIQUES

Le modèle d'analyse^(*) qui a été choisi pour quantifier le niveau de remplissage d'un annulaire à partir des valeurs d'impédance minimales (U_{min}), moyennes (U_{moy}) et maximales (U_{max}) des logs ultrasoniques est synthétisé dans le schéma ci-dessous :



Le remplissage est évalué en se basant sur l'impédance du seuil liquide ($U_{liquide}$). Quatre zones sont déterminées :

- **Zone 1** : zone de cimentation efficace correspondant à un remplissage complet par des matériaux solides ($U_{min} > U_{liquide}$). La qualité de la cimentation est fonction de la densité du remplissage.
- **Zone 2** : correspond à une zone de remplissage incomplet ($U_{moy} > U_{liquide}$ et $U_{min} < U_{liquide}$). Dans cette zone le matériau solide est majoritairement présent mais plus ou moins contaminé par des matériaux liquides. La valeur choisie pour différencier les niveaux de contamination est fonction de la quantité de liquide observée : il s'agit d'une très faible contamination (assimilée à un micro-annulaire) si U_{min} est supérieur à la limite choisie, d'une chenalisation dans le cas contraire. Par défaut, cette limite correspond au seuil liquide diminué de 0,2 MRayl. Cet écart peut être modifié de façon à ajuster le résultat du modèle à la carte des impédances présentée dans le log.
- **Zone 3** : correspond également à une zone de remplissage incomplet ($U_{min} > U_{liquide}$ et $U_{moy} < U_{liquide}$). Contrairement à la zone précédente, celle-ci est majoritairement constituée de matériaux liquides. La cimentation y est considérée comme déficiente et assimilée à du free-pipe.
- **Zone 4** : zone de free-pipe. Elle correspond à une absence complète de ciment ($U_{max} < U_{liquide}$). Le remplissage annulaire est uniquement constitué de liquide ou/et de gaz.

 (*) Ce modèle propose une interprétation simplifiée des logs ultrasoniques. Il n'a pas pour objectif de se substituer aux analyses beaucoup plus complexes réalisées par les opérateurs de diagraphies. Il fournit par contre des résultats quantifiés qui facilitent les évaluations qualitatives et les comparaisons.

Les mesures d'atténuation flexurale fournissent une meilleure discrimination des matériaux de faible densité (solides, liquides, gazeux). Elles permettent, lorsqu'elles sont disponibles, de mieux évaluer les laitiers allégés ou fortement contaminés. Lorsqu'une plus grande précision est souhaitée, il est donc suggéré d'utiliser les valeurs du "cement ratio" (USLGCR ou à défaut CEMR) calculés par Schlumberger.

Terminologie utilisée :

	Remplissage	Matériau	Solide
Cimentation efficace (R)	Remplissage complet	Matériau solide	100%
Micro-annulaire (M)	Remplissage quasi complet	Très légère contamination	90-100%
Chenalisation (C)	Remplissage partiel	Majoritairement solide	50-90%
Assimilé free-pipe (FP)	Remplissage inconsistant	Majoritairement liquide	0-50%
Free-pipe (FP)	Aucun remplissage	Matériau liquide ou/et gazeux	0%

Les termes "micro-annulaire", "chenalisation" et "free-pipe" sont utilisés dans cette analyse pour renseigner des niveaux de remplissage. Ils ne correspondent donc pas nécessairement à la stricte description des phénomènes correspondants.

Annexe 5

Déviations



Version validée le 24 novembre 2015
Version modifiée le 27 septembre 2021

FICHE TECHNIQUE 051

PARAMETRES DES DEVIATIONS ET DESCRIPTION DES MOYENS MIS EN OEUVRE POUR LES REALISER

Lorsque des opérations de déviation sont engagées sur un puits, les paramètres utilisés pour déterminer la trajectoire doivent être précisément décrits dans les programmes de forage ainsi que les moyens qui devront être mis en place pour réaliser la dite déviation.

Cette note récapitule les informations qui doivent être fournies dans les programmes de forage ainsi que les différents formats possibles de cette mise à disposition

1. Coordonnées géographiques

Les coordonnées géographiques métriques (X et Y, éventuellement Z) des points de référence suivants doivent être fournies :

- coordonnées de la tête de puits ;
- coordonnées du point d'impact au toit du réservoir (Cible) ;
- coordonnées du point d'impact en fond de puits (TD).

Ces coordonnées seront produites pour chacun des ouvrages concernés par le projet (doublet ou triplet). Un graphique présentant la disposition géographique des ouvrages devra être fourni ou, à défaut, pouvoir être établi à partir des données transmises.

Le référentiel géodésique et système de projection utilisés devront clairement être indiqués en même temps que les données fournies. On utilisera autant que possible le référentiel géodésique officiel (RGF93).

2. Définition des cibles

La cible visée dans un forage - il s'agit en général de l'impact au toit du réservoir, mais il peut exister des cas spécifiques - doit être clairement caractérisée en déterminant les paramètres suivants :

- Profondeur verticale (TVD).
- Profondeur forée (MD).
- Déplacement horizontal total (DH).
- Azimut résultant par rapport à la tête de puits (AZr).

Les écarts envisageables par rapports à la cible doivent être indiqués. On propose les limites suivantes :

Tolérance	Albien	Dogger
En déplacement horizontal	0 / +30m	0 / +50 m
En azimut	±4°	±3°

Nota : les tolérances ci-dessus sont proposées pour des cibles correspondant au toit des réservoirs cités (Bassin Parisien). Elles peuvent varier en fonction des contraintes des projets. Si des objectifs différents sont visés, ou si des valeurs très différentes sont proposées, les nouvelles tolérances indiquées pour les cibles devront être justifiées.

Les cibles calculées à partir des tolérances en déplacement et en azimut présentent une forme trapézoïdale (voir l'exemple en fin de fiche). Si une cible circulaire est requise par les opérateurs de déviation, celle-ci sera centrée sur le point d'impact prévisionnel (DH, AZr) et correspondra à un demi-cercle dont le rayon sera égal à $R = DH \times \sin(\text{tolérance azimutale})$ avec un maximum égal à la tolérance de déplacement horizontal. Généralement, ce choix restreint la surface de la cible admissible.

Recommandation : la distance calculée entre les impacts réels au toit du réservoir devra correspondre au minimum à l'écartement horizontal calculé pour déterminer la baisse de température acceptée au bout de 30 ans. A défaut le débit moyen d'exploitation devra être revu à la baisse ou l'écartement augmenté.

3. Paramètres de calcul de la déviation

Les coordonnées géographiques décrites en §1 ainsi que les éventuels graphiques montrant la disposition géographique des puits dans le projet, les projections horizontales et les projections verticales de la trajectoire, seront mis à disposition. Il sera également présenté un tableau récapitulant les paramètres utilisés pour le calcul des différentes phases de la déviation, ainsi que les résultats de ce calcul (voir ci-après). Si plusieurs phases successives de déviation sont prévues, le tableau devra être complété en conséquence pour chacune des phases.

Paramètres de la déviation :

- Profondeur du début de la déviation (KOP m).
- Gradient de prise d'angle (GBU °/10m).

- Déplacement horizontal de la cible (DH m).
- Profondeur verticale de la cible (TVD m).
- Azimut de la cible par rapport au nord (AZ 0 à 360°).

Résultats pour la cible dans la phase :

- Inclinaison obtenue (°, valeur arrondie à 0,1°).
- Profondeur forée résultante de la cible (m).

A défaut de fournir les paramètres de calcul de la déviation, ou si la trajectoire est particulièrement complexe (plusieurs build-up, drop-off, ou des variations d'azimut), un listing fournira au moins les valeurs suivantes pour chaque point répertorié décrivant la trajectoire entre la surface et le fond du puits (TD). Les points seront choisis en déterminant un écart entre les profondeurs forées, les inclinaisons ou les azimuts basé sur la valeur du gradient angulaire de l'inclinaison ou de l'azimut dans la zone considérée (en général 10 m dans la zone de buildup).

PF	INCL	AZ	PV	NS	EW	DLS
----	------	----	----	----	----	-----

PF = profondeur forée (m).

INCL = inclinaison (°).

AZ = azimut nord (0-360°).

PV = profondeur verticale (m).

NS = déplacement vers le Nord (+) ou vers le Sud (-).

EW = déplacement vers l'Est (+) ou vers l'Ouest (-).

DLS = variation angulaire de trajectoire entre deux mesures (°/10m).

4. Choix des gradients de prise d'angle

Dans une trajectoire, la phase de prise d'angle est un moment délicat dont il convient de choisir les paramètres avec soin pour qu'elle puisse être aisément respectée. Une prise d'angle plus rapide augmente le niveau des variations angulaires (DLS) et les contraintes de foration, ce qui peut être préjudiciable pour la suite des travaux. Inversement, une prise d'angle insuffisante conduit à l'obligation de rattraper ultérieurement le retard occasionné, ce qui impose une augmentation de l'inclinaison finale de l'ouvrage.

Le choix du gradient de prise d'angle (GBU) dépend principalement de trois facteurs : le matériel mis en œuvre, le diamètre de la phase et le type de terrain traversé. Dans la pratique, le diamètre de la phase et le matériel de déviation sont fixés par l'architecture retenue. La valeur du gradient de prise d'angle devra donc, avant tout, être adaptée au comportement des terrains traversés.

Dans le Bassin Parisien, les terrains superficiels peu consolidés et les formations clastiques (argilo-sableuses) sont ceux qui présentent la plus faible compétence à la prise d'angle et au maintien des inclinaisons et des azimuts.

- Terrains superficiels (inférieurs à 300-350 m) : dans ces terrains peu consolidés, l'amorce de la déviation se montre assez souvent laborieuse avec des gradients dépassant difficilement $0,6^{\circ}/10\text{ m}$, du moins tant que l'inclinaison n'a pas atteint 5° à 8° . Au-delà de cette phase initiale, les conditions redeviennent généralement normales avec des gradients pouvant atteindre des valeurs de $0,80^{\circ}/10\text{ m}$ à $1,00^{\circ}/10\text{ m}$ dans le cas des gros diamètres ($17\frac{1}{2}$ et plus), et de $1,00^{\circ}/10\text{ m}$ à $1,25^{\circ}/10\text{ m}$ dans le cas des diamètres plus standards.
- Formations clastiques (Albien-Néocomien) : ces formations argilo-sableuses instables sont, à juste titre, réputées pour la difficulté qu'elles présentent à la prise ou au maintien des inclinaisons. La tendance la plus fréquemment observée dans ces formations est une chute des garnitures de déviation. La déstabilisation des terrains peut parfois conduire à une perte de la trajectoire ou à un coincement de la garniture de forage. Pour limiter ces risques, il est donc fortement recommandé, *autant que le programme de déviation le permet*, de traverser ces formations en trajectoire stabilisée avec une inclinaison ne dépassant pas 35° .

Outre les contraintes indiquées ci-dessus, la valeur minimale du gradient de prise d'angle est directement limitée par l'inclinaison maximale qui peut être acceptée. En effet, pour accéder à une cible déterminée, plus la valeur retenue pour le gradient sera faible, plus celle de l'inclinaison maximale deviendra importante.

Sur un ouvrage d'exploitation géothermique, sauf cas particuliers qu'il conviendra de justifier, la mise en œuvre d'un gradient supérieur à $1,50^{\circ}/10\text{ m}$ doit être absolument évitée dans l'ensemble des phases qui conduisent au toit du réservoir.

En définitive, le choix final du ou des gradients de prise d'angle va le plus souvent consister à rechercher un compromis entre les différentes contraintes mentionnées ci-dessus afin de déterminer une valeur qui soit aussi basse que possible et toujours inférieure à $1,50^{\circ}/10\text{ m}$.

5. Moyens mis en œuvre pour réaliser le programme

Pour réaliser les objectifs décrits dans le programme de déviation, il faut mettre en place des moyens techniques permettant d'atteindre les cibles fixées en limitant au maximum les risques liés à ces opérations, en particulier aux effets de l'inclinaison. On peut considérer que les difficultés que peut engendrer l'inclinaison d'une trajectoire dépendent à la fois du niveau de cette inclinaison (terrains encaissants, durée des travaux, effets mécaniques des frottements), de la qualité de la trajectoire réalisée (DLS, "rugosité") et des moyens techniques mis en œuvre.

Parmi les difficultés que l'on peut attendre, on peut citer les suivantes :

- des besoins supplémentaires en puissance (traction, couple).
- une moins bonne qualité de la géométrie du trou foré (ovalisation, cavage).
- une érosion mécanique des formations tendres particulièrement dans les zones de build-up : keyseat, éboulements, cavage, sédimentation.
- des conséquences aggravées en cas de pertes de circulation.
- une déstabilisation plus importante des formations fragiles (sable, argiles).
- une diminution de l'efficacité des fluides de forage (cake, encapsulation).
- un centrage moins efficace des tubages (qualité des cimentations).

Le Maître d'Oeuvre doit décrire ou lister dans son programme les moyens qu'il mettra en œuvre pour atteindre les objectifs fixés par la déviation : matériel directionnel utilisé, moyens et méthodes de mesures, dispositifs mis en place pour limiter les effets mécaniques et les risques induits par la déviation. L'optimisation du programme de déviation en termes de risque devra si nécessaire être démontrée.

- description du matériel de fond utilisé pour contrôler la trajectoire : garniture utilisée, moteur de fond, bent-sub, RSS, autres
- description du matériel d'acquisition des données de la déviation et précision du système de mesure : caractéristiques du MWD proposé et/ou des moyens de transmission des données de fond.
- mention de l'ensemble des moyens spécifiques utilisés pour réduire les risques : qualité des boues, surveillance des paramètres de foration, utilisation d'une tête rotative à couple élevé, puissance de traction adaptée, autres....
- mention du modèle de calcul utilisé pour interpoler la trajectoire des puits. Le standard actuel de l'industrie pétrolière est la méthode dite "Minimum Curvature". L'application de cette méthode est très fortement recommandée.

6. Mesures d'inclinaison dans les réservoirs

Il est assez fréquent qu'un réservoir dont le toit a été ciblé par une déviation contrôlée, soit ensuite traversé sans que soient mis en œuvre des moyens de contrôle directionnel spécifiques. La trajectoire réelle dans le réservoir et jusqu'au fond du puits n'est alors généralement pas enregistrée, sauf lorsque sont réalisées des diagraphies spécifiques.

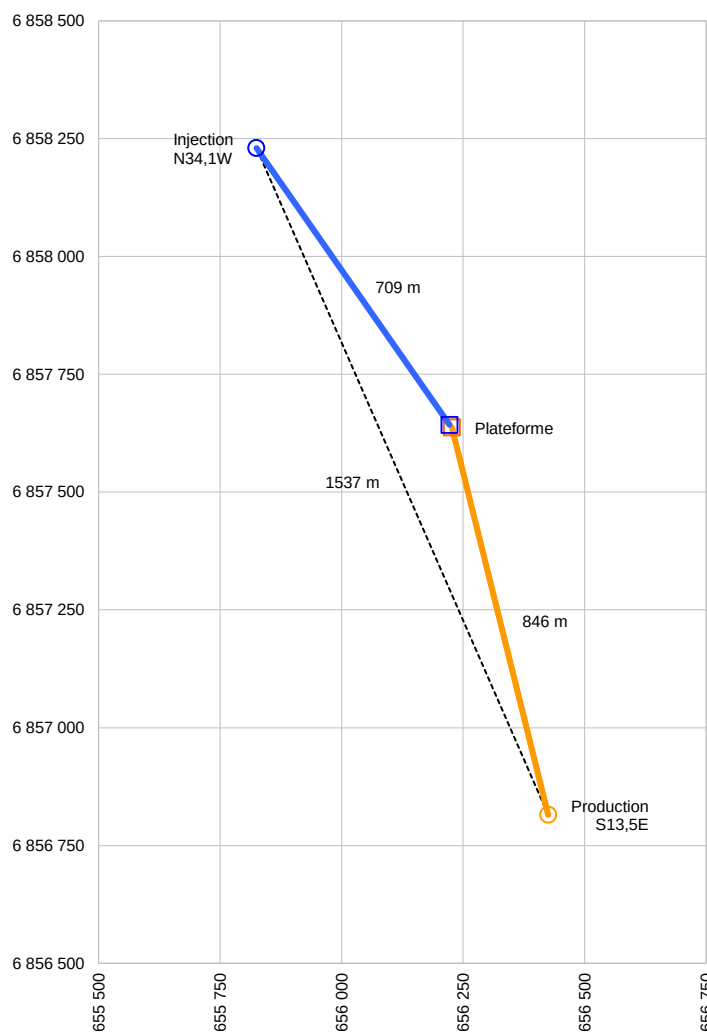
Si la connaissance précise de la trajectométrie du réservoir est, en elle-même, rarement nécessaire, par contre l'inclinaison moyenne du captage est une donnée importante permettant de définir les conditions de productivité et d'injectivité dans le réservoir.

Recommandation : il y a lieu, dans la mesure du possible et en l'absence de toute donnée acquise par ailleurs, de prévoir au moins la réalisation d'une ou plusieurs mesures d'inclinaison (type TOTCO ou similaire) dans les réservoirs. L'application de cette recommandation doit être particulièrement respectée dans le cas des réservoirs Albien et Néocomien.

7. Exemples de données de déviation

Exemple 1 : présentation des coordonnées géographiques d'un doublet.

Nom	Production	Injection
Tête X1	656 227	656 222
Y1	6 857 637	6 857 643
Z1		
Cible X2	656 425	655 825
Y2	6 856 815	6 858 230
Z2		
Azimut	N 166,5	N 325,9
Déplacement	845,5	708,6
Ecart têtes		7,8
Ecart réservoir		1537,0
Azimut entre les impacts au réservoir		157,0



Exemple 2 : une déviation en "J" doit être réalisée avec pour cible le toit du Dogger. Outre les coordonnées géographiques des points de référence, les paramètres qui devront être transmis pour décrire la trajectoire sont les suivants :

Paramètres :

Kick-off point (KOP) :	330 m
Gradient de build-up :	1,25°/10 m
Déplacement horizontal de la cible :	988 m
Profondeur verticale de la cible :	1 708 m
Azimut de la cible :	N 24°

Résultats pour le toit du Dogger (cible) :

Inclinaison finale :	39,1°
Profondeur forée (MD) :	2046 m

Résultats pour une profondeur verticale de 1828 m (TVD) :

Inclinaison finale :	39,1°
Profondeur forée (TD) :	2201 m
Déplacement horizontal total :	1086 m

Exemple 3 : la déviation précédente est présentée ci-dessous en mode listing.

Dans les zones de prise d'angle, les points sont listés tous les 10 m avec une variation d'inclinaison correspondant au gradient de build-up choisi de 1,25°/10 m (DLS). La discontinuité dans le tableau, indiquée par des pointillés, n'est ici que pour limiter la taille de ce tableau et ne doit, bien sûr, pas être reproduite.

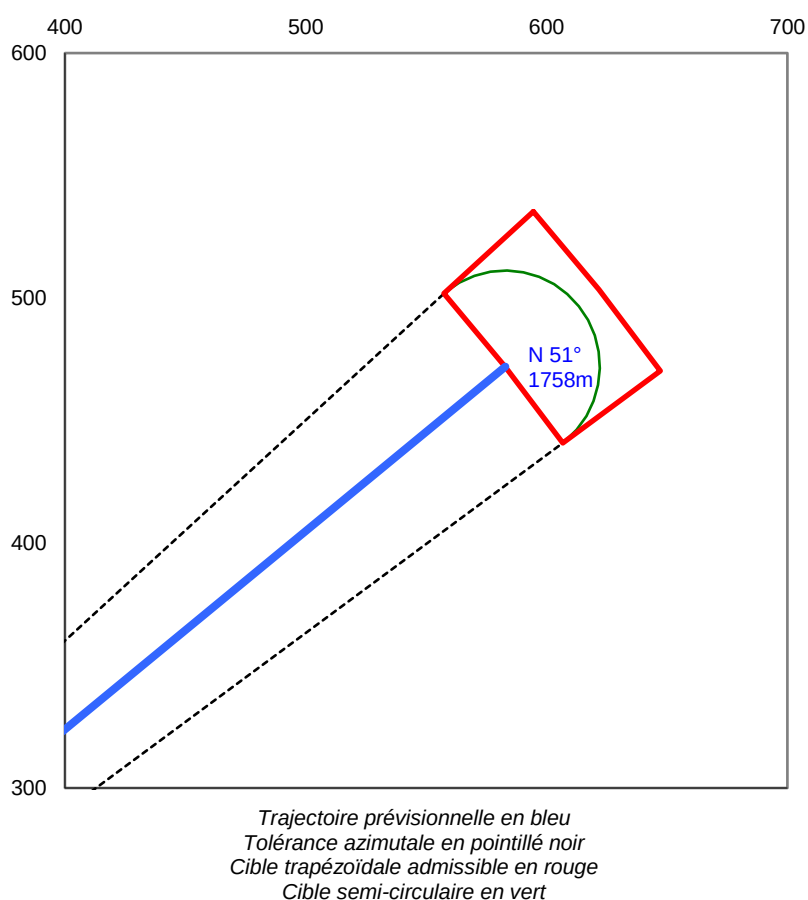
Points	MD	INCL	AZM	TVD	NS	EW	DLS
Surface	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
KOP	330	0,00	24	330,00	0,00	0,00	1,25
	340	1,25	24	340,00	0,10	0,04	1,25
	350	2,50	24	349,99	0,40	0,18	1,25
	360	3,75	24	359,98	0,90	0,40	1,25
	370	5,00	24	369,95	1,59	0,71	1,25
	380	6,25	24	379,90	2,49	1,11	1,25
	390	7,50	24	389,83	3,58	1,59	1,25
	400	8,75	24	399,73	4,87	2,17	1,25
----	-----	----	----	----	-----	----	----
	600	33,75	24	584,65	70,57	31,42	1,25
	610	35,00	24	592,91	75,73	33,72	1,25
	620	36,25	24	601,04	81,05	36,09	1,25
	630	37,50	24	609,04	86,53	38,53	1,25
	640	38,75	24	616,90	92,17	41,04	1,25
EOK	643	39,10	24	619,24	93,89	41,80	1,25
T 13"3/8	1100	39,10	24	1708,03	902,23	401,70	0
CIBLE	2046	39,10	24	1708,03	902,23	401,70	0
TD	2200	39,10	24	1827,54	990,96	441,20	0

Exemple 4 : Détermination d'une cible dans le plan horizontal.

Dans cet exemple, l'impact recherché correspond à un déplacement horizontal de 750 m dans l'azimut N51°. La tolérance par rapport à cet impact est de 0 m à +50 m en déplacement et de $\pm 3^\circ$ en azimut.

Sur ces bases, la cible trapézoïdale comporte une petite largeur de 78 m (39 m de chaque côté de la trajectoire théorique) au niveau de l'impact choisi et une grande largeur de 84 m (2 fois 42 m), au niveau de l'écart maximum de déplacement (+50 m).

Si une cible circulaire est requise, celle-ci sera centrée sur l'impact prévisionnel (750 m, N51°) et correspondra à un demi-cercle de 39 m de rayon, soit $750 \text{ m} \times \sin(3^\circ)$. La surface de la cible est largement diminuée.





Version validée le 24 Novembre 2015

FICHE TECHNIQUE 052

QUALITE DES DEVIATIONS

Le niveau qualitatif des trajectoires influe directement sur un grand nombre de paramètres lors de la construction des puits. Elle joue un rôle majeur dans le bon déroulement des travaux et détermine en partie la qualité finale des ouvrages.

Les secteurs les plus concernés sont les contraintes mécaniques en foration, les risques de coincement de la garniture, la géométrie du trou foré, la pose des tubages, ainsi que le centrage des colonnes et la qualité de leur cimentation.

Cette note fait un rappel des éléments présidant à la qualité des opérations de déviation et aux méthodes qui peuvent être utilisées pour en faire l'évaluation.

1. Qualité des trajectoires

Les objectifs qualitatifs d'une déviation en géothermie profonde seront, par ordre de priorité :

- de déterminer une trajectoire aussi lisse et peu perturbée que possible ;
- d'atteindre la cible dans l'enveloppe fixée.

Les contraintes mécaniques induites par une trajectoire perturbée (frottements de la garniture, couple de rotation, battage des tiges) peuvent potentiellement avoir des effets négatifs sur les opérations de forage (manœuvres du train de tiges, key-seat, déstabilisation des terrains, sédimentation des déblais sur la génératrice basse, coincements), sur la pose des tubages (mise en place, centrage) et sur la qualité des cimentations (géométrie des annulaires, channeling). Il est donc important de limiter au mieux ces effets en réalisant des trajectoires aussi peu perturbées que possible.

L'accès à la cible est à la fois contraint par le permis d'exploitation qui en fixe les limites et par l'écartement minimal à obtenir au toit du réservoir. Ce dernier paramètre influe sur l'exploitation à long terme (temps de retour thermique).

Méthodes de mesure et d'interpolation :

Outre le matériel spécifique à la réalisation de la déviation, il est, en règle générale, le plus souvent utilisé du matériel de mesure installé dans la garniture de forage. Ce matériel complexe permet la télétransmission des données (MWD). Il est mis en œuvre par des opérateurs spécialisés à qui est confiée la conduite de l'opération de déviation, selon un programme préétabli. Pendant les travaux, la trajectoire est calculée en permanence par interpolation des mesures régulièrement effectuées (profondeur forée, inclinaison, azimuth).

Parmi les nombreuses méthodes de calcul existantes - dont les plus connues sont "Average Angle", "Tangential", "Balanced Tangential" ou "Radius of Curvature" -, la méthode dite du **"Minimum Curvature Radius"** est le standard actuellement reconnu par l'industrie pétrolière. Elle est l'une des plus précises et peut être aisément traitée, avec des moyens de calcul de chantier. C'est donc celle dont l'utilisation est recommandée.

La méthode, les moyens et le matériel mis en œuvre, la fréquence des mesures et la précision attendue devront clairement être indiqués dans les documents relatifs à cette déviation.

Le niveau de référence des mesures (table, sol, NGF) doit être clairement indiqué. Les données minimales suivantes doivent être produites pour chacune des mesures :

Prof	Inclinaison	Azimuth	TVD	Nord	Est	DLS
[m]	[°]	[°]	[m]	[m]	[m]	[°/10m]

Fréquence des mesures :

La précision des calculs d'interpolation dépend également de la fréquence des mesures. Dans le domaine pétrolier, la recommandation des opérateurs de déviation est de respecter un écart de mesure minimale correspondant à un DLS de 1°/10 m (3°/100 ft).

Recommandation opératoire : dans le cas des puits géothermiques, il est proposé de réaliser une mesure tous les 10 m sur l'ensemble du puits. Lorsque la foration du réservoir est réalisée sans matériel de déviation, il sera assuré au moins une mesure d'inclinaison (type TOTCO ou similaire) vers le milieu du réservoir et une en fond de puits.

Contrôle de qualité (QC) :

La qualité de la donnée recueillie est de la compétence des opérateurs. Toutefois, un suivi basique de qualité reste fortement recommandé. Il permet, en effet, de supprimer facilement les erreurs de relevé ou de transcription - assez fréquemment observées - dans la chaîne de transmission des données allant du chantier aux personnes concernées : de l'opérateur de déviation vers le contrôleur ou l'intendant de forage, de l'intendant vers le Maître d'Œuvre, puis vers le Maître de l'Ouvrage et au-delà vers les autorités concernées.

Un calcul basique, comme par exemple la "Varying Curvature Method", permet de vérifier la validité des écarts observés entre deux points de mesure :

Ecart en profondeur verticale : $dPV = dMD \times \cos(I)$
 Ecart en positionnement Nord : $dNS = dMD \times \sin(I) \times \cos(A)$

Ecart en positionnement Est : $dEW = dMD \times \sin(I) \times \sin(A)$

Une mesure anormale apparaîtra dans le tracé des écarts, avec une signature spécifique selon qu'il s'agit d'une erreur de profondeur, d'inclinaison et/ou d'azimut. Elle peut alors faire l'objet d'une vérification ciblée immédiate auprès de l'opérateur. Les trois cas les plus fréquents d'anomalies observées correspondent à :

- une correction de trajectoire particulièrement abrupte (opérateur) ;
- une lecture ou un enregistrement erroné de la mesure (opérateur) ;
- des erreurs de transcription (chantier).

Recommandation opératoire : il est très fortement recommandé, au début de chaque opération de déviation, de rappeler aux différents acteurs concernés les priorités qui doivent être respectées. L'opérateur de déviation en particulier doit être convaincu qu'il doit avant tout privilégier la qualité du trou foré par rapport au strict suivi d'une trajectoire théorique. En géothermie profonde, il s'agira avant tout de réaliser une trajectoire aussi lisse que possible (quitte à s'écarter de la trajectoire théorique) tout en cherchant à recouper la cible visée dans la tolérance définie.

2. Evaluation de la prise d'angle

Il est souvent difficile d'évaluer le gradient (GBU) réalisé et la profondeur de la fin de la prise d'angle (EOK). Pour les déviations en simple "J" le plus souvent réalisées en géothermie, il est parfois possible de déterminer une valeur équivalente de GBU et d'EOK en calant, par superposition, une trajectoire théorique sur une trajectoire réelle (feuille de calcul Excel de référence : ModJ.xls).

Recommandation : compte tenu des tubages en très gros diamètre (13"3/8 et plus) généralement utilisés dans les phases de prise d'angle, sauf cas particuliers qu'il conviendra de justifier, il est souhaitable que la valeur du GBU équivalent, quand elle est accessible, ne dépasse pas 1,5°/10 m.

3. Variations de trajectoire

La valeur du Dog-Leg (DL), exprimée en radians ou en degrés, est utilisée dans une déviation pour décrire les variations d'inclinaison et d'azimut marquant la trajectoire d'un puits. Le DL total correspond au cumul de ces variations tout au long de cette trajectoire. Par exemple, si on programme un forage incliné à 38° sans variation d'azimut, on obtiendra :

- pour la trajectoire théorique un DL total de 38° ;
- pour la trajectoire réelle, un DL total cumulant chaque variation de la trajectoire et pouvant atteindre une valeur nettement supérieure (le double, voire le triple ou plus).

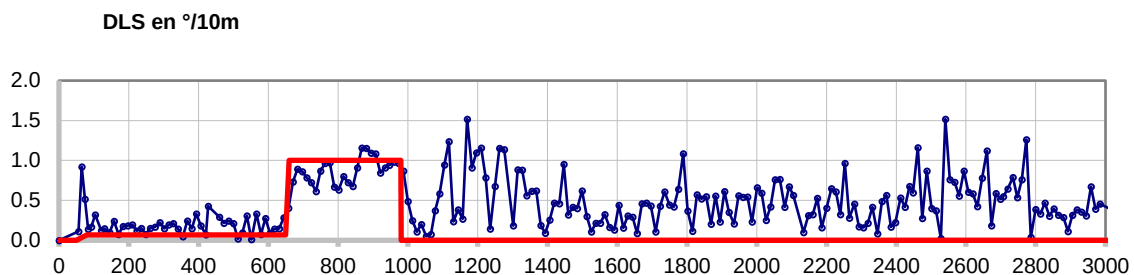
$$DL = \cos^{-1}(\cos \alpha_{i-1} \cos \alpha_i + \sin \alpha_{i-1} \sin \alpha_i \cos(\phi_i - \phi_{i-1}))$$

Le Dog-Leg Severity (DLS), exprimé en °/10 m ou en °/30 ft, est la valeur unitaire du Dog-Leg (DL) calculée entre deux points successifs. C'est cette valeur que l'on retrouve dans les tableaux présentant les résultats des calculs de déviation :

$$DLS = DL \times 10 / (MD2 - MD1)$$

On peut considérer que DL et DLS expriment, d'une certaine façon, l'état de "lissage" ou de "rugosité" de la trajectoire. Plus la valeur du DL sera proche de celle de la trajectoire théorique idéale, plus celle-ci pourra être considérée comme "lisse" (c'est à dire rectiligne). Plus elle s'en éloignera et plus la trajectoire sera "rugueuse" (c'est à dire perturbée) et pourra potentiellement engendrer des désordres : géométrie du trou, descente et centrage des colonnes, qualité des cimentations.

Les valeurs de DLS permettent, elles aussi, de visualiser l'état de la trajectoire réelle par rapport à la trajectoire théorique. Mais les variations observées sont difficiles à interpréter, à comparer ou tout simplement à quantifier sur le plan qualitatif. Il est donc recommandé d'assurer **à la fois** des valeurs unitaires de DLS aussi faibles que possible **et** une bonne qualité du lissage.



Sur le graphique ci-dessus, on constate que la prise d'angle, jusqu'à 1000 m, correspond plutôt bien au programme théorique (en rouge). En revanche, la partie réalisée en inclinaison stabilisée au-delà de 1000 m se montre fortement perturbée. Malgré un niveau de DLS faible (le DLS maximum n'est que de 1,52°/10 m), le coefficient de lissage atteint, néanmoins, une valeur élevée (0,31°/10 m). Les nombreuses variations observées dans cette zone sont dues aux corrections fréquentes réalisées par l'opérateur pour ne pas s'écarter de la trajectoire prévue. Pour privilégier la qualité de la déviation, il aurait fallu réduire le nombre de corrections aux seules nécessaires pour atteindre la cible, quitte à accepter de s'écarter parfois de la trajectoire prévisionnelle.

4. Tortuosity Index (TI)

Pour faciliter l'interprétation qualitative apportée par les observations du DLS, certains opérateurs pétroliers proposent un index de macro-rugosité (TI pour "Tortuosity Index", cité parfois comme "Unwanted Curvature"), basé sur la valeur du DL. Le TI en °/10 m peut être calculé pour l'ensemble du forage (c'est-à-dire du premier KOP à la dernière mesure réalisée), ou phase par phase, ou pour une section choisie du forage, de la manière suivante :

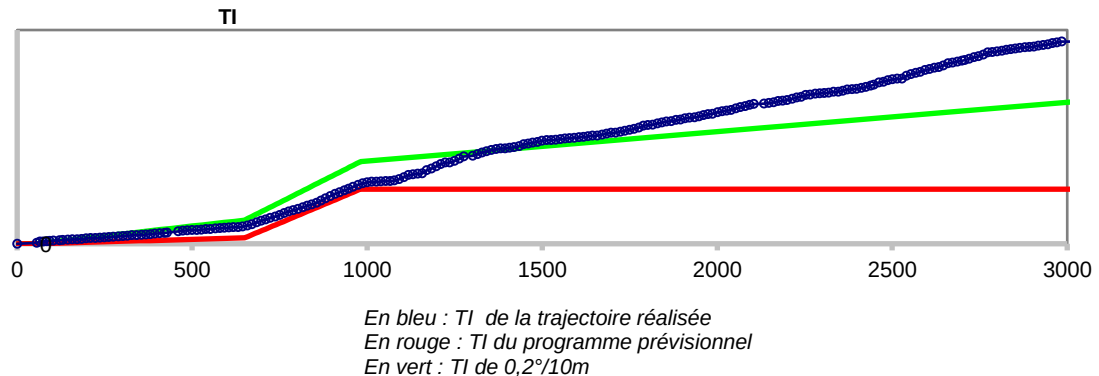
$$TI = (DL_{calc} - DL_{th}) \times 10 / Long$$

avec DL_{calc} = variation du DL calculé sur la section concernée ;
DL_{th} = variation du DL théorique prévu sur la section concernée ;
Long = longueur de la section concernée.

Les contraintes mécaniques de la déviation vont croître en même temps que la valeur du TI (augmentation des frottements et du couple de rotation, battage des tiges). Des valeurs de TI élevées peuvent potentiellement être le signal d'une augmentation des difficultés sur les opérations de forage (manœuvres du train de tiges, key-seat, déstabilisation des terrains,

géométrie du trou foré, risques de coincement), sur la pose des tubages (mise en place, centrage) et sur la qualité des cimentations (géométrie des annulaires, channeling).

Le graphique ci-dessous est la traduction en TI des valeurs de DLS présentées au paragraphe §2. On constate dans cet exemple qu'un niveau repère de TI à $0,2^\circ/10\text{ m}$ est assez vite atteint puis dépassé peu après le début de la phase stabilisée de la déviation pour atteindre $0,31^\circ/10\text{ m}$ en fin de puits.



Recommandation : tout en cherchant à atteindre au mieux la cible définie dans le programme, il est systématiquement recommandé de privilégier avant tout la qualité de la déviation à un suivi trop strict de la trajectoire prévisionnelle. Dans la mesure où les conditions de foration le permettent, on cherchera toujours à **conserver une valeur de TI aussi basse que possible** (feuille de calcul Excel de référence : TI.xls).

A titre indicatif, les correspondances suivantes peuvent généralement être retenues :

- jusqu'à $0,20^\circ/10\text{ m}$: trajectoire lisse (rectiligne).
- de $0,21$ à $0,25^\circ/10\text{ m}$: rugosité faible.
- de $0,26$ à $0,30^\circ/10\text{ m}$: rugosité forte.
- au-delà de $0,30^\circ/10\text{ m}$: trajectoire perturbée (tortueuse).

Nota : sur un champ pétrolier en mer du Nord, il a été observé un TI moyen de $0,79^\circ/100\text{ ft}$ ($0,26^\circ/10\text{ m}$) en phase de build-up et de $0,46^\circ/100\text{ ft}$ ($0,15^\circ/10\text{ m}$) en phase stabilisée (ref. North Sea, AADE-13-FTCE-21).

5. Détermination des cibles

Dans la plupart des cas, en géothermie profonde, les cibles se déterminent en fonction des paramètres hydrodynamiques des réservoirs captés et des conditions de production attendues. On retiendra :

- pour la profondeur verticale : la profondeur verticale estimée du toit du réservoir ;
- pour le déplacement horizontal : la distance minimale requise pour conserver un écartement entre les puits correspondant au temps de percée thermique souhaité. Cette distance est fonction des caractéristiques hydrodynamiques du réservoir et du débit moyen prévu en exploitation ;

- pour l'azimut : une direction fixée par la géométrie du système de production (écartements entre les puits du doublet ou triplet) et par le périmètre de protection défini dans le permis de recherche.

Au Dogger, les tolérances suivantes sont proposées :

- pour le déplacement horizontal : 0 m à +50 m du déplacement total recherché ;
- pour l'azimut résultant : $\pm 3^\circ$ par rapport à l'azimut prévisionnel.

L'objectif principal de la déviation en géothermie profonde est, avant tout, de respecter au mieux la géométrie du système de production en garantissant la distance minimale requise recherchée entre les puits de production et de réinjection. On peut donc considérer que la cible sera atteinte, dès lors que ce point précis sera respecté.

6. Recommandations générales

L'utilisation d'un seul critère est insuffisant pour déterminer la qualité d'une déviation. On peut, en effet, avoir un puits "lisse" avec quelques pics DLS très élevés et inversement des DLS faibles et un puits très "rugueux". Il est donc proposé de cumuler les quatre critères suivants :

- les valeurs ponctuelles maximales de DLS ;
- le coefficient de lissage de l'ensemble de la déviation (TI) ;
- l'impact à la cible (toit du réservoir) ;
- la valeur du GBU équivalent lorsque cette donnée est accessible.

Dans la mesure où les conditions de forage le permettent, il est recommandé de respecter les valeurs suivantes :

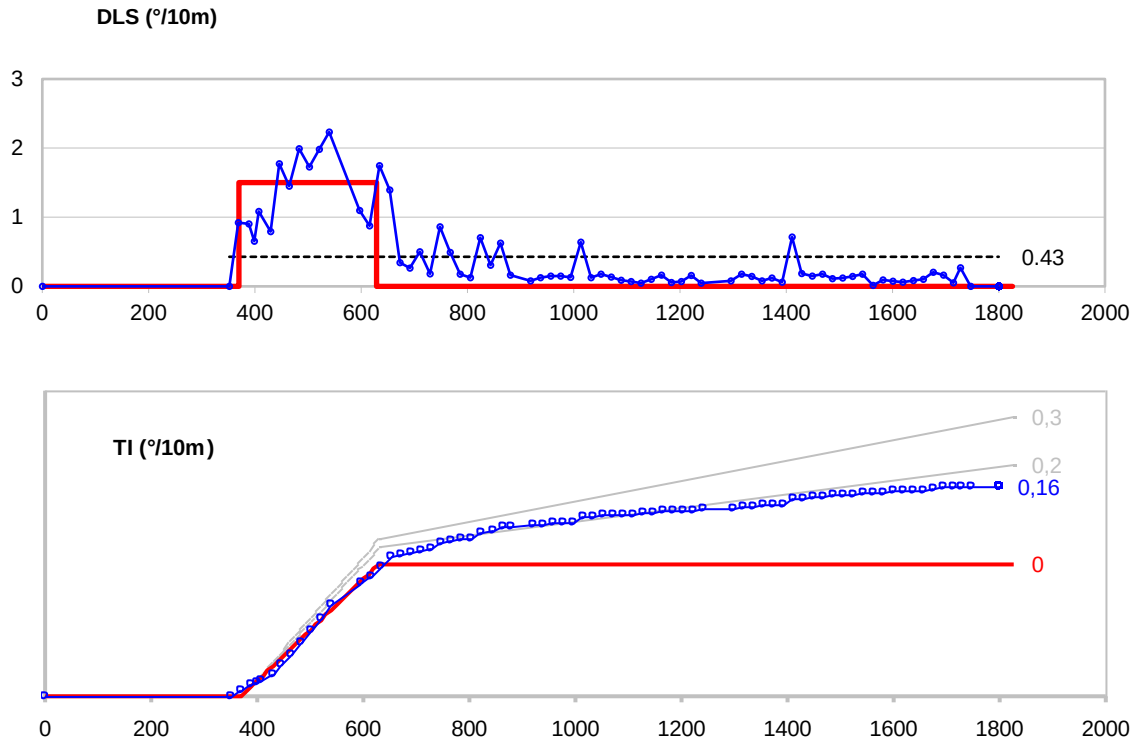
- une valeur maximale de DLS inférieure à $3^\circ/10$ m ;
- un TI calculé aussi faible que possible sur l'intervalle dévié (KOP-TD) ;
- un écart horizontal avec la cible compris entre 0 et 50 m ;
- un écart azimutal avec la cible inférieur à $\pm 3^\circ$;
- un GBU équivalent maximum de $1,5^\circ/10$ m.

Recommandations opératoires : les deux principales recommandations opératoires sont de réaliser autant que possible une mesure tous les 10 mètres sur l'ensemble de la trajectoire et a minima, au moins 2 mesures d'inclinaison dans le réservoir.

Dans certains cas spécifiques où la précision de la trajectoire serait un élément critique - mesures incertaines, trajectoire erratique, interférence avec un projet voisin, risque de collision, demande de la DRIEAT -, un log de contrôle effectué au moyen d'une sonde de mesure gyroscopique pourrait être envisagé en fin de travaux.

7. Exemple

Exemple de trajectoire lisse : les graphiques ci-après montrent les DLS et le TI observés sur un puits géothermique au Dogger incliné à 39° , avec un gradient prévisionnel de $1,5^\circ/10$ m.

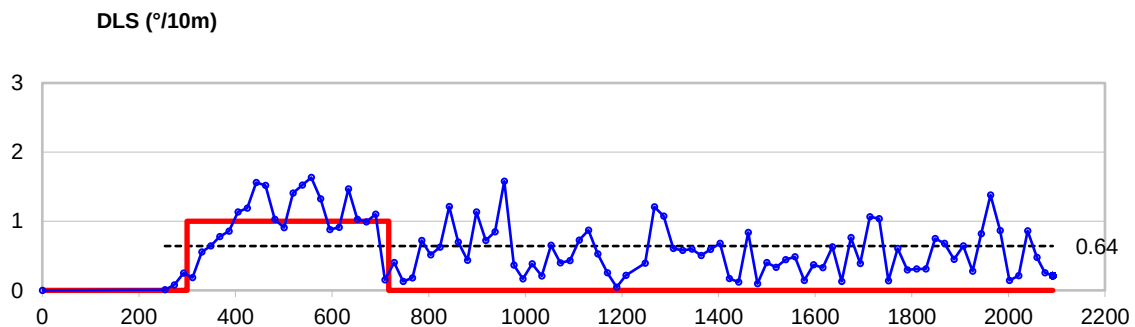


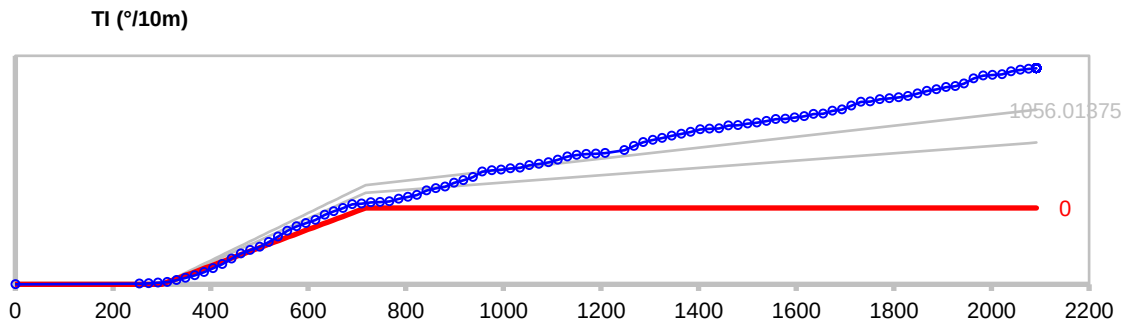
Cet exemple permet de constater la très bonne qualité de la déviation avec :

- un bon contrôle de la phase de build-up (370 m - 630 m) ;
- quelques variations de trajectoire après le build-up (630 m - 900 m) ;
- puis un excellent contrôle de la stabilisation au-delà de 900 m.

Le calcul détermine un DLS maximum inférieur à $2,2^\circ/10\text{ m}$, un DLS moyen de $0,43^\circ/10\text{ m}$ pour l'ensemble de la déviation, un DLS moyen de $0,23^\circ/10\text{ m}$ pour la phase stabilisée et un TI final de $0,16^\circ/10\text{ m}$ pour l'ensemble du forage, confirmant ainsi clairement une trajectoire lisse et peu perturbée.

Exemple de trajectoire perturbée : il s'agit également, dans ce cas, d'un puits au Dogger, très similaire au premier, incliné à 42° , avec un gradient prévisionnel de $1,0^\circ/10\text{ m}$





Dans cet exemple, on constate :

- un bon contrôle de la phase de build-up (300 m - 720 m) ;
- mais une phase stabilisée perturbée dans sa totalité par des variations fréquentes et marquées de trajectoire.

Le calcul détermine un DLS moyen de 0,64°/10 m pour l'ensemble de la déviation, un DLS moyen de 0,54°/10 m pour la phase stabilisée et un TI final de 0,41°/10 m. Ces valeurs traduisent une trajectoire perturbée par des variations fréquentes d'inclinaison ou d'azimut. Malgré ce constat, le DLS maximum reste pourtant largement inférieur à 2°/10 m.

Annexe 6

Complétion



Version validée le 24 novembre 2015
Modifiée le 27 septembre 2021

FICHE TECHNIQUE 061

COMPLETION DES AQUIFERES SABLEUX

La présente fiche utilise le terme “ **complétion** ” pour désigner l'ensemble des éléments constituant le captage au niveau du réservoir. Cette notion diverge de la définition des hydrogéologues où le terme désigne l'ensemble des opérations de mise en production d'un puits.

Certains aquifères nécessitent la mise en place d'une complétion de captage (crépines, massif de gravier). En géothermie profonde c'est le cas, dans le Bassin Parisien, des aquifères argilo-sableux ou sablo-gréseux de l'Albien, du Néocomien et du Trias. C'est également le cas de la base du Crétacé dans le Bassin Aquitain.

Il est nécessaire que le matériel utilisé soit adapté du mieux possible aux conditions d'exploitation du réservoir afin de permettre le débit de pompage requis tout en conservant une filtration efficace et un niveau de pertes de charge minimal.

Un choix qualitatif et adapté du matériel de complétion, du slot des crépines et de la granulométrie du massif filtrant est alors fondamental. Il dépend à la fois des caractéristiques des formations captées et de la structure du puits (diamètre des colonnes, inclinaison).

1. STRUCTURE DES COMPLETIONS

Les éléments constitutifs de la partie captante du forage géothermique sont les suivants :

- un système de suspension de la colonne captante à l'intérieur du puits. En puits profond, le plus souvent, il est utilisé un liner-hanger que l'on ancre à l'intérieur du tubage de production. La tête de cette colonne peut être équipée d'un système permettant une obturation partielle ou totale de l'annulaire entre tubage et complétion (packer, cône) ;
- une colonne pleine de suspension des crépines. Dans le cas d'un massif de gravier injecté, l'annulaire de cette colonne est utilisé comme réserve de gravier et intègre une crépine témoin permettant d'observer et de contrôler le niveau du remplissage ;

- un raccord diélectrique servant d'isolant entre la suspension en acier noir et la complétion en acier inoxydable ;
- un ensemble de tubes crépinés (crépines simples, crépines pré-packed ou crépines doubles), séparés ou non par des tubes pleins ;
- un tube à sédiment placé sous les crépines et fermé par un bouchon de pied (bull-plug) ;
- du matériel de centrage de la colonne (centreurs positifs et centreurs souples) en acier ou constitué de matériau inerte diélectriquement adapté (fibre de verre, téflon, carbone) ;
- un massif de gravier mis en place par injection dans l'annulaire entre terrain et crépines ou réalisé par auto-développement autour de la colonne crépinée.

Le choix du mode de complétion dépendra principalement de la structure du puits et du type d'aquifère capté :

- ***dans un puits vertical***, on pourra préférer une complétion classique avec crépines simples et mise en place d'un massif de gravier. Cette solution impose le plus souvent un élargissement du réservoir et nécessite, pour être efficace, un centrage rigoureux de la colonne de captage. En forage profond, cette technique nécessite du matériel adapté et un réel savoir-faire pour mettre correctement en place le massif de gravier. Elle se montre particulièrement difficile et délicate à mettre en œuvre dans les puits déviés.
- ***dans un puits dévié***, la solution précédente peut également être envisagée. Mais on lui préférera le plus souvent une complétion double (ou pré-packed) avec constitution d'un auto-gravillonnage. Les principales contraintes précédentes sont alors supprimées. En contrepartie, le coût du matériel installé est généralement beaucoup plus élevé et le développement plus contraignant. Cette solution peut toutefois se montrer inadaptée dans le cas de formations sableuses à granulométrie uniforme.

Dans les deux cas, l'installation du matériel est suivie par une phase de développement dont le rôle est fondamental et qui devra être menée de manière à garantir la meilleure filtration possible. Pour assurer la qualité du développement, cette dernière phase devra être menée avec beaucoup de progressivité et d'attention.

La mise en place d'un massif de gravier nécessite une complétion rigoureusement centrée. Le matériel de centrage utilisé doit être à la fois compatible avec la métallurgie de la complétion, se montrer mécaniquement capable de maintenir efficacement les crépines dans l'axe du captage et ne pas faire trop fortement obstacle à la mise en place du massif de gravier dans l'annulaire.

2. POSITIONNEMENT DE L'ANCRAGE

Le système de suspension est ancré dans le tubage de production. L'annulaire qui est créé entre le sabot du tubage et le sommet de la colonne doit être adapté au type de complétion utilisé.

La longueur de cet annulaire détermine :

- la valeur des pertes de charge nécessaires pour limiter ou interdire à une partie du flux produit de circuler dans cet espace annulaire ;
- le volume de la réserve de gravier qui viendra compenser un mauvais placement initial du massif de gravier (formation de ponts dans l'annulaire) et son inéluctable tassement lors des opérations de développement ;

Dans le cas d'une complétion auto-gravillonnée, cette longueur n'a pas de réelle importance. Il faut seulement s'assurer que le débit qui pourrait éventuellement transiter par cet annulaire soit suffisamment faible pour empêcher l'entraînement des sables (ou des fines) de la formation. Il est donc fortement recommandé, avant le lancement des opérations de développement, d'obturer l'annulaire (packer, raccord conique, ...) lorsque celui-ci présente cette éventualité.

Dans le cas d'une complétion comportant la mise en place d'un massif de gravier, la longueur de l'annulaire détermine le volume de la réserve de gravier disponible. Il est recommandé de prévoir une réserve correspondant **au moins à 10% du volume théorique de gravier à mettre en place et de 24 m au minimum**. Cette hauteur doit être suffisante pour que les pertes de charge dans l'annulaire limitent la circulation de l'eau dans cet espace. Afin de permettre un éventuel complément de gravier, l'obturation de l'annulaire n'est pas conseillée, sauf à installer un équipement facilement amovible. En cas de besoin, une obturation définitive peut éventuellement être envisagée en fin de travaux, avant la mise en exploitation de l'ouvrage.

3. RACCORDS DIELECTRIQUES

Les raccords diélectriques sont utilisés pour éviter de mettre en contact des aciers de type différents. C'est le cas dans les forages géothermiques profonds équipés de complétions en acier inoxydable.

L'industrie pétrolière met parfois en œuvre ce type de matériaux, mais ne propose pas de règles spécifiques. Cette note tente de définir quelques recommandations permettant une meilleure adaptation des raccords diélectriques aux conditions spécifiques de la géothermie.

3.1. La corrosion galvanique

Une pile électrochimique est créée lorsque deux métaux de natures différentes sont en contact direct (métal sur métal) ou indirect (baignant dans un milieu électrolytique). Un des métaux s'oxyde et se dissout (anode), tandis que sur l'autre métal a lieu une réduction (cathode). On parle de corrosion galvanique.

Pour que se produise une corrosion galvanique, trois conditions sont nécessaires :

- Des métaux de nature différente : la différence de potentiel de dissolution entre les deux métaux provoque le phénomène. C'est généralement le métal le moins noble (anode) qui sera corrodé. Dans un forage géothermique, c'est le tubage en acier noir qui joue généralement le rôle de l'anode.
- La présence d'un électrolyte aqueux : la présence d'ions dans le milieu aqueux accélère le phénomène. Plus l'eau sera salée, plus forte sera l'intensité du phénomène.
- La continuité électrique entre les deux métaux : l'intensité du phénomène diminue en fonction du carré de la distance séparant les deux métaux. Elle est également fonction des surfaces relatives en contact avec l'électrolyte (rapport cathode sur anode).

Points sensibles à la corrosion galvanique

En géothermie profonde, les tubages mis en place sont généralement aux normes de l'API. L'acier de grade K55 est le plus généralement utilisé dans le Bassin parisien. Pour une colonne de diamètre et de grade donnés, il est recommandé d'utiliser des éléments issus d'une même coulée afin d'assurer la meilleure homogénéité métallurgique possible. On cherche également à éviter le mélange de colonnes de production de grade différent dans un même forage.

Malgré ces précautions de base, certains éléments qui sont intégrés dans une même colonne peuvent être constitués d'aciers différents. On citera :

- Les brides, raccords et vannes installés en tête de puits.
- Les DV (Diverting Valve) utilisées pour les cimentations étagées.
- Les anneaux et les sabots de cimentation.
- Les centreurs et autres matériels de centrage.
- Les systèmes de suspension (liner-hanger).
- Les éventuelles soudures modifiant localement la métallurgie de l'acier.
- Les compléments de captage (crépines) en acier inoxydable.

Ce dernier cas impose une protection particulière du fait de l'importante différence entre les aciers en présence : il s'agit en effet le plus souvent de raccorder une colonne crépinée en acier inoxydable à une colonne de production en acier noir. Un raccord diélectrique doit alors impérativement être mis en place pour permettre la liaison entre les deux types d'acier. La structure technique de la liaison peut être résumée comme suit :

- Une colonne de production aux normes API en acier noir.
- A l'intérieur de cette colonne :
 - un système de suspension type liner-hanger constitué d'aciers divers (corps, système d'ancrage, peignes).
 - des tubes pleins de suspension des crépines en acier noir ou inox.
- Sous cette colonne : les crépines et les tubes d'extension en acier inoxydable.

Pour s'affranchir au mieux des contraintes de la corrosion galvanique, il faudra structurer ce raccordement pour :

- Interdire tout contact direct entre les aciers différents :
 - Entre le système de suspension et le matériel en acier inoxydable.
 - Entre la colonne de production et le matériel en acier inoxydable.
- Les éloigner autant que possible les uns des autres pour limiter le rôle de l'électrolyte.
-

3.2. Proposition pour la géothermie basse énergie

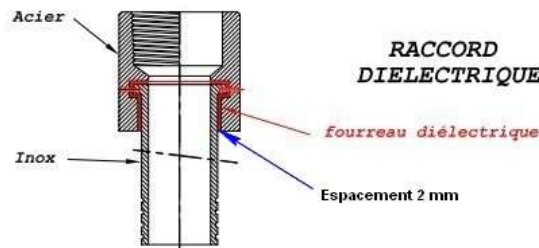
Le captage des réservoirs de type clastique (Albien, Néocomien, Trias) impose la mise en place d'une complétion crépinée en acier inoxydable suspendue dans des colonnes de production en acier noir. Le raccordement entre ces deux métallurgies doit se faire en intégrant un dispositif protégeant de la corrosion galvanique.

Trois éléments doivent être pris en compte :

- éviter les contacts directs : il faut avant tout mettre en place un dispositif de raccordement interdisant tout contact direct entre les deux types d'acier : raccord diélectrique spécifique, manchette ou colonne d'extension en matériaux composites (fibre de verre), ;

- garder un écartement maximal entre les aciers : il faut empêcher l'acier inoxydable (les tubes de suspension des crépines) de se rapprocher de l'acier noir du tubage dans lequel il est ancré. Il y a donc lieu de mettre en place un système de centrage adapté (centreurs diélectriques), tout particulièrement en puits dévié ;
- minimiser les échanges électriques : il y a lieu de minimiser autant que possible les surfaces d'échange, c'est-à-dire la longueur de l'entrefer entre le tubage et la colonne en acier inoxydable.

Solution 1 : un raccord diélectrique est directement installé sous le système de suspension.



C'est la solution la plus souvent retenue.

- Avantage : le raccord diélectrique est d'un modèle relativement standard.
- Inconvénients : l'effet diélectrique est minimal. D'une part, l'espacement entre acier noir et acier inoxydable est très faible (de l'ordre de 2 mm). D'autre part, la colonne de suspension des crépines en acier inoxydable se trouve en vis-à-vis du tubage en acier noir. Il faut éviter tout contact entre ces deux éléments en installant des centreurs diélectriques spécifiques. Dans cette solution, la surface d'échange est maximale.

Solution 2 : le raccord diélectrique est repoussé aussi bas que possible, au plus près de la crépine témoin.

- Avantages : la colonne de suspension est en acier noir. Les centreurs sont en acier standard, de type positif. Les surfaces d'échange sont minimisées.
- Inconvénient : comme dans le cas précédent, le raccord diélectrique ne fournit qu'un espacement de l'ordre de 2 millimètres entre les deux aciers.

Solution 3 : le raccord diélectrique est remplacé par un élément de colonne (manchette de 1 à 3 m) en matériau composite.

- Avantage : l'efficacité du raccord diélectrique est très largement augmentée puisque l'on passe d'un espacement de quelques millimètres à un espacement métrique.
- Inconvénient : le raccord en matériau composite peut être sensible aux agressions mécaniques.

Solution 4 : hormis la crépine témoin, l'ensemble de la colonne de suspension est en matériaux composites.

- Avantage : l'effet diélectrique est maximal.
- Inconvénient : une colonne en matériau composite peut être sensible aux agressions mécaniques.

3.3. Recommandations

Pour éviter au mieux les risques de corrosion galvanique dans les puits géothermiques utilisant une complétion en acier inoxydable, il est proposé :

- **Pour les puits verticaux** : d'utiliser une colonne de suspension complète (hormis la crépine témoin quand elle existe) en matériaux composites (solution 4). Les centreurs (de type positif) peuvent être en acier ou en téflon, ou à défaut, de mettre en place un raccord diélectrique standard placé au sommet de la crépine témoin (solution 2).
- **Pour les puits inclinés** : d'utiliser de préférence une manchette en matériau composite (solution 3). A défaut, un raccord diélectrique standard pourrait éventuellement être placé aussi bas que possible (solution 2).

4. MATERIEL DE CENTRAGE

Le choix du matériel servant au centrage des complétions est dicté par les contraintes suivantes :

- être compatible avec la métallurgie de la complétion (corrosion) ; avoir des caractéristiques mécaniques permettant un centrage rigoureux de la colonne de complétion ;
- présenter un minimum d'obstacle à la mise en place du massif de gravier.

Les complétions les plus courantes peuvent comporter jusqu'à trois zones métallurgiques distinctes :

- de la tête de complétion jusqu'au raccord diélectrique : cette zone est homogène et ne comporte que de l'acier au carbone (tubage, matériel de suspension, tubes plein). Des centreurs classiques pour tubage doivent être utilisés dans cette zone ;
- une zone intermédiaire située en entrefer sous le raccord diélectrique : cette zone se caractérise par la présence simultanée d'acier inoxydable pour la complétion et d'acier standard pour le tubage. La longueur de cette zone doit être la plus courte possible. Elle ne permet que l'utilisation de centreurs souples ou rigides en matériau inerte ou composite (fibre de carbone, téflon) ;
- une zone dans le découvert, entièrement en acier inoxydable. Cette zone est parfois élargie dans un diamètre très largement supérieur au tubage sus-jacent. Dans cette zone, les centreurs doivent à la fois être compatible avec la métallurgie de la complétion en acier inoxydable et disposer des caractéristiques mécaniques leur permettant un centrage efficace en dépit des élargissements. Ces centreurs peuvent être eux-mêmes en acier inoxydable (sous certaines réserves, voir ci-après), en fibre de carbone, en matériaux composites inertes, voire même dans certains cas en acier standard.

L'usage de **centreurs en acier inoxydable** dans la zone des crépines est très souvent recommandé par les opérateurs. Mais il doit être uniquement réservé aux complétions ne faisant pas l'objet d'un élargissage.

Dans les zones soumises à un élargissage, la mise en œuvre de centreurs en acier inoxydable est clairement une aberration qu'il convient d'éviter. L'acier inoxydable ne dispose pas en effet

d'une élasticité suffisante pour répondre aux contraintes rencontrées dans les forages profonds. Fortement sollicité, un centreur en acier inoxydable se déformera de façon irrémédiable et définitive (destruction de forme).

Pour prendre un exemple, un centreur en acier inoxydable destiné au centrage de crépines 6"5/8 placées sous un tubage en 9"5/8 dans un réservoir élargi en 15" perdra - dans le meilleur des cas - totalement son efficacité en se déformant pour ne plus conserver au mieux que le diamètre intérieur de ce dernier tubage (légèrement supérieur à 8"1/2). Le centrage de la complétion ne sera pas assuré. Dans certains cas il pourra même être arraché ou détruit et provoquer de graves désordres.

L'usage de **centres standard en acier** est rarement envisagé, mais peut présenter une alternative efficace en l'absence d'une autre solution. Le centreur est alors considéré comme une "anode sacrificielle", c'est à dire qu'il sera progressivement détruit par la corrosion galvanique. Mais comme son rôle s'achève lorsque le massif de gravier a été installé, cette destruction ultérieure n'affectera en aucune façon le centrage. On portera par contre attention aux effets de colmatage que pourraient avoir les résidus de la corrosion (dépôts d'oxydes, incrustations) sur la production : il est donc recommandé de ne pas installer des centres en acier standard directement au niveau des zones crépinées, mais de préférence sur les tubes pleins et dans les espaces de raccordements entre deux crépines.

Les plans de centrage proposés doivent démontrer que les caractéristiques mécaniques à la compression (Restoring Force) des centres qui seront utilisés sont capables de maintenir efficacement la complétion au centre du trou foré, quel que soit le diamètre et l'inclinaison du puits. Les centres ne doivent également pas faire trop fortement obstacle à la mise en place du massif de gravier afin d'éviter la formation de ponts préjudiciables au bon placement du gravier.

5. CARACTERISTIQUES DE LA FILTRATION

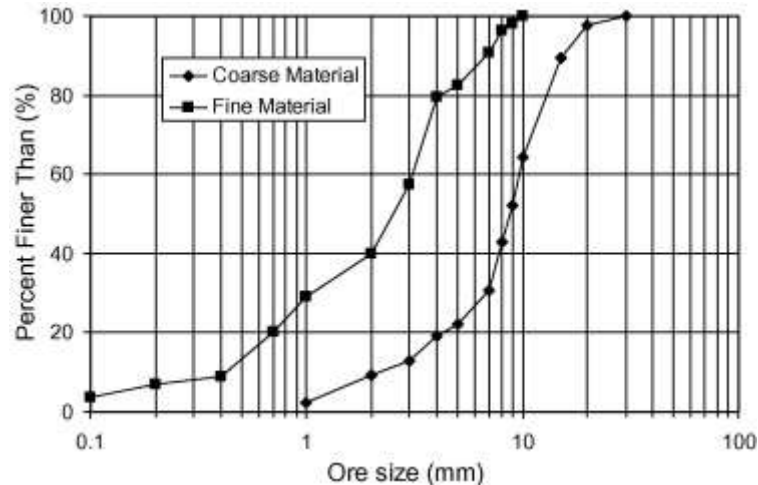
Les éléments de détermination du slot des crépines, proposés ci-après, sont ceux généralement recommandés par la société Johnson (leader mondialement reconnu en la matière) pour le captage des aquifères de type sableux.

4.1. Détermination de la granulométrie des formations

Les analyses granulométriques des formations captées doivent être réalisées en privilégiant les niveaux (et les échantillons) les plus fins. La courbe retenue pour les calculs sera celle considérée comme la plus représentative dans la gamme la plus fine. Dans le cas de formations hétérogènes stratifiées (alternances de matériaux fins et grossiers), ce choix peut s'avérer limitatif : un massif de gravier très fin se retrouvant face à des sables grossiers crée des pertes de charges supplémentaires. Dans ce cas de figure, il est possible d'adapter la granulométrie du massif de gravier en fonction des strates de terrain.

La courbe granulométrique présente le pourcentage en poids des particules en fonction de leurs tailles.

Dans ce qui suit, Dx correspond au diamètre des x % en poids des particules dont la taille est inférieure à D, et qui ne sont donc pas retenues par le tamisage.



Coefficient d'uniformité :

Calcul de la valeur du coefficient d'uniformité : $U = D_{60} / D_{10}$

Les formations sont considérées comme strictement homogènes si $U = 1$, homogènes si $1 < U < 3$, hétérogènes si $U \geq 3$.

La détermination de la granulométrie de la formation permet de définir si un massif filtrant additionnel est nécessaire ou non. Les formations de sable grossier hétérogène n'ont pas besoin d'être filtrées par un massif additionnel : un auto-développement mettra en place un filtre naturel après élimination des particules les plus fines. On considère que, pour un sable très hétérogène ($U > 5$) et grossier $D_{10} > 0,25$ mm, le massif filtrant est facultatif (il peut être nécessaire pour stabiliser la formation).

4.2. Détermination du massif de gravier

Épaisseur du massif filtrant : les épaisseurs recommandées sont les suivantes :

- pour double crépine, épaisseur entre crépines : ≤ 2 pouces ;
- pour crépine simple, épaisseur **minimale** : 2 à 3 pouces ;
- pour crépine simple, épaisseur **optimale** : 8 à 9 pouces.

Massif de gravier : un massif de gravier est obligatoire dès lors que : $U < 3$ et D_{10} formation $< 0,25$ mm. Pour les autres valeurs, l'auto-gravillonnage par les éléments même de la formation peut être envisagé.

Détermination du massif de gravier : le gravier installé doit être capable de retenir entre 40 et 50% (valeur conservatrice 50%) de la formation. Il faut une granulométrie des graviers similaire à celle de la formation (les deux pentes tracées à partir de D_{30} devront être parallèles), augmentée d'un facteur K :

$$D_{30} \text{ gravier} = K \times (D_{30} \text{ formation})$$

$K = 4$ (facteur minimum) sera retenu de préférence pour un sable fin et homométrique ;

$K = 6$ (facteur maximum) pour un sable grossier et hétérométrique.

Lors de l'utilisation de double-crépines, c'est le remplissage qui joue le rôle du gravier. Le gravier doit alors pouvoir retenir au moins 50% de la formation si elle est hétérogène, 60% à 70% si elle est homogène.

Volume du gravier : le volume du gravier est évalué à partir des données de la diagraphie de diamétrage effectuée dans le découvert de préférence après l'opération d'élargissage. A défaut, cette valeur doit être extrapolée lorsque la diagraphie est réalisée avant élargissage. Une réserve de gravier sera prévue au-dessus du sabot du dernier tubage. Cette réserve devra correspondre au minimum à 10% du volume précédemment calculé.

4.3. Détermination du slot des crépines

Le slot choisi pour les crépines doit retenir au minimum 90% du gravier installé :

Slot $\leq$ D10 gravier

Pour les double-crépines, le slot devra nécessairement retenir la totalité du gravier de remplissage.

4.4. Exemple de détermination de la filtration

- tracer les courbes granulométriques des différents échantillons de la formation ;
- choisir la courbe correspondant à l'échantillon représentatif le plus fin ;
- déterminer la valeur D30 de cet échantillon, tracer la pente à partir de ce point ;
- déterminer les valeurs D60 et D10 ;
- calculer le coefficient d'uniformité $U = D60 / D10$;
- si $U < 3$ et $D10 < 0,25$ mm, il faut impérativement prévoir un massif de gravier ;
- multiplier la valeur D30 par le coefficient K choisi (4 à 6) ;
- à partir de ce nouveau point (qui sera le D30 gravier), tracer une droite parallèle à la pente de l'échantillon précédemment tracée ;
- cette droite permet de déterminer la granulométrie du gravier à installer (D10, D30, D50, D60) ;
- le slot des crépines doit être inférieur au D10 du gravier.

6. VITESSE DE L'EAU DANS LES CREPINES

La présence de vitesses excessives d'entrée (ou de sortie dans le cas des forages d'injection) d'eau dans le massif filtrant et dans les crépines apparaît comme l'un des problèmes affectant fréquemment les captages des aquifères clastiques du Bassin Parisien. Les sur-vitesses semblent également jouer un rôle dans les difficultés régulièrement observées pour réinjecter les fluides dans ce milieu.

De manière générale, il convient de rechercher une vitesse d'entrée de l'eau dans les crépines aussi faible que possible :

- afin de se rapprocher du régime laminaire en pompage ;
- de limiter les pertes de charge quadratiques dans le forage ;
- de limiter la vitesse de colmatage des crépines ;
- d'empêcher l'entraînement des fines ;
- de réduire les coûts de production et de maintenance.

Une vitesse d'entrée de 3 cm/s est actuellement considérée comme un seuil critique qu'il est préférable de ne pas dépasser en chaque point de la complétion.

La difficulté majeure pour appliquer cette recommandation provient des réservoirs eux-mêmes qui présentent souvent de très fortes hétérogénéités de production. Pour éviter de dépasser la vitesse critique de 3 cm/s, il convient de choisir comme référence le niveau le plus producteur. On constate alors souvent que le débit maximum utilisable dans de telles conditions n'est pas compatible avec une exploitation rentable de l'ouvrage. Il s'agit probablement d'une des causes qui pénalisent le plus l'exploitation des réservoirs clastiques.

Les solutions disponibles pour limiter au mieux ces effets sont complexes et difficiles à mettre en œuvre. Il s'agit en effet d'essayer de répartir aussi uniformément que possible le débit de production sur l'ensemble de la hauteur potentiellement productrice. Pour ce faire, il faut pouvoir mettre en œuvre des moyens de développement et de stimulation ciblés sur les zones les moins productrices. Un tel objectif est souvent difficile à atteindre - parfois même impossible - et consommateur de temps, ce qui le rend nécessairement coûteux. Assez souvent d'ailleurs, on constate que les résultats obtenus se montrent insuffisants par rapport aux objectifs ciblés malgré les efforts consentis.

Les mesures à appliquer dans le cas de vitesses excessives sont :

- de tenter de re-développer sélectivement les zones les moins productives ;
- de limiter autant que possible le débit d'exploitation à des valeurs permettant de ne pas dépasser les vitesses critiques conseillées ;
- d'avoir recours périodiquement à des opérations de nettoyage permettant de retrouver des conditions d'exploitation acceptables. Le rétro-lavage (inversion de flux) est actuellement la solution préconisée en attendant des solutions plus pérennes encore à l'étude.

7. EXEMPLES DE COMPLETION

Exemple n°1 : puits vertical

L'exemple ci-après correspond à la complétion d'un puits vertical captant l'Albien du Bassin parisien :

- tubage de production 10"3/4 en acier K55 ;
- open-hole foré au diamètre 9"7/8 et élargi en 15" ;
- système de suspension (liner-hanger) ancré dans le tubage. L'ancrage du liner-hanger est réalisé à 30 m (soit 3 longueurs de tube) au-dessus du sabot du tubage 10"3/4. La côte définitive est ajustée pour permettre de positionner les crépines à la profondeur souhaitée ;
- 10 m environ de colonne de suspension en acier API 7"5/8 (K55). Cette colonne est centrée à l'intérieur du tubage 10"3/4 au moyen d'un centreur positif au standard API ;
- raccord de filetage avec joint diélectrique standard ;
- crépine témoin en acier inoxydable ;
- 20 m de tubes inoxydables 7"5/8 avec centreurs positifs en téflon ;
- colonne de captage constituée d'une alternance de crépines 7"5/8 et de tubes pleins 7"5/8 en acier inoxydable. Cette colonne est centrée au moyen de centreurs diélectriques à lames souples (acier inox + fibre de verre) ;
- piège à sédiment 7"5/8 (9 à 12 m) en acier inoxydable avec bouchon de pied conique (bull nose) ;
- injection du massif de gravier, mise en eau et développement progressif de l'ouvrage ;

- en fin de développement, vérification du niveau de gravier, complément éventuel et obturation de l'annulaire.

Exemple n°2 : puits dévié

Le captage décrit ci-après correspond à la complétion d'un puits dévié captant l'Albien du Bassin parisien :

- tubage de production 10"3/4 en acier K55 ;
- open-hole au diamètre 9"7/8 ;
- système de suspension (liner-hanger) ancré dans le tubage et comportant un packer permettant d'obturer l'annulaire. L'ancrage du liner-hanger est réalisé à 20 m environ au-dessus du sabot du tubage 10"3/4. La côte exacte est ajustée pour permettre de positionner les crépines à la profondeur souhaitée ;
- 20 m environ de colonne de suspension en acier API 7" (K55) jusqu'au toit du réservoir. Cette colonne est centrée à l'intérieur du tubage 10"3/4 au moyen de 2 centreurs positifs au standard API ;
- raccord de filetage 7" x 6"5/8 avec joint diélectrique standard ou manchette de 1 à 3 m en fibre de verre ;
- colonne de captage constituée d'une alternance de crépines double 8"5/8 x 6"5/8 et de tubes pleins 6"5/8 en acier inoxydable. Cette colonne n'est pas centrée. Elle repose sur la génératrice basse du forage ;
- piège à sédiment 6"5/8 (9 à 12 m) en acier inoxydable avec bouchon de pied conique (bull nose) ;
- si souhaité, obturation de l'annulaire en tête de liner-hanger ;
- mise en eau et développement progressif de l'ouvrage.

Annexe 7

Diagraphies



Version validée le 24 novembre 2015

FICHE TECHNIQUE 072

CONTRÔLES DE CIMENTATION SONIQUES ET ULTRASONIQUES

Les mesures soniques permettent d'évaluer la qualité de l'adhérence du ciment (bonding) aux parois du tubage et du forage. Le CBL-VDL (Cement Bond Log - Variable Density Log) est un outil rustique et efficace dont il convient toutefois de connaître les limites d'utilisation. Il se montre souvent défaillant ou inadapté lorsqu'il est réalisé dans des puits fortement déviés, sur des tubages en gros diamètre ou avec des ciments de faible densité.

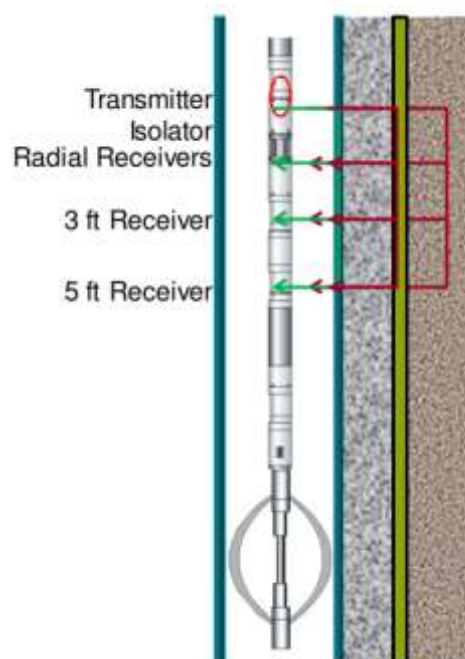
Les mesures ultrasoniques ont été développées et mises au point pour tenter de compenser les limites inhérentes aux mesures soniques dont elles viennent renforcer, compléter et faciliter l'interprétation. Les données recueillies avec les outils ultrasoniques permettent en effet de mieux discriminer et interpréter les discontinuités qui peuvent apparaître dans un annulaire cimenté, avec une résolution très largement supérieure à la seule mesure axiale fournie par un CBL. Dans certains cas, dont l'analyse des laitiers allégés fait partie, elles sont même l'unique moyen disponible pour tenter d'identifier et d'appréhender la qualité des cimentations.

Cette note a pour objectif de rappeler le mode de fonctionnement de ces outils, leurs limites et les conditions permettant une interprétation correcte de la qualité des cimentations.

A - LES OUTILS SONIQUES

1. Mode de fonctionnement

Le CBL-VDL est un outil sonique. Les ondes émises par un émetteur acoustique sont recueillies par deux récepteurs espacés d'environ 2", qui mesurent le temps de trajet et l'amplitude des ondes réfractées par les différents éléments constituant le puits (tubage, ciment, terrain). Ce log est souvent utilisé en combinaison avec un GR (Gamma-Ray) permettant une corrélation géologique et un CCL (Casing Collar Locator) permettant une corrélation tubage. L'amplitude du signal acoustique réfractée par le tubage sera d'autant plus faible que la gaine de ciment est bien collée aux parois (bonding) et qu'il n'existe pas de vides ou d'espaces non remplis par le ciment (channeling).



2. Les limites de l'outil

Le CBL-VDL est un outil fondamentalement qualitatif. Il ne permet pas de quantifier la répartition du ciment dans l'annulaire et ne fournit qu'une réponse moyennée de la zone touchée par le signal. Les effets de channeling (absence localisée de ciment) ne sont, de ce fait, pas toujours détectés.

Même si le placement du ciment peut apparaître correct, la lecture d'un faible bonding sera interprétée par l'outil comme un manque ou une absence de ciment, alors qu'il peut s'agir seulement d'une faible adhérence du ciment sur le tubage.

On peut donc dire que le CBL, lorsqu'il est positif, assure la présence d'un bon accrochage du ciment. Mais il ne prouve pas vraiment que la cimentation annulaire soit de bonne qualité et que l'étanchéité soit assurée. Par contre, une mauvaise réponse CBL est un indice certain d'une mauvaise adhérence du ciment et donc, d'un risque d'étanchéité défectueuse.

Des CBL réalisés régulièrement en cours d'exploitation montrent parfois une détérioration du bonding dans le temps. Cela s'explique par les contraintes mécaniques (variations de température et de pression), qui favorisent le décollement progressif de la gaine de ciment et provoquent la formation d'un micro-annulaire derrière le tubage. A contrario, on a pu observer que certains CBL s'améliorent dans le temps, particulièrement en face des formations argileuses. On peut interpréter ce phénomène comme un fluage des formations encaissantes qui viennent se resserrer autour du tubage, améliorant de la sorte l'adhérence initiale (bonding) et l'étanchéité résultante de l'annulaire.

L'interprétation du CBL-VDL est fortement dépendante de la qualité du calibrage de l'outil. La valeur de l'amplitude correspondant à une absence de ciment (amplitude de "free pipe") doit être précisément évaluée et calibrée pour permettre une détermination correcte du bonding. Une faible dérive peut entraîner une forte variation de la réponse observée.

On notera qu'un bon centrage de l'outil est primordial pour la qualité de la mesure, ce dont il faudra particulièrement s'assurer en puits inclinés (même faiblement) et pour les tubages de gros diamètre. Un outil de mesure décentré induira une mesure optimiste.

La réponse du CBL se situera dans une gamme d'autant plus étroite que le diamètre du tubage va augmenter. La précision de la mesure diminue donc avec l'augmentation du diamètre des tubages.

On notera également que le CBL est influencé par le niveau de séchage du ciment. Un strict minimum de 48 heures de séchage est recommandé avant de réaliser un log CBL. Un délai de 72 heures permettra une meilleure réponse.

Il faut enfin mentionner que la qualité des réponses du CBL va directement dépendre de la densité des matériaux présents dans l'annulaire. Il en résulte qu'il va fournir des données plus difficilement interprétables avec les ciments allégés et plus encore avec les ciments super-allégés. Il s'agit là clairement d'un handicap sérieux à son utilisation pour les contrôles effectués sur ce type de cimentation.

3. Méthode d'analyse : le bond index

Pour évaluer la qualité du "bonding" d'une cimentation, la société Schlumberger propose de calculer un indice d'adhérence (bond index), à partir des données d'amplitude recueillies par le récepteur 3" du CBL-VDL.

Le bonding maximal (indice 100%) correspond à l'amplitude minimale enregistrée sur le log CBL-VDL analysé.

Le bonding minimal (indice 0%) correspond à la valeur d'amplitude enregistrée en l'absence de ciment (free pipe) ou à défaut à la valeur théorique fournie pour le tubage concerné :

Tubage 5"	= 76 mv
Tubage 7"	= 62 mv
Tubage 7"5/8	= 59 mv
Tubage 9"5/8	= 51 mv
Tubage 10"3/4	= 48 mv
Tubage 13"3/8	= 40 mv

L'équation suivante, proposée par Schlumberger, permet de calculer la valeur de l'amplitude A (en mv) correspondant à un bond index de n% :

$$A \text{ mv} = 10^{((1-n) \times \log A0) + (n \times \log A100)}$$

où A0 correspond à l'amplitude du bonding en l'absence de ciment (free pipe) et A100 à l'amplitude d'un annulaire totalement cimenté.

Exemple : calcul de l'amplitude correspondant à un bonding de 80%, avec des valeurs d'amplitude A0=81 mv et A100=1 mv :

$$A = 10^{(0,2 \times \log(A0) + 0,8 \times \log(A100))}$$

$$A = 10^{(0,2 \times \log(81) + 0,8 \times \log(1))}$$

$$A = 2,41 \text{ mv}$$

Une amplitude de 2,41 mv sur le log correspond donc à un bonding de 80%. Il suffit, dès lors, de tracer une droite correspondant à cette amplitude pour visualiser les zones dont la cimentation comporte un bonding de 80%. La même démarche peut être effectuée pour d'autres valeurs de bonding.

L'adhérence calculée au moyen du bond index (BI) doit seulement être considérée comme indicative. Elle est influencée par de nombreux paramètres. Pour un ciment lourd par exemple, on considère le plus souvent que :

- un bonding inférieur à 60% correspond à une cimentation incomplète et insuffisante ;
- de 60% à 80%, la qualité de l'adhérence est jugée moyenne, et l'étanchéité n'est pas garantie ;
- à partir d'un bonding de 80%, l'étanchéité de l'annulaire est généralement considérée comme acquise ;
- de 80% à 90%, la qualité de l'adhérence peut être considérée comme bonne ;
- de 90% à 100%, la qualité de l'adhérence est excellente.

La représentation VDL permet d'observer la réponse de la totalité du train d'ondes. Quand l'adhérence est bonne, on observe une réponse plus rapide des ondes les plus pénétrantes. Ce phénomène est alors répertorié comme la réponse « formation » au signal du CBL.

Outre la valeur du Bond Index, il est admis, par certains opérateurs, que l'isolation verticale de l'annulaire est assurée dès lors qu'une hauteur suffisante de l'intervalle, fonction de cet indice, est atteinte. Cette notion très pétrolière "d'étanchéité" paraît difficile à appliquer aux besoins de la géothermie. Elle ne répond d'ailleurs pas aux cas fréquemment rencontrés de channeling. On retiendra toutefois que certaines formations sont suffisamment plastiques pour se resserrer progressivement autour des tubages et assurer ainsi, dans le temps, l'étanchéité naturelle et définitive des annulaires.

4. Récapitulatif du CBL-VDL

Le CBL-VDL est un outil de contrôle rustique dont il convient de connaître les limites d'utilisation. Il se montre particulièrement défaillant ou inadapté lorsqu'il est réalisé dans des puits fortement déviés, sur des tubages en gros diamètre ou avec des ciments de faible densité.

On retiendra que le CBL, lorsqu'il est positif, assure la présence d'un bon accrochage du ciment, mais cela ne prouve, en aucun cas, que la cimentation annulaire soit de bonne qualité, ni que

l'étanchéité soit assurée. Une mauvaise réponse du CBL-VDL est, par contre, un indice certain d'une mauvaise adhérence du ciment et donc d'une étanchéité défectueuse.

Pour tenter de réaliser une interprétation aussi réaliste que possible, il est important de pouvoir coupler et comparer les données fournies par le CBL-VDL, avec les conditions géométriques du forage, les paramètres de la cimentation et le déroulement des opérations correspondantes.

Le calcul permet alors d'estimer, en tenant compte des réserves mentionnées au §2, le niveau de qualité des cimentations.

Résumé des réponses du CBL-VDL :

Qualité de la cimentation	Amplitude	VDL
Bonne	Amplitude faible	Signal formation fort
Pas de ciment	Amplitude élevée	VDL rectiligne Pas de signal formation Dessin de chevrons en forme de V marquant les manchons de tubage
Présence partielle de ciment	Amplitude faible à modérée	Réponse VDL variable
Micro-annulaire	Amplitude modérée	Réponse VDL variable
Ciment sans adhérence sur les formations	Amplitude faible	Très faible réponse VDL Pas de signal formation ni casing
Bonne dans formations fortement indurées	Amplitude variant de faible à élevée	Le signal formation couvre toutes les réponses du VDL

5. Choix des outils de contrôle

Les limites de fonctionnement de l'outil CBL-VDL sont listées aux paragraphes 2 et 4 ci-dessus. Il apparaît assez clairement que cet outil donne des réponses difficilement interprétables dans les cas suivants :

- ciment à faible densité (laitiers allégés ou super-allégés de densité inférieure à 1,6) ;
- tubage en gros diamètre (10"3/4 et plus) lorsque les puits sont déviés (problème d'excentration de l'outil et des tubages) ;
- colonnes imbriquées ;
- centrage défectueux ou insuffisant des tubages : placage de la colonne sur les parois du puits, trajectoire chaotique, build-up à fort gradient.

6. Exemple de CBL-VDL

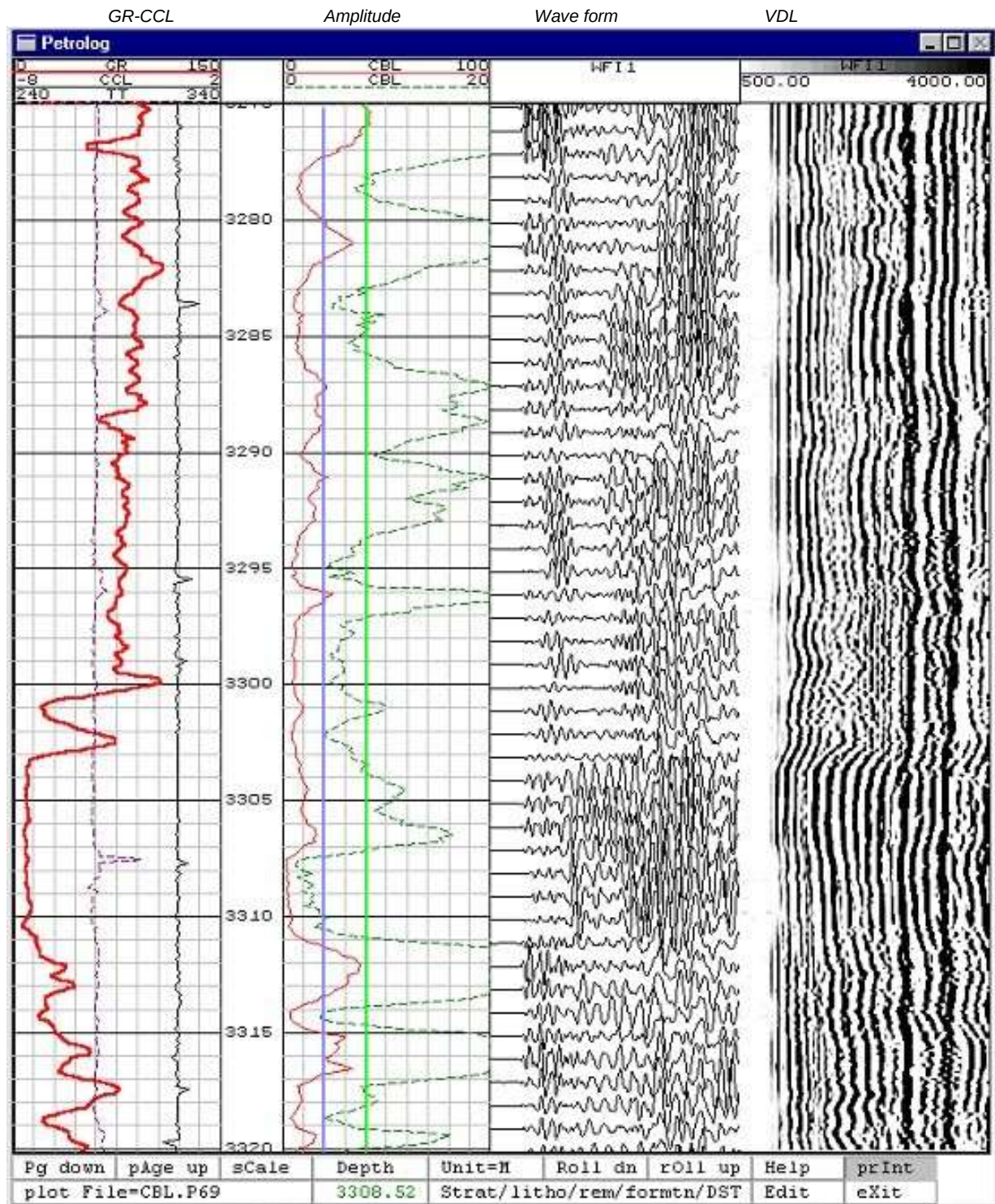
Dans le log présenté ci-après, la colonne libellée CBL100 CBL20 indique la réponse sonique (amplitude) du CBL au niveau des deux récepteurs. Les deux colonnes suivantes sont des représentations (waveform) du VDL.

Comme expliqué dans cette note, une amplitude importante du CBL indique une adhérence faible. Inversement, une amplitude faible indique une bonne adhérence.

L'amplitude du bonding minimal (free pipe) n'est pas disponible, on prendra donc la valeur théorique du casing correspondant (casing 5", $A_0 = 76$ mv). L'amplitude du bonding maximal est observée à 3308 ft avec une valeur $A_{100} = 1,8$ mv.

La valeur de l'amplitude calculée pour un bonding de 60% est $A = 8,04$. Elle est reportée sur le log par le tracé d'une droite de couleur **verte**. Pour un bonding de 80% cette valeur est $A = 3,81$. Elle est reportée sur le log par une droite de couleur **bleue**.

Le ciment est présent partout. Mais on constate que le bonding est globalement de mauvaise qualité dans la partie haute du log (2275-3303 ft). Il apparaît de qualité moyenne dans la partie basse (3303-3320 ft). Un bonding de plus de 80% ne se rencontre de fait qu'entre 3307 ft et 3311 ft.



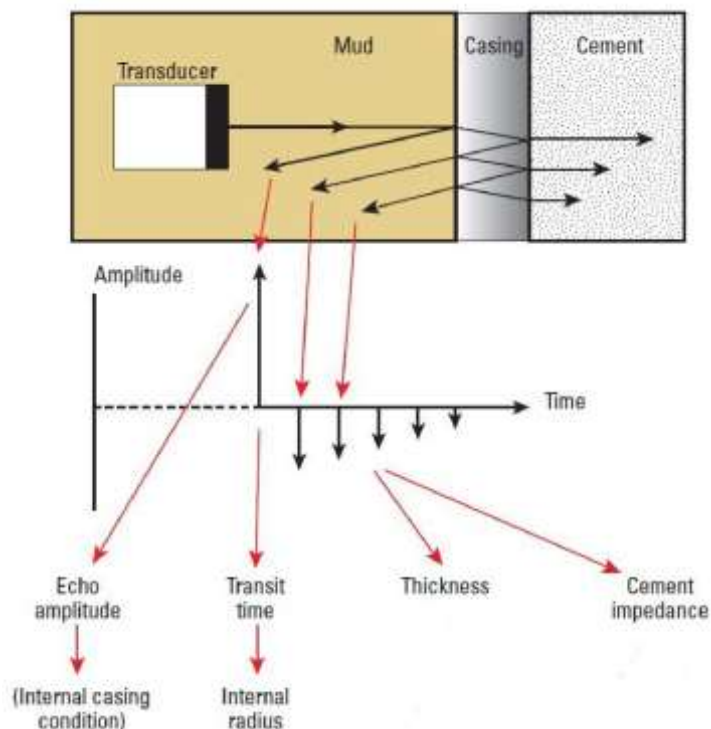
B - LES OUTILS ULTRASONIQUES

Lorsque l'on souhaite évaluer de façon précise la qualité d'une cimentation présentant une faible adhérence, il apparaît, en général, préférable et recommandé de réaliser une diagraphe ultrasonique en complément des données obtenues avec un outil plus classique de type CBL-VDL. Les mesures ultrasoniques permettent, en effet, de compenser les limites inhérentes aux mesures soniques et facilitent, dans de nombreux cas, leurs interprétations.

1. Principe

Les outils ultrasoniques utilisés pour le contrôle des cimentations et des tubages émettent des trains d'ondes à haute fréquence couvrant, par rotation de l'outil émetteur-récepteur, la totalité de la circonférence du tubage. Les ondes réfléchies en écho par les interfaces acoustiques sont analysées afin de déterminer la nature des matériaux traversés.

L'onde à haute fréquence est émise par l'outil au travers du fluide de forage vers les parois du tubage. Quand le train d'ondes atteint une interface acoustique (c'est-à-dire le contact entre deux matériaux différents), une faible partie de l'énergie est absorbée par les matériaux et la majorité est réfléchiée vers le récepteur. Le rapport entre énergie absorbée et énergie réfléchiée dépend du contraste d'impédance acoustique entre les matériaux constituant l'interface acoustique.



L'impédance acoustique d'un matériau est définie par le produit de sa densité et de la vitesse de propagation des ondes sonores à l'intérieur de ce matériau. Le tableau ci-après fournit les valeurs d'impédance acoustique pour différents matériaux rencontrés dans un forage :

Table 3 Acoustic Properties of Materials (Smolen, 1996)			
Material	Density (kg/m ³)	Acoustic Velocity (m/sec)	Acoustic Impedance (MRayl)
Air	1.3-130	330	0.0004-0.04
Water	1000	1500	1.5
Drilling fluids	1000-2000	1300-1800	1.5-3.0
Cement slurries	1000-2000	1800-1500	1.8-3.0
Cement (Litefill)	1400	2200-2600	3.1-3.6
Cement (Class G)	1900	2700-3700	5.0-7.0
Limestone	2700	5500	17
Steel	7800	5900	46

Dans le cas d'un laitier super-allégé du type LiteCrete (densité 1,20), les propriétés suivantes peuvent être retenues :

Densité :	1200	kg/m ³
Vitesse acoustique :	2000-2400	m/sec
Impédance acoustique :	2,4-2,9	MRayl

L'analyse des ondes réfléchies par l'outil ultrasonique détermine des valeurs d'impédance acoustique et celles-ci permettent de caractériser les différents types de matériaux présents dans le forage. L'outil fournit également trois informations complémentaires : le diamètre interne du tubage, la rugosité de sa surface et l'épaisseur d'acier résiduelle.

La valeur de l'impédance du ciment est une fonction directe de la qualité de la cimentation. Une bonne cimentation déterminera une impédance plus élevée qu'une cimentation de mauvaise qualité ou montrant des défauts dans la mise en place du laitier. Il est ainsi possible, dans de nombreux cas, de discriminer les réponses dues :

- à des effets de channeling, c'est à dire au remplacement incomplet de la boue par le laitier de ciment ;
- à une contamination du ciment par des fluides, c'est à dire à un mélange du laitier avec d'autres fluides (boue, eau, gaz) ;
- aux caractéristiques spécifiques des ciments allégés, c'est à dire aux faibles contrastes de densité qu'ils présentent par rapport aux fluides pouvant exister dans le milieu annulaire ;
- à la présence d'importantes poches de fluides individualisées (eau ou gaz) ;
- à la présence de matériel spécifique (centreurs ou autres) positionné dans l'annulaire cimenté.

2. Les outils ultrasoniques

Parmi les outils ultrasoniques disponibles, on retiendra l'USIT de Schlumberger, le CAST d'Halliburton et l'URS de Weatherford qui sont trois des principaux outils potentiellement utilisés dans le cadre de la géothermie profonde du Bassin parisien.

2.1. L'outil USIT de Schlumberger

L'USIT (UltraSonic Imager Tool) utilise un seul émetteur-récepteur (transducer) situé dans une tête rotative (USRS) placée en pied de sonde. L'outil émet des trains d'ondes entre 200 et 700 kHz et récupère les ondes réfléchies au niveau des interfaces internes et externes du tubage.

Le décalage mesuré entre les trains d'ondes émis et reçus permet d'évaluer la qualité de l'adhérence du ciment sur l'acier. La fréquence de résonance du tubage fournit, quant à elle, l'épaisseur résiduelle d'acier de la colonne inspectée.

L'émetteur-récepteur monté dans la tête rotative permet de scanner la circonférence complète du tubage. Cette couverture à 360° rend possible l'évaluation de la qualité de l'adhérence ainsi que la détermination de l'état de surface interne et externe du tubage (rayon interne, rayon externe, épaisseur). Les hautes résolutions angulaires et verticales disponibles permettent de détecter de faibles effets de channeling (résolution théorique de 1,2", soit 30,5 mm).

2.2. L'outil CAST d'Halliburton

Le CAST (Circumferential Acoustic Scanning Tool) d'Halliburton est similaire à l'USIT qu'il concurrence, avec toutefois une présentation des logs légèrement différente.

Halliburton propose également l'ACE (Advanced Cement Evaluation) qui est une méthode d'analyse permettant de réinterpréter très finement toutes données soniques et ultrasoniques disponibles, y compris dans le cas des ciments super-allégés.

2.3. L'outil URS de Weatherford

L'URS (Ultrasonic Radial Scanner) fonctionne selon le même principe que l'USIT mais utilise deux émetteurs-récepteurs au lieu d'un seul. Le premier est situé dans la tête rotative et fournit une couverture à 360°. La cartographie obtenue permet d'identifier des effets de channeling avec une résolution de 5°. Le deuxième est situé dans le corps de la sonde. Il enregistre en continu la vitesse et l'impédance acoustique du fluide de remplissage qui est un paramètre influençant fortement la réponse de l'outil.

Le HBC est un outil combinant un URS, un CBL et un CCL (Casing Collar Locator).

Nota : dans la suite de cette note on utilisera indifféremment le terme générique USIT pour qualifier l'ensemble des outils ultrasoniques et le terme CBL pour l'ensemble des outils soniques.

3. Avantages de l'USIT sur le CBL

L'USIT dispose de 3 avantages sur le CBL :

1 - L'USIT fournit une image panoramique de la cimentation. L'image obtenue discrimine la distribution du matériel présent sur la circonférence du tubage (solide, liquide, gaz), avec une résolution largement supérieure à celle du CBL. Un faible effet channeling peut être détecté. Ce n'est pas le cas avec des outils soniques comme le CBL, où l'absence

de mesure sur l'ensemble de la circonférence du tubage ne permet pas de repérer les effets de channeling. Il en va de même dans le cas d'un micro-annulaire qu'un CBL fera apparaître comme une perte d'adhérence (debonding).

2 - L'USIT permet non seulement d'évaluer la qualité de la cimentation (Cement Evaluation), mais aussi de déterminer l'état du tubage (Corrosion Mode). L'USIT fournit, en effet, des informations supplémentaires sur la géométrie du tubage : corrosion interne et externe, épaisseur résiduelle d'acier.

3 - Dans la plupart des cas, l'USIT permet une interprétation plus facile et moins ambiguë que le CBL dont il facilite largement l'interprétation.

Plusieurs facteurs peuvent toutefois affecter les performances des outils CBL et USIT :

- le CBL peut facilement conduire à une interprétation erronée en présence d'un micro-annulaire entre tubage et ciment (effet de décollement). Généralement, lorsque la cimentation a été correctement effectuée, une mise en pression du tubage entre 1000 et 1500 psi (70 à 100 bar) supprime ce défaut. Les outils ultrasoniques sont moins affectés par ce phénomène que le CBL, sauf en présence de gaz qui, au contraire, en amplifie les effets ;
- **le centrage défectueux du tubage à l'intérieur du forage** peut très sensiblement affecter les mesures du fait de la moindre épaisseur de ciment sur la génératrice basse et de la faible distance entre tubage et formation. Une gaine de ciment d'une épaisseur minimale d'environ 3/4" (20 mm) doit être présente autour du tubage afin d'obtenir une réponse véritablement interprétable. Un décentrage des annulaires est souvent observé en géothermie profonde dans le cas des colonnes 13"3/8 ainsi que, mais dans une moindre mesure, dans le cas des colonnes 9"5/8 ;
- **un bon centrage des outils de mesure** USIT et CBL à l'intérieur du tubage investigué est également fondamental. Il s'agit d'un facteur affectant fortement l'analyse des tubages inclinés en gros diamètre. Un centrage insuffisant des outils est fréquemment soupçonné ou observé sur les colonnes en diamètre 13"3/8 et 9"5/8 utilisées en géothermie ;
- les mesures ultrasoniques sont très sensibles aux caractéristiques du fluide présent dans le forage. C'est la raison pour laquelle l'URS inclut un deuxième émetteur-récepteur dédié à la mesure de l'impédance du fluide de remplissage. Pour faciliter l'analyse, on portera donc attention à ce que le fluide de forage présente des caractéristiques aussi homogènes que possible sur l'ensemble de la colonne. Le CBL n'est pas affecté ;
- certaines formations à réponse rapide peuvent fortement dégrader les données du CBL. L'interprétation de l'USIT n'est pas affectée par ce facteur ;
- **l'usage de ciments allégés et super-allégés** rend parfois délicate l'interprétation des données en raison des réponses soniques très similaires des liquides et du ciment. On notera toutefois que le CBL est largement plus affecté par ce facteur que l'USIT. Ce dernier apporte des informations complémentaires, de surcroît réparties sur toute la circonférence du tubage. Il est donc fortement recommandé d'associer les données des deux outils pour analyser les cimentations réalisées avec des laitiers allégés (densité 1,40), et à fortiori avec des laitiers super-allégés (densité 1,20) ;

- **la durée de l'attente de séchage** du ciment (WOC) est un facteur particulièrement important pour l'interprétation du CBL. Une diaggraphie réalisée trop rapidement après une cimentation induit le plus souvent de faibles amplitudes. Une attente de séchage "efficace" insuffisante peut produire la formation d'un micro-annulaire. Dans les deux cas, on obtient la constatation erronée d'une mauvaise adhérence. L'USIT paraît moins concerné.

4. Utilisation de l'USIT en géothermie

Dans le contexte de la géothermie profonde du Bassin parisien, l'usage du CBL-VDL est généralement suffisant pour apprécier la qualité de la cimentation des tubages. Il existe toutefois deux cas spécifiques où la mise en œuvre d'un USIT (ou URS ou similaire) se justifie pleinement :

- lorsqu'une mauvaise adhérence (bonding) est détectée par le CBL sur des laitiers standards (densité supérieure à 1,60). Dans ce cas, l'USIT réussit souvent à lever l'ambiguïté de l'interprétation en permettant de déterminer s'il s'agit d'un réel défaut d'adhérence, de la présence d'un micro-annulaire (décollement de la gaine de ciment), ou d'un effet de channeling (cimentation partielle) ;
- lorsque l'on souhaite analyser la qualité d'une cimentation réalisée avec des laitiers allégés ou super-allégés. A cause du manque de contraste, le CBL est en effet incapable de discriminer correctement un ciment allégé d'un fluide (eau ou gaz). Il détermine alors un défaut d'adhérence ou une absence de ciment. Il ne permet donc pas, à lui seul, d'évaluer le niveau de qualité d'une cimentation effectuée avec ce type de laitier. L'USIT apporte à la fois des informations supplémentaires (en particulier, les valeurs des impédances acoustiques des différents matériaux) et un niveau de résolution très largement supérieur qui permettent, dans la plupart des cas, de mieux interpréter la qualité de la cimentation.

Le retour d'expérience concernant l'utilisation des outils ultrasoniques en géothermie profonde est encore relativement limité. L'usage de ces outils se développe, néanmoins, avec l'emploi de plus en plus fréquent des ciments allégés. On peut considérer dès à présent :

- que l'USIT apparaît comme le seul outil actuellement disponible sur le marché permettant d'approcher la qualité des cimentations réalisées avec des laitiers allégés ou super-allégés ;
- que les données issues des outils CBL et USIT se montrent très souvent fortement influencées par les phénomènes d'excentration souvent constatés dans les puits déviés avec des tubages en gros diamètre.

Face aux insuffisances du CBL, la mise en œuvre de l'USIT pour analyser les cimentations réalisées avec des laitiers allégés (densité inférieure à 1,60) se montre, en effet, incontournable. Mais les données issues de l'USIT sont rarement suffisantes à elles seules : il est donc fortement conseillé de réaliser les mesures USIT **en complément** des informations d'un CBL. C'est encore plus vrai avec les laitiers à très basse densité (inférieure à 1,40) dont l'interprétation, même avec l'appui des données du CBL, s'avère souvent délicate, compte tenu du faible niveau d'impédance acoustique de ces ciments. Dans la plupart des cas, les analyses ont tendance à sous-estimer la qualité réelle des cimentations contrôlées.

D'autre part, dans les puits inclinés construits avec des tubages en gros diamètre (9"5/8 et plus), les données issues des CBL et des USIT sont fréquemment affectées par des défauts de centrage. Il peut s'agir d'un défaut de centrage de l'outil de mesure à l'intérieur du tubage, ou d'un

défaut de centrage du tubage lui-même, dans le forage (annulaire excentré), ou de la somme de ces deux défauts. Pour ces raisons, les interprétations faites sur des tubages en gros diamètre fortement inclinés (qui sont des cas fréquents en géothermie profonde) peuvent s'avérer délicates et conduire, elles aussi, à sous-estimer la qualité réelle des cimentations. Normalement, ce phénomène sera d'autant plus accentué que les laitiers analysés seront de faible densité.

On notera enfin que, même avec l'aide de l'USIT, l'approche qualitative de certaines cimentations spécifiques (tubages en matériaux composites, annulaires à faible tolérance) reste encore peu accessible.

Le choix des outils de contrôle des cimentations pourrait être basé sur la grille suivante :

Laitiers lourds (densité > 1,60)	CBL
Laitiers lourds dont le CBL détermine une adhérence difficilement interprétable	USIT en complément du CBL
Laitiers allégés (densité 1,60-1,40) et super-allégés (densité 1,40-1,20)	CBL+USIT

Sur le plan opératoire, on apportera une attention toute particulière à contrôler et limiter les problèmes d'excentration des tubages et des outils de logging, à faire en sorte que les attentes de séchage dites "efficaces" soient respectées, et à s'assurer de la présence d'un fluide de remplissage aussi homogène que possible pendant l'opération de logging.

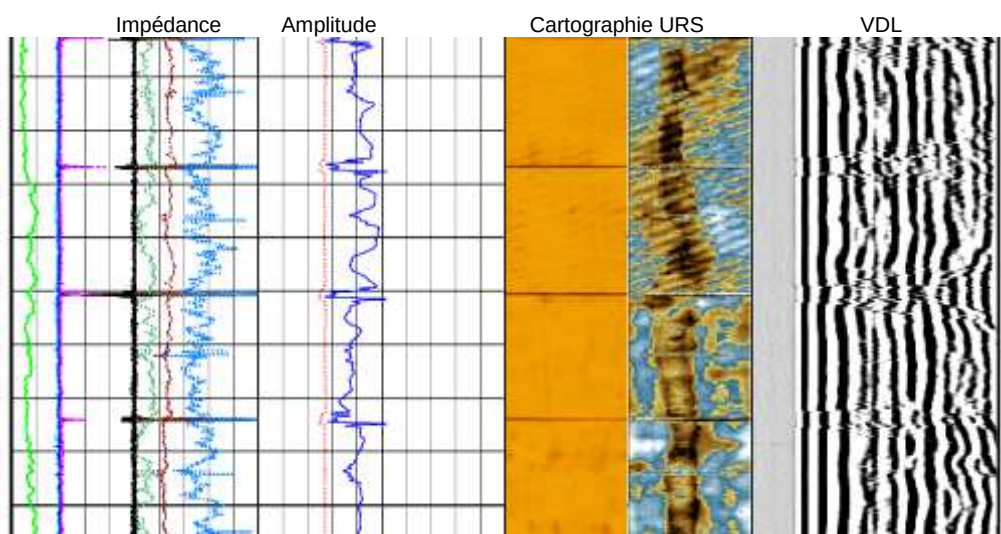
5. Exemple

L'exemple ci-après est extrait d'un log HBC réalisé en région parisienne sur un tubage 9"5/8 cimenté avec un laitier de densité 1,20. La valeur de l'amplitude mesurée par le CBL est élevée, signifiant une adhérence faible à nulle. Le VDL indique une absence probable de ciment avec une forte réponse du tubage et une faible réponse des formations. L'URS montre, de son côté, un écart important entre les valeurs minimales et maximales de l'impédance acoustique, révélateur d'un effet de channeling ou d'un décentrage.

Ce log peut être interprété de deux manières :

- il peut s'agir d'un mauvais déplacement du laitier (channeling). Le ciment (en sombre sur la cartographie URS) est remonté dans l'annulaire en suivant un cheminement préférentiel qui laisse en place une partie du fluide initial (en clair) ;
- il peut être également interprété comme un tubage mal cimenté et fortement excentré.

Dans le descriptif du déroulement des opérations de cimentation, il est indiqué le retour en surface d'un volume important de laitier pendant la chasse. On peut donc considérer que le channeling est l'interprétation la plus probable. Cette section de l'annulaire ne serait donc pas étanche, avec seulement 30% à 40% de l'annulaire rempli de ciment.





Novembre 2018

FICHE TECHNIQUE 073

CONTRÔLE DES TUBAGES PAR DIAGRAPHIES (DIAMETREURS)

L'objectif de cette note technique est de décrire les différents outils de diagraphie disponibles en géothermie pour contrôler l'état des tubages des forages de production et d'injection et ainsi permettre le suivi de leur évolution en cours d'exploitation. La très grande majorité des forages géothermiques profonds étant constituée par des tubages en acier, les outils développés pour les besoins de l'industrie pétrolière sont adaptés au domaine de la géothermie. Des développements récents permettent de diagnostiquer également des ouvrages particuliers, constitués notamment de tubages en matériaux composites (cf. outils ultrasoniques).

Il est d'autre part proposé une méthode d'analyse permettant de quantifier l'endommagement d'un tubage en acier à partir des données issues des diagraphies de contrôle.

1. OUTILS DE CONTRÔLE DES TUBAGES : LES DIAMETREURS

Du fait des contraintes imposées par des débits d'exploitation particulièrement élevés (de l'ordre de 200 à 400 m³/h) nécessitant des diamètres importants afin de limiter les pertes de charge dans les tubages, les colonnes de production et d'injection mises en place dans les puits géothermiques font partie intégrante de la structure des ouvrages. De ce fait, et contrairement à l'architecture des puits pétroliers équipés de complétion amovible, ces colonnes ne peuvent pas être remplacées.

Les tubages d'un puits géothermique subissent deux principales formes d'agression :

- en cours de travaux : **une agression mécanique** liée aux frottements du train de tiges dans les puits déviés. L'usure qui en résulte est particulièrement observée sur la génératrice basse des colonnes où elle sera la plus marquée. Les tubages en acier sont généralement peu sensibles à ce type d'usure. Par contre, les tubages en matériaux composites, et dans une moindre mesure les tubages en acier spéciaux (acier inoxydable par exemple), peuvent se montrer particulièrement sensibles à ce phénomène ;
- en cours d'exploitation :
 - une **agression chimique et/ou bactériologique** provoquée par le fluide géothermal circulant à l'intérieur des colonnes. L'endommagement subi (lié aux phénomènes de dépôt et de corrosion) peut être suffisant pour dégrader les conditions d'exploitation, contraindre à des travaux de réhabilitation (rechemisage par exemple), voire même conduire à un arrêt de l'exploitation lorsque le tubage est trop dégradé (perçement) ;
 - l'extrados des colonnes est localement en contact avec les fluides circulant dans les aquifères traversés. Cette partie externe de la colonne, plus ou moins bien protégée par le remplissage de ciment, pourra subir les effets d'une corrosion d'autant plus marquée que la cimentation initiale aura été déficiente ou de mauvaise qualité.

Afin d'assurer la pérennité des ouvrages relative à l'étanchéité des tubages, il est donc primordial de vérifier l'état de la colonne en fin de travaux (état initial) puis périodiquement en cours d'exploitation. Dans le cadre des permis d'exploitation de l'aquifère du Dogger en Ile-de-France, dont le fluide est particulièrement agressif, la fréquence des contrôles est définie par arrêté préfectoral (diagraphies réglementaires) : a minima, elle correspond à une mesure du ou des diamètre(s) interne(s) tous les 5 ans pour les puits de production et à une mesure tous les 3 ans pour les puits d'injection soumis à des pressions en tête plus importantes. Des mesures sont également réalisées à l'occasion des travaux d'entretien des puits (curage).

Trois familles d'outils de diagraphie sont disponibles pour obtenir des mesures de diamètre des tubages (d'où leur nom générique de diamètreur) : **des outils mécaniques, des outils ultrasoniques et, depuis récemment, des outils électromagnétiques**. Selon la méthode employée, l'épaisseur des tubages est directement mesurée ou évaluée de manière indirecte.

Il faut également citer pour information les inspections visuelles par caméra vidéo qui peuvent être utilisées en géothermie profonde lorsque la clarté (visibilité) et la température du fluide le permettent, pour ausculter les colonnes de complétion et vérifier l'état des crépines et la présence d'un massif filtrant dans les forages captant les réservoirs de l'Albien et/ou du Néocomien notamment.

1.1. Les outils mécaniques

Les outils mécaniques d'inspection des tubages sont des diamètres multi-bras (CIT, MIT, MSC ou similaire) comportant 24 à 72 bras palpeurs, chacun fournissant la mesure du rayon interne du tubage. Ces outils sont simples à mettre en œuvre et donnent une image plus ou moins précise de l'état de la surface interne du tubage. Relativement peu coûteux, ce sont les plus fréquemment utilisés. Leur usage est par contre à proscrire pour les sections du forage équipées de crépines (risque de coincement).

Le nombre de bras palpeurs définit la précision de la surface analysée. Un outil à 40 bras permet de contrôler une bande angulaire de 9° alors qu'un outil à 72 bras permet de contrôler une bande angulaire de 5°. Le nombre maximum de bras sera toutefois contraint par le diamètre du tubage analysé.

Les outils mécaniques présentent des inconvénients qu'il est important de connaître :

- dans les sections soumises au phénomène de dépôt, ces outils ne peuvent mesurer la corrosion interne du tubage sous dépôt induré. Le curage des parois du forage est alors nécessaire avant de pouvoir mesurer l'éventuelle perte de matière du tubage ;
- un percement localisé du tubage d'ordre centimétrique peut ne pas être détecté par ce type d'outil, les bras palpeurs pouvant passer à côté du percement. Dans ce cas, les outils ultrasoniques ou électromagnétiques donnant une image plus complète de l'état du tubage et/ou des méthodes de traçage (permettant de localiser et de déterminer le débit de fuite) sont nécessaires ;
- ils ne donnent aucune information sur l'état du tubage à l'extrados. L'épaisseur (EP) d'acier est évaluée en se basant sur le diamètre extérieur nominal (OD) et la mesure du diamètre interne (ID) selon la relation : $EP = (OD - ID_{\text{mesuré}})/2$. Or le diamètre extérieur peut être sujet à d'importantes variations du fait du tubage lui-même (tolérance de fabrication allant de +1% à -0,5%) et d'une éventuelle corrosion externe. La valeur de l'épaisseur résiduelle d'acier fournie par ce type d'outil présentera donc une relative imprécision ;
- pour effectuer les mesures, l'extrémité des bras palpeurs exerce une pression importante sur la paroi. Dans le cas d'un tubage encrassé, le diamètre mesuré correspond à la pénétration des palpeurs dans les dépôts. S'il s'agit d'un gel peu consistant, le diamètre est proche de celui de l'acier mais il ne correspond pas au diamètre hydraulique réel. Par contre si l'encrassement est fortement induré, le diamètre mesuré est inférieur à celui de l'acier résiduel ;
- comme tous les diamètres, l'outil est sensible à l'efficacité de son centrage. Il est également sujet à des effets de "rebonds" dans le cas de brutales variations de diamètres (colonne mixte, raccords de tubage, passage de DV). Enfin, dans certains puits fortement déviés, les palpeurs peuvent "traîner" des débris sur la génératrice inférieure de la colonne, ce qui peut perturber le résultat des mesures.



Figure 1. Exemple de diamètreur mécanique à 40 bras

Afin d'évaluer au mieux l'évolution de l'état d'un tubage au cours de son exploitation, un état initial est déterminé à la fin des travaux de forage (état " zéro "). Les résultats obtenus sur le tubage neuf serviront de référence pour les diagraphies réalisées par la suite.

1.2. Les outils ultrasoniques (ou acoustiques)

Les outils de contrôle ultrasonique des tubages sont dérivés des outils de contrôle des cimentations. L'intérêt principal de ce type d'outils par rapport aux outils mécaniques est de fournir une mesure de l'épaisseur résiduelle d'acier du tubage (diamètre intérieur et diamètre extérieur) sans être trop fortement influencée par les dépôts. L'URS (Ultrasonic Radial Scanner) ou l'USIT-CM (Ultrasonique Imager Tool - Corrosion Mode) par exemple fournissent à la fois les diamètres intérieur et extérieur du tubage en acier. L'évaluation de l'épaisseur résiduelle d'acier est donc beaucoup plus proche de la réalité que celle fournie par un outil mécanique. En outre, ils permettent d'obtenir la mesure du diamètre interne sur 360° et donnent par conséquent une image beaucoup plus précise de l'état de la paroi interne du tubage avec la localisation d'éventuel(s) percement(s).

Les outils ultrasoniques ont néanmoins quelques inconvénients :

- un coût plus élevé que celui des outils mécaniques ;
- une précision affectée par le diamètre du tubage, les éventuelles variations de la vitesse des ondes acoustiques dans le fluide de remplissage et la qualité du centrage de l'outil ;
- la rugosité de la paroi du tubage (présence de concrétions) peut altérer la qualité des mesures par un mauvais retour du signal acoustique vers le récepteur..

La bonne utilisation des outils ultrasoniques implique donc d'être spécialement attentif à disposer - au moment de la mesure - d'un tubage rempli par un fluide aux caractéristiques acoustiques aussi homogènes que possible, et à s'assurer de l'efficacité du centrage du matériel de mesure.

1.3. Cas particulier des outils ultrasoniques pour matériaux composites

L'opération de rechemisage de 4 puits au Dogger avec des colonnes en fibre de verre cimentées sur leur extradoss (Chevilly-Larue GCHL-1 et GCHL-2, L'Hay-les-Roses GHRL-1 et GHRL-2) a nécessité le développement d'un outil de contrôle spécifique pour vérifier l'intégrité de ces colonnes et la qualité de leurs cimentations. La mise en œuvre de cet outil par Weatherford a fait l'objet d'une présentation à la SPWLA (Society of Petrophysicists and Well Log Analysts) à l'occasion du 57th Annual Logging Symposium de Reykjavik (25-29 juin 2016).

Cet outil - un URS (Ultrasonic Radial Scanner) modifié - a été utilisé pour réaliser le diamétrage à 72 rayons des tubages 7" en fibre de verre. Par rapport à la méthode mécanique, la mesure acoustique des diamètres présente l'avantage de ne pas être une mesure par contact. Le tubage en matériaux composites a ainsi été préservé du frottement agressif des bras palpeurs. Il s'agit donc d'une alternative intéressante pour contrôler l'intégrité des tubages en matériaux composites.

La précision de l'outil s'est avérée très largement satisfaisante. Dans le graphique ci-dessous, l'observation des diamètres intérieurs fournis par l'URS modifié sur quelques tubes en fibre de verre de diamètre externe 7" (d'une longueur de 9,14 m par tube) montre une dérive systématique d'environ 1 mm sur chaque longueur de tube. Le diamètre est plus important au début de chaque tube, puis se réduit régulièrement jusqu'à son extrémité. Cet effet est bien réel et strictement lié au mode de fabrication des tubes : la fibre est en effet enroulée autour d'un mandrin dont la forme a été choisie très légèrement conique afin d'en faciliter le démoulage à la fin du processus de fabrication.

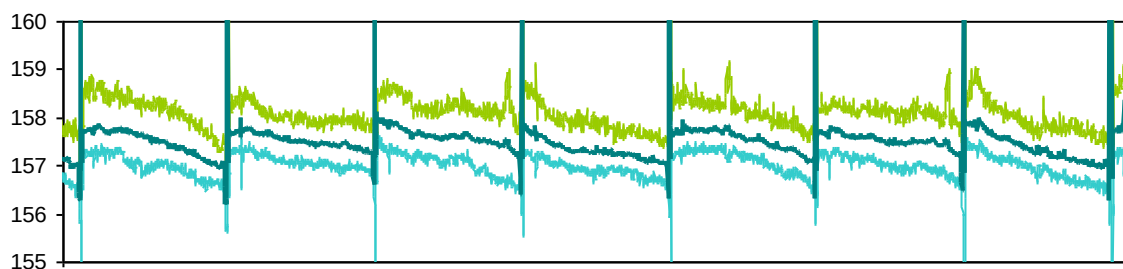
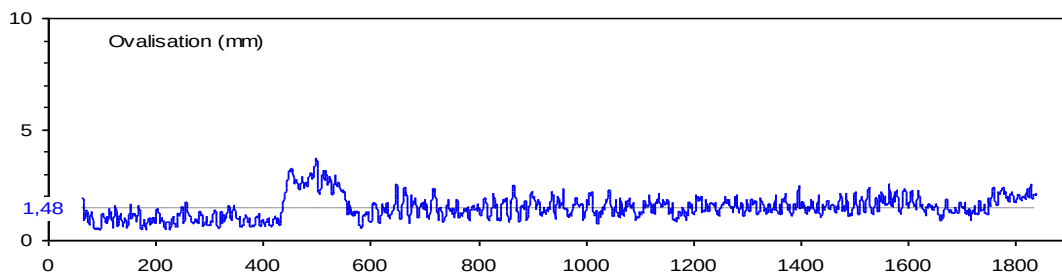


Figure 2 Evolution des diamètres (en mm) sur 7 tubes de diamètre 7'' en fibre de verre (composite)

ID min (bleu clair), ID moy (bleu foncé), ID max(vert)

L'outil a également permis de repérer des zones faiblement endommagées (rayures et usures de frottement) provoquées pendant les travaux par les manœuvres du train de tiges à l'intérieur de la colonne. L'ovalisation plus marquée entre 450 et 600 m (zone de prise d'angle) et vers 1800 m (zone de reforage du matériel de cimentation au sabot du tubage) fait ressortir clairement une très légère perte de matière affectant l'une des génératrices.



1.4. Les outils électromagnétiques

Dans les années 60, l'utilisation de l'induction a été étudiée pour tenter de relier l'épaisseur d'acier à la réponse d'un champ magnétique traversant le tubage. Le principe de ces mesures est l'interaction de champs magnétique avec le matériel ausculté. Lorsqu'un courant conducteur d'électricité (par exemple de l'acier) est soumis à un champ magnétique, des courants induits, ou courants de Foucault sont générés. Ces courants sont directement liés entre autres aux variations d'épaisseur des tubages.

Les sondes de mesure sont constituées d'un ensemble de bobines où circule un courant alternatif. Le champ magnétique généré est perturbé en présence de matériaux conducteurs de l'électricité (tubage en acier), la perturbation étant causée par la création spontanée de courants secondaires (courants de Foucault) à l'origine de champ magnétique secondaire qui s'opposent au champ primaire.

Le champ secondaire dépend directement :

- des caractéristiques du tubage (conductivité électrique, perméabilité magnétique et épaisseur) ;
- des caractéristiques géométriques du dispositif de mesure ;
- des caractéristiques électriques du milieu environnant.

Le champ résultant (primaire plus secondaire) est évalué soit par la mesure de l'impédance de la bobine d'excitation, soit par la mesure de différents paramètres tels que l'amplitude et le déphasage aux bornes d'une seconde bobine.

Deux types de mesure peuvent être réalisés :

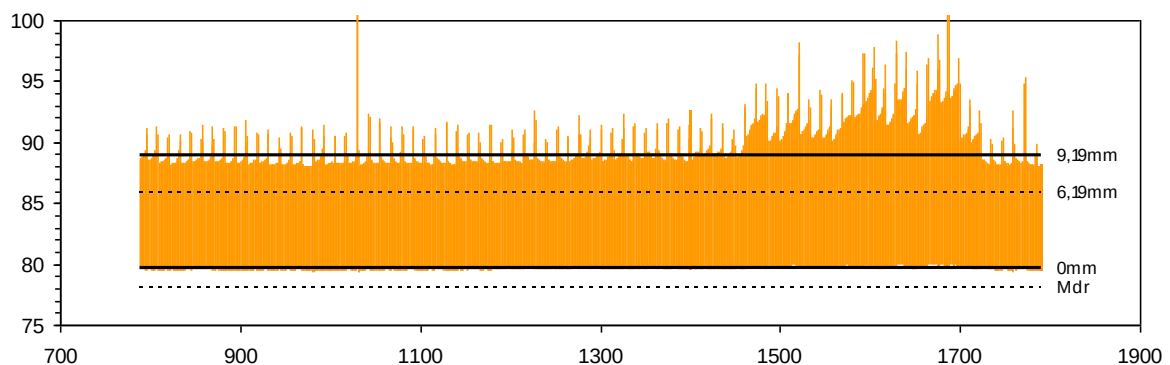
- les mesures relatives qui consistent à enregistrer uniquement les variations de déphasage et à la traduire en pourcentage de métal perdu. Elles s'utilisent soit par comparaison entre deux mesures espacées dans le temps, soit en traçant une ligne de base censée représenter le tubage sain ;
- les mesures absolues qui en utilisant plusieurs fréquences permettent d'accéder aux paramètres d'épaisseur et de diamètre interne, corrigés des défauts d'excentrement et de variations des propriétés électromagnétiques du tubage. L'intérêt de cette mesure est de pouvoir accéder, sans mesure préalable comparé aux mesures relatives, à l'épaisseur résiduelle d'acier.

Le développement des outils de mesures électromagnétiques a débuté dans les années 1960 pour le contrôle des conduites pétrolières (outil de type Electromagnetic Thickness Tool ETT) et s'est poursuivi jusqu'au développement récent de scanner de type EMIT.

La différence principale entre les outils se base dans la notion de cartographie du tubage :

- les outils de type ETT, constitués d'un ensemble de bobines coaxiales placées dans l'axe de la sonde permettent d'accéder à une valeur moyenne d'épaisseur résiduelle sur la circonférence du tubage. Les outils de type ETT sont considérés comme des outils de diagnostic macro-corrosion capables de détecter des pertes de métal sur de larges plages avec une résolution verticale très faible ;
- les outils de type scanner électromagnétique EMIT, à émission coaxiale mais à récepteurs décentrés (placés sur des centreurs en contact avec la paroi du tubage) permettent d'établir l'image électromagnétique de la paroi du tubage. Cet outil fournit, outre l'épaisseur magnétique moyenne, une cartographie radiale de la variation d'épaisseur par rapport à l'épaisseur moyenne et une carte des défauts de la paroi interne.

Dans les années 1980, plusieurs mesures d'ETT ont été notamment réalisées sur des puits de géothermie, sans réel succès, la méthode fournissant une valeur d'épaisseur moyenne sur la circonférence du tubage ne permettant pas de distinguer des anomalies de faibles extensions latérales (perçement). L'ETT a été récemment utilisé sur le forage GTH-2 à Thiais en 2016 par SDP pour inspecter un tubage 7" neuf. La mesure du diamètre intérieur s'est avérée excellente. Par contre la mesure de l'épaisseur a montré des anomalies inexplicables.



Comme on peut le voir sur le graphique, la lecture du rayon intérieur apparaît en effet strictement conforme à la norme attendue sur un tubage 7" neuf (159,19 mm de diamètre mesuré en moyenne pour une valeur nominale de 159,5 mm). Il n'en va pas de même pour la valeur de l'épaisseur enregistrée entre 1450 m et 1700 m. Dans cette zone, l'épaisseur moyenne atteint 12,70 mm pour une valeur nominale de 9,19 mm, avec des épaisseurs maximales pouvant s'élever à 15 mm.

Sauf dysfonctionnement ponctuel de l'outil ETT, il n'a été trouvé aucune raison permettant d'expliquer les résultats anormaux obtenus dans cet intervalle : pas d'environnement métallique à proximité immédiate du puits, pas de formations encaissantes comportant des minéraux ferromagnétiques, pas de variation dans la métallurgie des tubages.

Les premiers tests de scanner électromagnétique EMIT ont été entrepris sur des puits de géothermie du bassin parisien en 2014. Les mesures ont permis de mettre en évidence une adéquation des résultats du scanner électromagnétique avec les attentes espérées par la méthode, à savoir :

- l'**absence d'influence des dépôts de sulfures**, invisibles électromagnétiquement, sur la caractérisation de l'épaisseur magnétique du tubage ;
- la possibilité de **déterminer les variations radiales d'épaisseur du tubage** dans le cadre dans le cas d'un équipement composé d'un simple tubage et de différencier la corrosion interne de la corrosion externe ;
- la possibilité d'**estimer l'épaisseur des dépôts** recouvrant le tubage, par comparaison entre les résultats du PMIT et de l'EMIT.

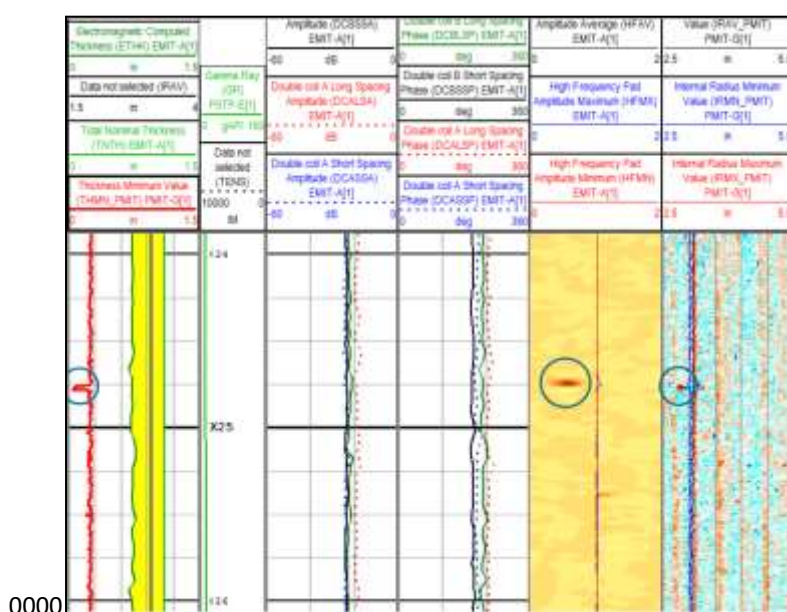


Figure 5 : Exemple de percement de tubage visible sur les cartes d'épaisseur électromagnétique du tubage et non visible sur la courbe d'épaisseur électromagnétique moyenne (en vert sur la première partie du graphe)

2. ANALYSE QUANTIFIEE DES DIAMETREURS

Les données numériques utilisées pour réaliser les analyses présentées ci-dessous proviennent de diagraphies de contrôle effectuées au moyen de diamètres mécaniques à 40, 60 ou 72 bras palpeurs. Chacun des bras fournit une valeur de rayon avec un pas de mesure pouvant atteindre 0,01 m (soit 100 mesures par m). En conséquence, une diagraphie de 2 000 m effectuée au pas de 0,01 m avec un outil à 60 bras représente 200 000 mesures et 12 millions de données à analyser. Pour chacune des mesures, on récupère sur l'ensemble des bras :

- le diamètre interne minimal observé : IDmin ;
- le diamètre interne moyen observé : IDmoy ;
- le diamètre interne maximal observé : IDmax.

Pour réduire le nombre de mesures et faciliter l'analyse numérique, ces données peuvent faire l'objet d'un échantillonnage homogène avec, par exemple, une résolution de 1 m. Deux méthodes peuvent être utilisées :

- l'extraction se fait en récupérant les moyennes des valeurs de IDmin, de IDmoy et de IDmax dans l'intervalle de résolution choisi. Avec cette méthode, les moyennes calculées avant et après extraction restent strictement identiques. Les éventuels indices de perforations sont par contre recherchés à partir des valeurs maximales extraites de IDmax ;
- lorsque l'on souhaite conserver les valeurs extrêmes, l'extraction peut se faire en récupérant - au lieu des valeurs moyennes - la valeur minimale de IDmin et la valeur maximale de IDmax. Dans ce cas, les niveaux moyens d'endommagement calculés sur IDmin et IDmax seront plus élevés que ceux obtenus par la méthode précédente. L'analyste devra en tenir compte dans son interprétation.

Suivant l'état général de l'ouvrage, l'analyste adaptera l'intervalle de résolution et la méthode employée en distinguant les sections du forage plus ou moins dégradées.

2.1. Evaluation de l'épaisseur résiduelle d'acier du tubage par diamètres mécaniques

Avec les outils mécaniques, l'épaisseur résiduelle d'acier du tubage n'est pas directement mesurée mais évaluée à partir des valeurs du diamètre intérieur mesuré qui sont comparées à la valeur du diamètre extérieur nominal théorique. De ce fait, une éventuelle perte de matière à l'extrados du tubage n'est pas détectée. L'épaisseur résiduelle d'acier calculée à partir des valeurs de diamètres correspond à :

$$EP \text{ (mm)} = (OD \text{ nominal} - ID \text{ mesuré}) / 2$$

Au cours de l'analyse, les diamètres suivants sont utilisés comme repère :

- le diamètre intérieur ID du tubage (dépendant de l'épaisseur nominale) ;
- le diamètre correspondant à une perte de matière de 12,5% (variation d'épaisseur minimale autorisée par la norme API) ;
- le diamètre correspondant à une perte de matière de 50% (endommagement important) ;
- le diamètre correspondant à une épaisseur résiduelle de 3 mm (endommagement critique) ;
- le diamètre extérieur nominal OD du tubage (correspondant à l'épaisseur nulle ou seuil de perforation).

Tableau 1. Exemple de tableau d'analyse (tubage neuf)

Tubage 9"5/8 47 lbs/ft	IDmin	IDmoy	IDmax
ID (220,5 mm)	220,99 mm	221,65 mm	222,29 mm
Epaisseur (11,99 mm)	11,74 mm	11,41 mm	11,09 mm
Gain de matière	-	-	-
Répartition incrustation	9%	-	-
Perte de matière	0,25 mm	0,58 mm	0,9 mm
Répartition ep < 12,5%	0%	0%	1%
Répartition ep < 50%	-	-	0%
Répartition ep < 3 mm	-	-	0%
Nombre de perforation	-	-	0
Endommagement	Corrosion 2%	Corrosion 5%	Corrosion 7%

Le tableau fournit pour chacune des trois données (IDmin, IDmoy et IDmax) issues des logs :

- les moyennes des diamètres intérieurs et des épaisseurs ;
- les gains moyens de matière et leur répartition par rapport à la longueur analysée ;
- les pertes moyennes de matière, la répartition des épaisseurs inférieures à 12,5%, à 50% et inférieures à 3mm par rapport à la longueur analysée, ainsi que le nombre d'indices de perforation observés ;
- le taux d'endommagement du tubage (TE). Le calcul du taux d'endommagement est effectué en comparant les épaisseurs résiduelles moyennes observées (EP) à l'épaisseur nominale du tubage.

$$\text{TE}(\%) = (\text{EP nominale} - \text{EP}) / \text{EP nominale}$$

Un taux d'endommagement dépassant 50% sur l'un des diamètres est considéré comme un niveau d'endommagement important nécessitant une vigilance accrue. Sauf cas particuliers ou équipements spécifiques (par exemple une DV), une épaisseur résiduelle d'acier inférieure à 3 mm sera l'indice d'une perte de la résistance mécanique de la colonne (risque d'écrasement ou d'éclatement) et considérée comme un niveau d'endommagement critique nécessitant une intervention.

La recherche des perforations est effectuée à partir des valeurs maximales de IDmax :

- une épaisseur résiduelle d'acier égale ou inférieure à 0 mm détermine la présence d'un percement ou d'un indice de percement. Chaque indice obtenu est vérifié afin de déterminer s'il correspond à une véritable perforation, à une DV ou à un raccord de tubage ;
- la détection d'une épaisseur résiduelle d'acier inférieure à 3 mm sur une longueur consécutive d'au moins 30 m sera interprétée comme une zone à forte suspicion de percement ou comme signalant une perte de résistance mécanique critique.

On notera que la détection d'un indice de perforation n'implique pas nécessairement la présence d'une fuite et que des fuites peuvent ne pas apparaître en tant que percement sur les logs. Il conviendra donc de compléter l'analyse du diamètre multi-bras par des tests d'étanchéité hydraulique de la colonne. Les fuites éventuellement observées pendant ces tests devront être systématiquement colmatées. Le test de pression final certifiant cette étanchéité devra *a minima* correspondre à la pression maximale - augmentée d'un coefficient de sécurité - que pourra subir la colonne par la suite.

D'autre part on retiendra que les mesures peuvent être affectées par les situations suivantes :

- dépôts fortement indurés : les palpeurs mesurent l'épaisseur des dépôts sans nécessairement être en contact avec l'acier. L'épaisseur obtenue par la mesure est alors supérieure à l'épaisseur résiduelle réelle de l'acier ;
- dépôts non indurés, gels ou encrassement biologique : les palpeurs pénètrent plus ou moins profondément dans la matière non indurée. Le diamètre hydraulique réel est inférieur au diamètre mesuré par l'outil ;
- puits fortement dévié : la présence de résidus sédimentés sur la génératrice basse du tubage peut affecter les valeurs minimales obtenues ;
- passage de joints : un effet de rebond (ouverture-fermeture brutale des bras) est souvent observé au passage des raccords de tubage à connections non jointives (de type API ou Buttress par exemple) ;
- corrosion externe : comme déjà indiqué, une éventuelle perte de matière sur l'extrados du tubage ne peut pas être détectée par ce type d'outil. En conséquence, à partir d'un constat d'endommagement important (>50%), il apparaîtra judicieux de prévoir des investigations complémentaires de type électromagnétique (EMIT) ou ultrasonique (USIT-CM) permettant un diagnostic externe de la colonne.

Sur les tubages neufs, l'analyse des diamètres permet d'assurer que les spécifications des tubes ont bien été respectées et qu'ils ne présentent pas d'anomalies géométriques ou de disparités d'épaisseur trop importantes. Le diamètreur fournit également un état initial du tubage servant de référence aux contrôles qui seront effectués pendant l'exploitation de l'ouvrage. Selon les spécifications de l'API, la tolérance d'épaisseur d'un tubage neuf ne doit pas dépasser -12,5% de sa valeur nominale.

On peut définir les **niveaux d'endommagement** suivants :

- TE 0%-12,5% : tubage neuf ;
- TE 12,5%-50% : tubage usagé plus ou moins dégradé ;
- TE > 50% : tubage gravement endommagé ;
- épaisseur < 3 mm : endommagement critique.

2.2. Evaluation de l'ovalisation du tubage

L'ovalisation, telle que définie par l'API (out-of-roundness), correspond à la différence entre le diamètre maximum (IDmax) et le diamètre minimum (IDmin) du tubage.

$$\text{OVAL (en \%)} = (\text{IDmax-IDmin})/\text{OD}$$

Sur un tubage neuf, la tolérance d'ovalisation (API-5CT) ne doit pas dépasser 1% du diamètre nominal extérieur du corps du tube. Plus l'ovalisation sera marquée, plus l'endommagement du tubage sera important. Il est possible de définir les **niveaux d'ovalisation** suivants :

- 0%-1% : tubage neuf ;
- 1%-5% : tubage faiblement endommagé ;
- 5%-10% : tubage dégradé ;
- > 10% : état géométrique critique.

Sur des tubages neufs, l'analyse de l'ovalisation permet de mettre en évidence la présence de tubes ayant subi des déformations lors du stockage ou des chocs lors des manutentions. Elle permet également de détecter des zones d'usures longitudinales provoquées pendant les travaux par le frottement de la garniture de forage au cours des manœuvres dans les puits déviés.

Sur des tubages anciens, l'ovalisation permet de détecter ou de mettre en évidence les zones les plus fortement endommagées (corrosion, dépôt), les irrégularités de cet endommagement ou des variations dans l'efficacité du curage.

L'état de la surface interne du tubage peut être évalué en comparant la moyenne des écarts absolus des valeurs d'ovalisation à leur moyenne arithmétique. Sur un tubage neuf, cette valeur est inférieure à 0,2 mm.

2.3. Cas des outils ultrasoniques et électromagnétiques

Les outils ultrasoniques et électromagnétiques fournissent généralement directement les valeurs du diamètre intérieur (ID) et de l'épaisseur d'acier résiduel (EP). Il suffira donc de déterminer les valeurs de OD à partir des deux valeurs précédentes :

$$\text{OD} = \text{ID} + (2 * \text{EP})$$

Mis à part ce préalable, le reste de la procédure d'analyse est similaire à celle permettant de quantifier le résultat des diamètres mécaniques.

2.4. Synthèse des résultats

L'analyse des données telle que définie ci-dessus permet de proposer :

- un graphique synthétique représentant les mesures de IDmin, IDmoy, et IDmax - présentées en rayons et en épaisseurs résiduelles d'acier - ainsi que les éventuels indices de perforation détectés à partir des valeurs maximales de IDmax ;
- un tableau récapitulant les caractéristiques du tubage et les principales informations concernant son endommagement ;
- un graphique représentant l'évolution de l'ovalisation ;
- éventuellement, des coupes transversales de la colonne : niveaux choisis pour leur représentativité ou correspondant à des sections marquées par des indices de percement.

D'autre part le fait de pouvoir quantifier l'état d'endommagement du tubage (pertes de matière, ovalisation) permet :

- de réaliser des comparaisons entre puits, par exemple entre les colonnes de production et d'injection d'un doublet et d'évaluer l'efficacité du traitement éventuel par l'injection d'inhibiteurs de corrosion ;
- d'évaluer précisément l'évolution de l'état d'un puits pendant son exploitation à partir des contrôles périodiques réglementaires, afin d'anticiper les travaux éventuels de réhabilitation ou de fermeture définitive de l'ouvrage.

3. EXEMPLES D'ANALYSE DE L'ETAT DE TUBAGES NEUF ET USAGE A PARTIR DES DIAGRAPHIES REALISEES PAR DES DIAMETREURS MECANIQUES

Deux exemples d'analyse quantifiée sont proposés ci-après : une analyse de corrosion réalisée sur un tubage 9"5/8 neuf (état " zéro ") et sur un tubage 7" usagé.

3.1. Evaluation de l'état initial (état " zéro ") d'un tubage 9"5/8 neuf

La diagraphie de référence réalisée en fin de travaux sur le tubage 9"5/8 du forage GTRE-4 est présentée ci-après. Elle a été réalisée au moyen d'un diamètreur mécanique MSC à 60 bras avec un pas de mesure de 0,025 m. L'extraction est réalisée avec un pas de 1 m conservant les valeurs moyennes de IDmin, IDmoy et IDmax.

Les données recueillies sont caractéristiques d'un tubage neuf. Le pic observé à 2028 m correspond à du matériel de cimentation (anneau). Avec une moyenne de 5%, le taux d'endommagement (TE) est nettement inférieur au taux admis sur un tubage neuf (12,5% maximum).

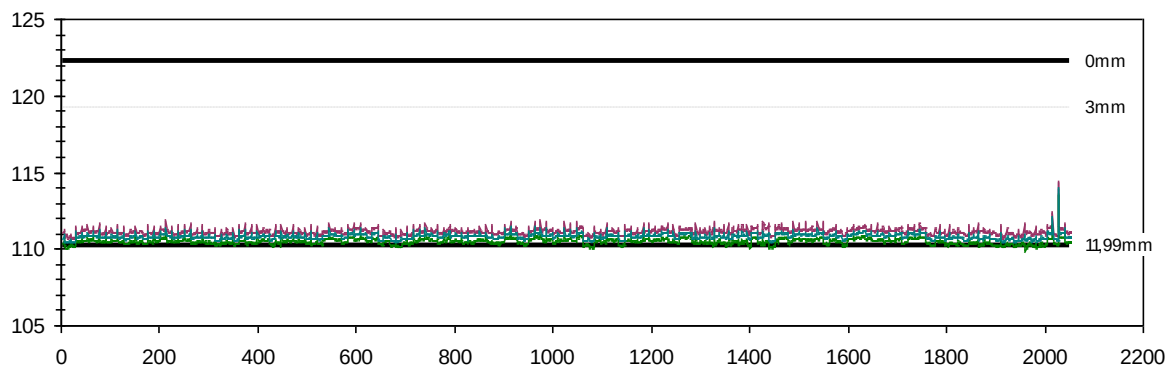


Figure 6. Rayons mesurés et épaisseurs résiduelles
 Max (violet), Moy (bleu-vert), Min (vert)
 Traits noirs : rayon nominal interne et externe du tubage
 Pointillés : épaisseur 3 mm

Tableau 2. Résultats de l'analyse du tubage 9"5/8

Tubage 9"5/8 47 lbs/ft	IDmin	IDmoy	IDmax
ID (220,5 mm)	220,99 mm	221,65 mm	222,29 mm
Epaisseur (11,99 mm)	11,74 mm	11,41 mm	11,09 mm
Gain de matière	-	-	-
Répartition incrustation	9%	-	-
Perte de matière	0,25 mm	0,58 mm	0,9 mm
Répartition ep < 12,5%	0%	0%	1%
Répartition ep < 50%	-	-	0%
Répartition ep < 3 mm	-	-	0%
Nombre de perforation	-	-	0
Endommagement	Corrosion 2%	Corrosion 5%	Corrosion 7%

L'ovalisation moyenne (1,30 mm) correspond également à celle que l'on peut attendre sur un tubage neuf. Elle est inférieure au seuil de référence de 1% (soit 2,44 mm). Une ovalisation légèrement plus marquée est visible à partir de 1300 m. Le puits étant dévié à 45°, il peut s'agir soit d'une usure liée aux frottements du train de tiges sur la génératrice basse de la colonne, soit d'une légère excentration de l'outil de mesure.

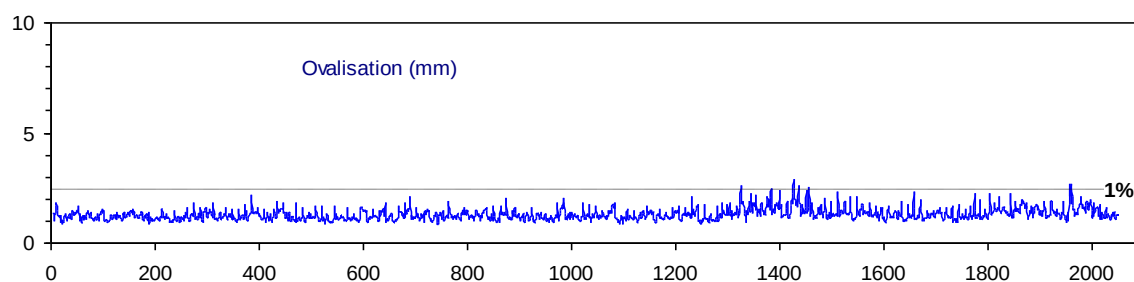


Figure 7. Mesure de l'ovalisation du tubage 9"5/8

3.2. Evaluation de l'état d'un tubage 7" usagé

La diagraphie de contrôle MFT (diamètre à 40 bras) du tubage 7" du forage GLCS-2 a été réalisée par la société SDP le 1^{er} août 2016 entre 3 m et 1780 m avec un pas de 0,01 m. Le log synthétique et le tableau de l'analyse quantifiée sont présentés ci-après.

Pour mieux visualiser l'endommagement, l'extraction est réalisée avec un pas de 1 m en conservant les valeurs extrêmes de IDmin et de IDmax.

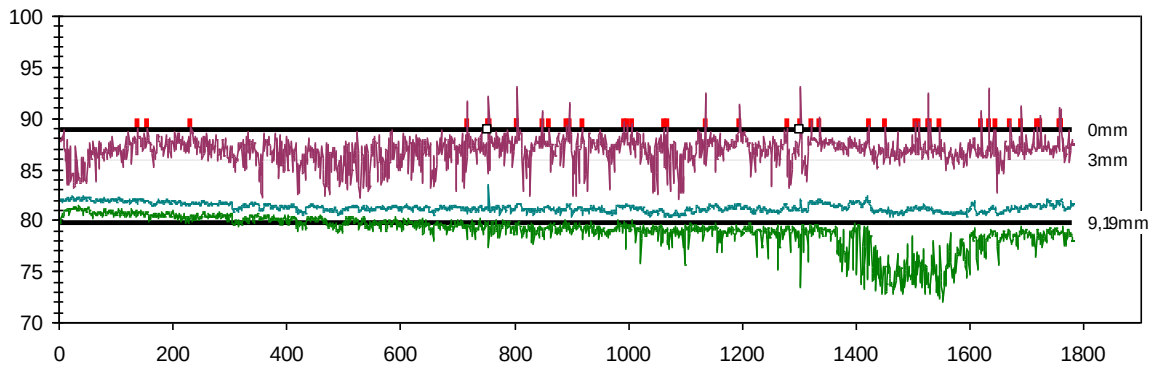


Figure 8. Rayons mesurés et épaisseurs résiduelles
IDmin (vert), IDmoy (bleu-vert), IDmax (violet), Perforation (rouge)
Traits noirs : rayon nominal interne et externe du tubage
Pointillés : épaisseur 3 mm

Tableau 3. Résultats de l'analyse du tubage 7"

Tubage 7" 26 lbs/ft	IDmin	IDmoy	IDmax
ID (159,42 mm)	157,93 mm	162,57 mm	173,69 mm
Epaisseur (9,19 mm)	9,93 mm	7,61 mm	2,05 mm
Gain de matière	0,74 mm	-	-
Répartition incrustation	67%	-	-
Perte de matière	-	1,58 mm	7,14 mm
Répartition ep < 12,5%	4%	85%	100%
Répartition ep < 50%	-	-	94%
Répartition ep < 3 mm	-	-	83%
Nombre de perforation	-	-	41
Endommagement	Incrustation 8%	Corrosion 17%	Corrosion 78%

On peut constater :

- un nettoyage du tubage défectueux - ou plus probablement la présence de dépôts résiduels sédimentés - nettement visible sur la courbe des minima entre 1370 m et 1630 m ;
- une valeur plutôt modérée de la courbe des moyennes (1,59 mm seulement de perte de matière sur IDmoy) par rapport à la courbe des maxima (7,15 mm de perte de matière sur IDmax). Elle indique probablement l'existence d'une incrustation fortement indurée. Les incrustations ont été éliminées par le passage mécanique de l'outil de forage 6" - en particulier sur la génératrice basse du tubage - mais ont mieux résisté au-delà de ce diamètre au nettoyage hydraulique par jetting. On peut donc fortement

suspecter que la perte d'acier soit, dans la réalité, nettement supérieure à la valeur moyenne observée sur le log ;

- un tubage extrêmement endommagé et dégradé avec une corrosion évaluée à 78% sur IDmax et des épaisseurs minimales inférieures à 3 mm sur 83% des mesures. De nombreux indices de perforation ont été détectés (43 au total), principalement localisés entre 717 m et 1790 m - dont les 2 DV, l'une à 754 m et l'autre 1302 m ;
- une ovalisation importante de la colonne : 15,75 mm en moyenne, soit 9%. Par comparaison, elle est de 1% au maximum sur un tubage neuf. Cette ovalisation reflète l'état de dégradation élevé du tubage. Elle est aussi très probablement l'effet d'un nettoyage asymétrique : on peut en effet supposer que la génératrice basse de la colonne a été plus fortement décapée par le passage du train de tiges (effet mécanique) compte tenu de la forte inclinaison du puits ($\approx 60^\circ$) ;
- l'état fortement dégradé du tubage est également indiqué par une valeur très élevée des écarts d'ovalisation (3,20 mm). Par comparaison cet écart est inférieur à 0,2 mm sur un tubage neuf.

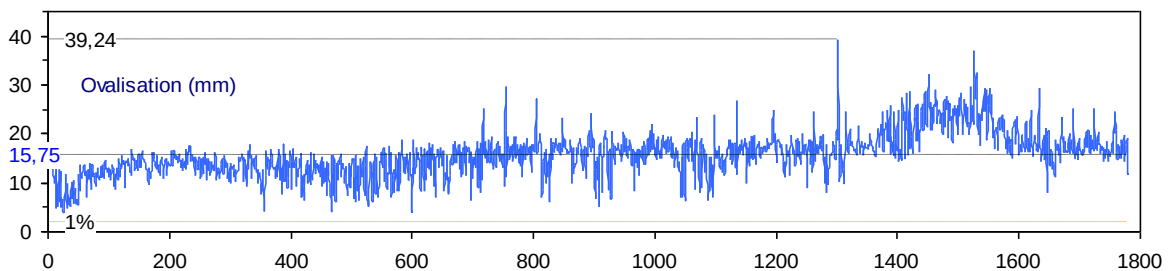


Figure 9. Mesure de l'ovalisation du tubage 7''

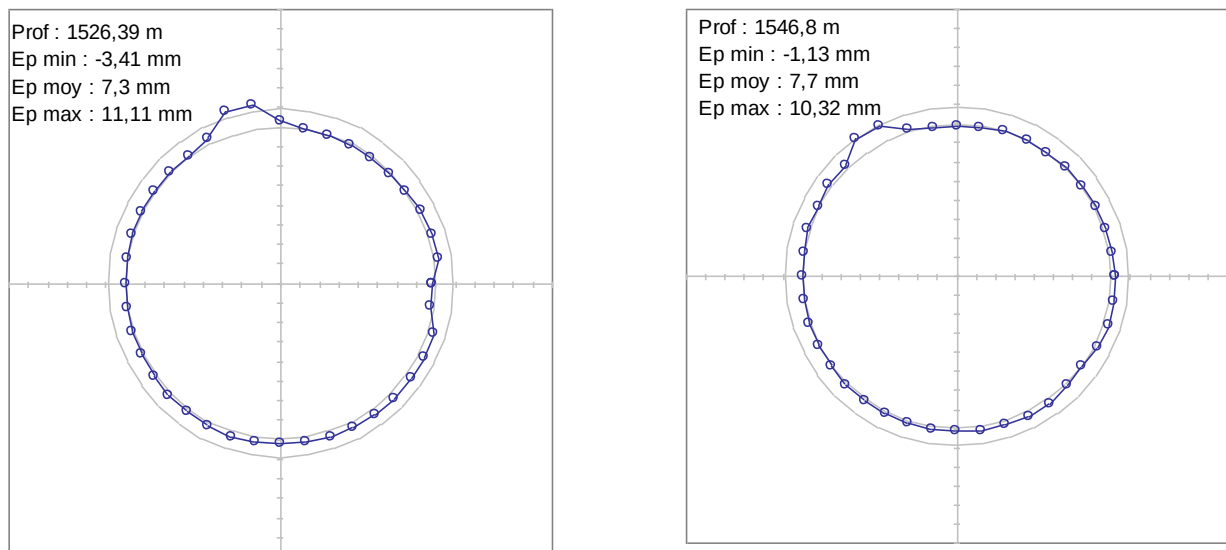


Figure 10. Exemples de perforation observés à 1526 m et 1546 m

Observations : Le taux d'endommagement très élevé (TE = 78% sur IDmax) indique une colonne dans un état critique. La colonne présente d'autre part un risque de fuite potentiellement très élevé compte tenu des nombreux indices de perforation observés (43 indices potentiels). Enfin sa résistance mécanique est fortement fragilisée par une importante perte de matière. On observe en effet que 83% de la longueur du tubage dispose d'une épaisseur résiduelle inférieure à 3 mm.

Avant tous travaux de rechemisage ou d'abandon, il conviendra impérativement de tester l'étanchéité de la colonne et de colmater l'ensemble des fuites observées. Le test de pression final certifiant cette étanchéité devra au moins correspondre à la pression maximale que subira cette colonne dans la suite des travaux.



Avril 2019

FICHE TECHNIQUE 074

DIAGRAPHIES APPLICABLES A LA CARACTERISATION DES RESERVOIRS GEOTHERMIQUES PROFONDS

L'objectif de cette note technique est de décrire les différentes mesures applicables à la caractérisation des réservoirs géothermiques profonds. Cette phase de diagnostic du réservoir, réalisée à l'issue des travaux de forage, est cruciale pour l'exploration, la connaissance et l'exploitation optimale du réservoir.

1. PRESENTATION GENERALE ET OBJECTIFS DES DIAGRAPHIES RESERVOIR

Les diagraphies utilisées dans le cadre de la caractérisation des réservoirs géothermiques profonds (ou « diagraphies réservoir ») sont systématiquement réalisées à l'issue des travaux de forage par des entreprises spécialisées qui interviennent à la demande et sous le contrôle des superviseurs de forage et des ingénieurs en charge de la mise en œuvre et de l'interprétation des essais hydrogéologiques.

Ces entreprises interviennent classiquement dans le domaine du forage profond, pétrolier notamment, et elles sont donc dotées d'équipements adaptés aux conditions de réalisation et manipulés par des opérateurs aguerris. Ces équipements sont constitués d'une unité mobile mise en place à proximité immédiate de la tête de forage, disposant d'un treuil permettant de descendre au câble les outils de diagraphies jusqu'au fond de l'ouvrage et d'une centrale d'acquisition et d'enregistrement des données qui permettent de suivre en temps réel l'évolution des paramètres mesurés.

Les données enregistrées par le prestataire sont transmises sur site immédiatement après la réalisation des diagraphies afin que les ingénieurs géologues et hydrogéologues puissent les interpréter rapidement et des premiers profils, sous format papier, représentant l'évolution des paramètres mesurés en fonction de la profondeur (« logs »), peuvent généralement être produits rapidement sur site avant la démobilisation du prestataire pour faciliter l'interprétation. Le prestataire assurera ensuite l'édition des logs

finaux et fournira *in fine* au Maître d'Ouvrage le nombre d'exemplaires défini contractuellement dans un délai de quelques jours.

L'archivage des données numériques et des *logs* papiers permettra au Maître d'ouvrage de pouvoir revenir sur ces données originelles afin notamment de pouvoir les comparer à de nouvelles données du réservoir, acquises ultérieurement à l'occasion de travaux de réhabilitation et/ou de fermeture définitive du forage.

Dans le cadre des travaux de forage initiaux, la réalisation finale des diagraphies réservoir est généralement intégrée à une prestation globale de diagraphies qui comprend l'ensemble des instrumentations réalisées à la fin des différentes phases de forage (Gamma-Ray, diamètre du trou nu, contrôle de cimentation des tubages). Cette prestation globale peut faire l'objet d'un marché distinct du marché de travaux de l'entreprise de forage, notamment dans le cadre d'un marché de travaux en régie, ou être nécessairement intégrée au marché de travaux principal dans le cadre d'un marché forfaitaire où l'entreprise de forage assume financièrement l'intégralité des risques opérationnels.

Les risques associés à la réalisation des diagraphies sont contrôlés par le prestataire en concertation avec l'entreprise de forage et le Maître d'œuvre afin d'éviter le coincement des outils descendus dans le forage et, dans le pire des cas, leur perte en cas de rupture du câble. Une opération de repêchage (« *fishing* »), induisant une durée de travaux supplémentaires, est alors à mettre en œuvre le plus rapidement possible pour récupérer l'outil et libérer le forage de toute obstruction pouvant dégrader son fonctionnement.

Comme tout outil de mesure physique, les instrumentations doivent être calibrées pour garantir la qualité des données. Le contrôle des calibrations doit être validé par les opérateurs sur site.

Les diagraphies réservoir permettent d'acquérir successivement les informations élémentaires relatives :

- à la **lithologie du réservoir** afin de déterminer la nature de la formation géologique composée de sous-unités plus ou moins poreuses (porosité matricielle et/ou de fracture) et perméables (connexion des vides constituant la porosité du réservoir) au travers desquelles le fluide géothermal circule plus ou moins facilement ;
- aux **caractéristiques intrinsèques du réservoir** vues au niveau du forage (identification des niveaux producteurs : nombre, épaisseurs, contributions au débit total) ;
- aux **caractéristiques du fluide géothermal** : pression du gisement et température, ainsi que conductivité électrique (inverse de la résistivité) du fluide si nécessaire.

Ces informations sont obtenues par l'interprétation des diagraphies combinées décrites ci-dessous, qui devront être adaptées à la lithologie du réservoir et interprétées en tenant compte des observations réalisées en cours du forage du réservoir qui intègrent l'analyse des échantillons (« *cuttings* ») et des paramètres de forage (évolution des vitesses d'avancement à paramètres de forage constants et identifications éventuelles des zones de pertes ou de venues de fluide).

Après le forage du réservoir, les diagraphies sont généralement réalisées en deux phases : avant et après la mise en eau du puits. Les premières (notamment Gamma-Ray et porosité ou électrique en fonction du type de réservoir), faites alors que le puits est toujours en boue, permettent d'obtenir des indications qui peuvent orienter les opérations suivantes de stimulation du réservoir. Les secondes (diagraphies de type PLT) visant à évaluer les caractéristiques hydrogéologiques du réservoir sont nécessairement réalisées lors des essais de production (puits en eau).

Les diagraphies classiquement utilisées dans le cadre des opérations de géothermie profonde sont décrites ci-dessous, en distinguant les outils spécifiques pour les caractérisations purement géologique et hydrogéologique.

2. DIAGRAPHIES UTILISEES POUR LA CARACTERISATION GEOLOGIQUE DES RESERVOIRS GEOTHERMIQUES PROFONDS

2.1 - Diagraphie de radioactivité naturelle (Gamma-Ray ou GR)

La radioactivité naturelle des formations géologiques provient de la désintégration spontanée des atomes de certains isotopes dans d'autres isotopes au sein de ces formations. Cette désintégration s'accompagne de l'émission de particules alpha ou bêta, de rayonnement gamma et de génération de chaleur.

Dans le cadre de la diagraphie de radioactivité naturelle, la mesure s'intéresse à l'émission de rayonnement gamma résultant principalement de la désintégration des atomes d'Uranium, de Thorium et/ou de Potassium. Toutes les roches peuvent être radioactives compte tenu de la présence généralisée de ces éléments. Toutefois, en raison de leur fixation préférentielle sur les sédiments fins, ces types de formation sont plus radioactifs que les sédiments grossiers.

La sonde de diagraphie de radioactivité naturelle (Gamma-Ray) équipée généralement d'un compteur à scintillation, mesure la radiation naturelle (normalisée en unité API - American Petroleum Institute) issue des formations environnantes du forage.

La mesure de radioactivité naturelle se révèle être un outil fiable pour :

- l'évaluation de la lithologie (par exemple différenciation des formations sableuses des intercalations argileuses) ;
- la corrélation entre puits ;
- l'estimation de la fraction argileuse. Par exemple dans le cas où la série sédimentaire contient un véritable banc d'argile et une zone de sable (ou calcaire) propre, le volume d'argile au point X se calcule de la façon suivante :

$$I_{argile} = \frac{GR_x - GR_{0\% argile}}{GR_{100\% argile} - GR_{0\% argile}}$$

En raison du volume d'investigation et des caractéristiques techniques de la mesure, la mesure de radioactivité naturelle est influencée notamment par le diamètre du trou (espace plus ou moins important entre le capteur de mesure et la paroi du forage) et par la présence de tubage (la densité de l'acier atténuant le rayonnement gamma). Il convient, pour toute interprétation, de tenir compte du diamètre du trou, de la densité de la boue et de l'épaisseur des tubages.

La diagraphie de radioactivité naturelle apportant une grande quantité d'informations sur la lithologie du réservoir et par exemple sur la présence de bancs argileux imperméables, elle est une mesure fondamentale pour la caractérisation géologique du réservoir. Elle est systématiquement réalisée dans le cadre de tous travaux de forage pour déterminer avec précision les profondeurs du toit et du mur des formations géologiques traversées. Elle sert de ce fait de référence en termes de profondeur pour les autres types de diagraphies auxquelles la diagraphie GR est très souvent associée.

La figure ci-dessous illustre un *log* GR enregistré au droit de l'aquifère de l'Albien composé d'une alternance de niveaux sableux (figurés de manière conventionnelle en couleur jaune et pointillés) caractérisés par un signal GR faible, et de niveaux argileux (figurés en vert et tirets) caractérisés par un signal GR plus fort.

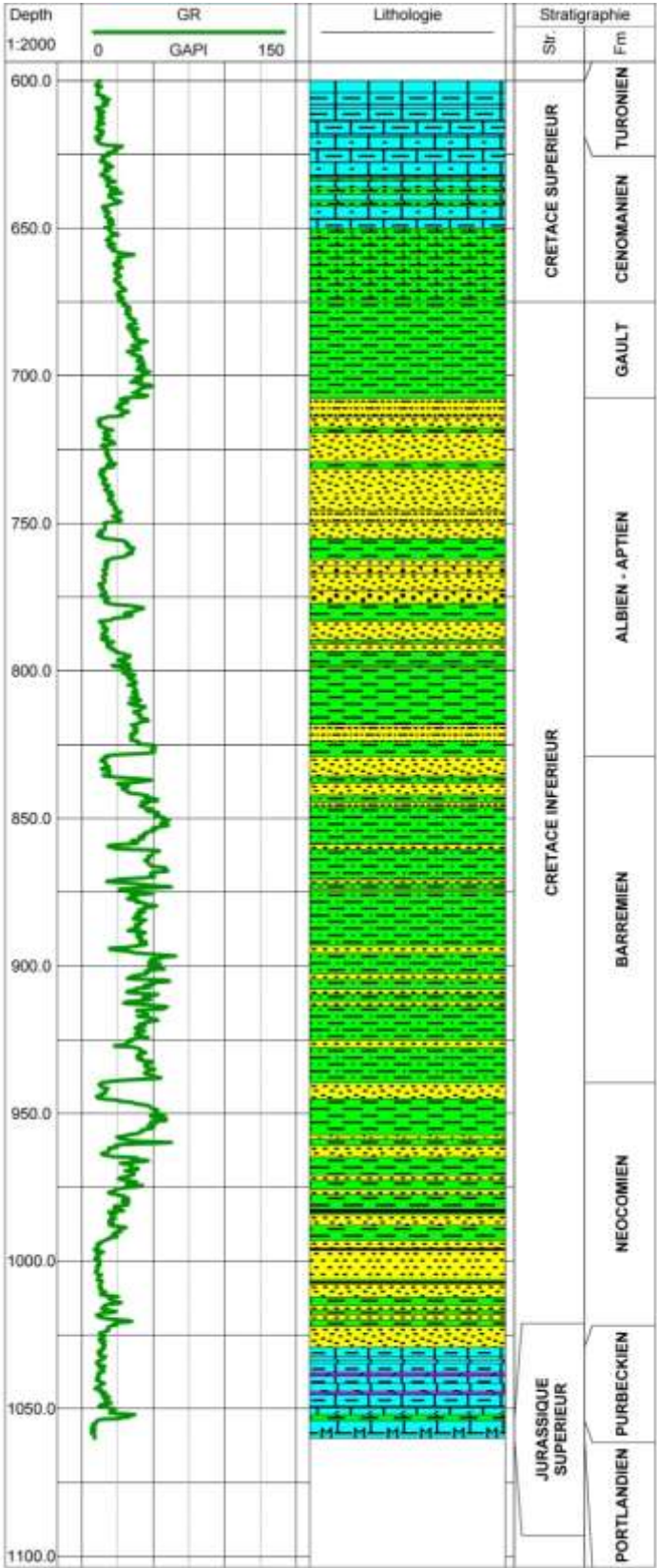


Figure 1 : Exemple de diagraphe de radioactivité naturelle (GR) dans un réservoir sableux (aquifère de l'Albien)

2.2 - Diagraphie de porosité (Neutron-Neutron ou NPHI)

La diagraphie de porosité (ou diagraphie Neutron-Neutron) consiste à bombarder la formation géologique par des neutrons rapides émis par une source radioactive (généralement ^{241}Am). Ces particules, durant leur transit à travers la formation, sont soumises à deux effets successifs :

- Un ralentissement des neutrons lié aux collisions avec les atomes de la formation. Ce ralentissement est d'autant plus important que l'atome rencontré aura une masse proche de celle du neutron. L'atome d'hydrogène (constitué d'un neutron) est le plus efficace.
- Une phase de capture des neutrons. Suite au ralentissement, les neutrons perdent leur énergie (ils sont « thermalisés ») et peuvent ainsi être capturés. Cette capture s'accompagne d'une émission de rayons gammas qui est caractéristique de l'élément capteur.

Dans le cadre de la diagraphie Neutron-Neutron, l'outil mesure les neutrons à différents niveaux d'énergie. Le nombre de neutrons augmentant quand la concentration en hydrogène diminue, la diagraphie Neutron-Neutron fournit une estimation de la concentration en atomes d'hydrogène (index d'hydrogène). **En considérant que l'intégralité du fluide dans le réservoir géothermal est constituée d'eau et que la formation ne contient pas d'atomes d'hydrogène (par exemple en l'absence d'argiles), l'index d'hydrogène représente alors la porosité de la roche.**

Cette mesure est sensible à plusieurs facteurs qui peuvent influencer l'évaluation de la porosité :

- la présence de minéraux contenant des atomes d'hydrogène (argiles, micas ...) ;
- le type de matrice rocheuse, la porosité mesurée doit être corrigée en fonction de la nature lithologique de la formation (calcaire, dolomie ou grès/sable) ;
- la présence d'hydrocarbures ne permet pas de corrélérer directement l'indice d'hydrogène et la porosité de la formation sans la connaissance de la nature de l'hydrocarbure et de sa teneur ;
- la présence de cavité qui ne permet plus un placage efficace de la sonde de mesure contre la paroi du forage.

La figure ci-dessous illustre un *log* de porosité Neutron-Neutron au droit d'un aquifère calcaire (Dogger) couplé à un *log* GR. Cet exemple met notamment en évidence un niveau potentiellement producteur entre 2200 et 2220 mètres de profondeur avec une porosité intéressante de l'ordre de 15 à 20% dans une section présentant un signal GR faible.

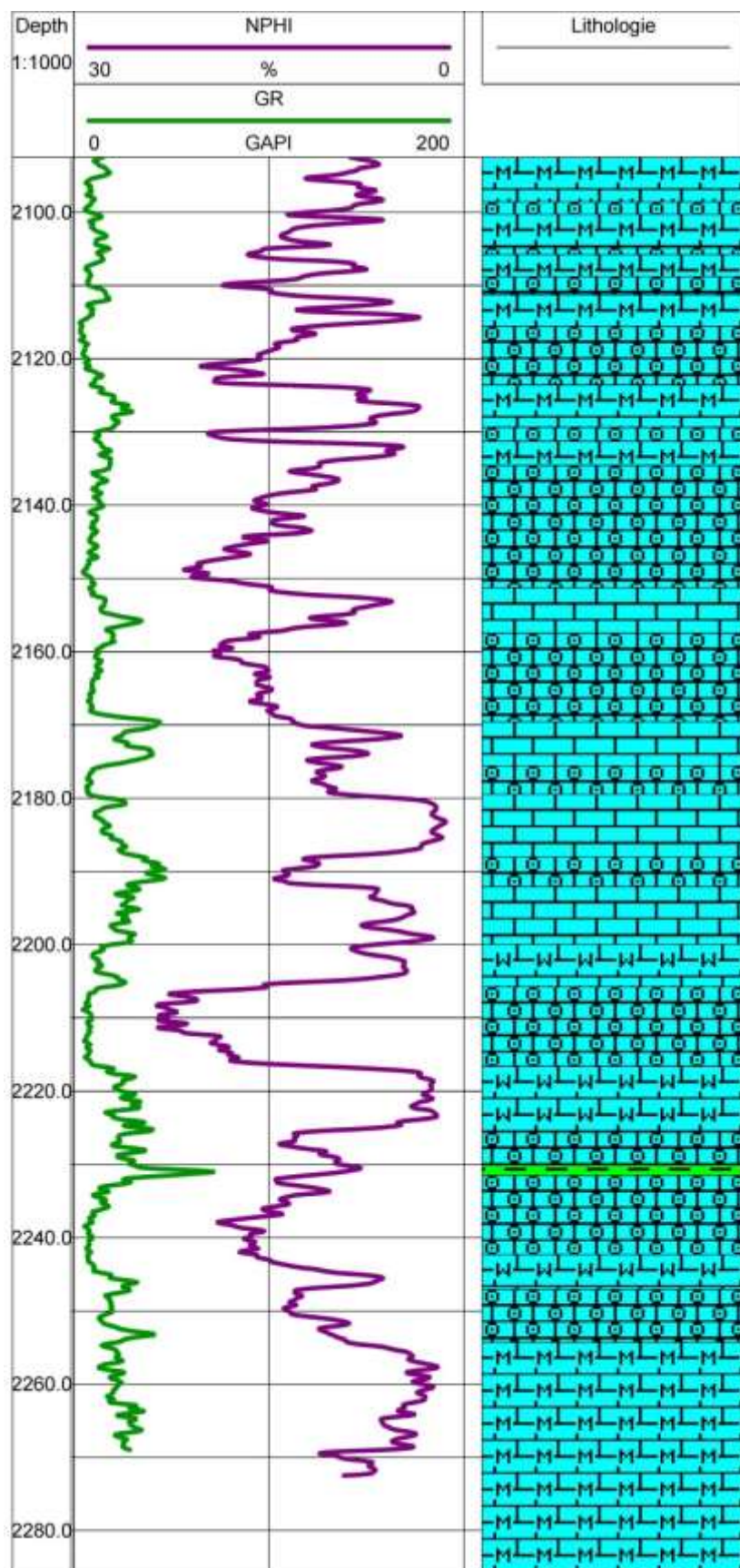


Figure 2 : Exemple de diagraphie de porosité Neutron-Neutron couplée à une diagraphie GR dans un réservoir carbonaté (aquifère du Dogger)

2.3 - Diagraphie de résistivité

La mesure de la résistivité est une mesure fondamentale dans l'industrie pétrolière afin d'évaluer la saturation en hydrocarbure dans la formation.

Dans le domaine de la géothermie, cette mesure couplée avec la mesure du Gamma-Ray permet d'identifier finement les interfaces sur la coupe lithologique. Elle trouve notamment son utilité dans les réservoirs clastiques et les réservoirs fracturés où des contrastes élevés de résistivité sont présents.

Plusieurs techniques de mesures de résistivité sont utilisées, toutes se basant sur une technique commune : un émetteur positionné sur la sonde (une électrode ou une bobine) envoie un signal (courant électrique ou champ électromagnétique) à travers la formation. Un récepteur sur la sonde (électrode ou bobine) mesure la réponse de la formation à une certaine distance de l'émetteur. Une augmentation de l'espacement entre l'émetteur et le récepteur permet une augmentation de la profondeur d'investigation.

Les outils de résistivité peuvent être classés selon trois grandes familles:

- les outils électriques (avec des dispositifs d'électrode normale ou latérale) ;
- les outils de type « induction » (électromagnétique) ;
- les outils de type « focalisé » (ou « latérolog »).

Actuellement, les familles d'outils les plus utilisés sont les outils de type induction et les outils de type latérolog.

Les outils de type induction sont choisis dans le cas où le fluide de forage est peu conducteur (boue à l'huile, air ...) et/ou pour des formations conductrices (argiles, sables, grès...).

Les outils de type latérolog sont mieux adaptés aux formations plus résistives (carbonates, granite...).

La diagraphie électrique peut apporter des informations, dans l'étude des réservoirs géothermaux, sur :

- la lithologie (nature géologique) des formations traversées ;
- l'épaisseur des bancs (des outils de type microlog fournissent une définition précise de fines limites) ;
- les corrélations entre puits ;
- la résistivité de l'eau ;
- la porosité du réservoir.

Dans le cas de formations homogènes saturées uniquement en eau, la porosité peut être estimée à partir de la formule d'Archie donnée ci-dessous :

$$R_t = R_w \cdot a \cdot \varphi^{-m}$$

avec : R_t = résistivité de la roche en Ohm.m

R_w = résistivité de l'eau d'imbibition en ohm.m

ϕ = porosité en %

m = facteur de cimentation variant généralement entre 1,3 et 2,2

a = facteur dépendant de la lithologie et variant entre 0,6 et 2

2.4 - Diagraphie de potentiel spontané (PS)

La diagraphie de potentiel spontané (PS) enregistre des différences de potentiel électrique d'origine naturelle. Ces différences sont mesurées entre une électrode de référence positionnée en surface et une électrode mobile positionnée sur la sonde de mesure.

En présence d'une boue de forage différente chimiquement de l'eau de formation, des potentiels électriques se forment dans le proche puits :

- le potentiel de membrane, associé à une migration des cations aux niveaux des formations argileuses ;
- le potentiel de jonction liquide, associé à une migration des anions à l'interface entre la zone envahie par la boue de forage et la zone vierge dans les niveaux perméables.

La diagraphie de polarisation spontanée permet de :

- différencier les niveaux imperméables des bancs poreux et perméables ;
- calculer la résistivité de l'eau d'imbibition R_w et d'en déduire la salinité de l'eau ;
- calculer le pourcentage d'argile contenu dans les formations réservoir.

La diagraphie de potentiel spontané est particulièrement adaptée aux formations sableuses contenant des intercalations de bancs d'argiles (par exemple aquifère de l'Albien et Néocomien). Elle nécessite la mise en place d'une boue de forage conductrice (salée) pour permettre la formation des contrastes de potentiel entre les sables et les argiles.

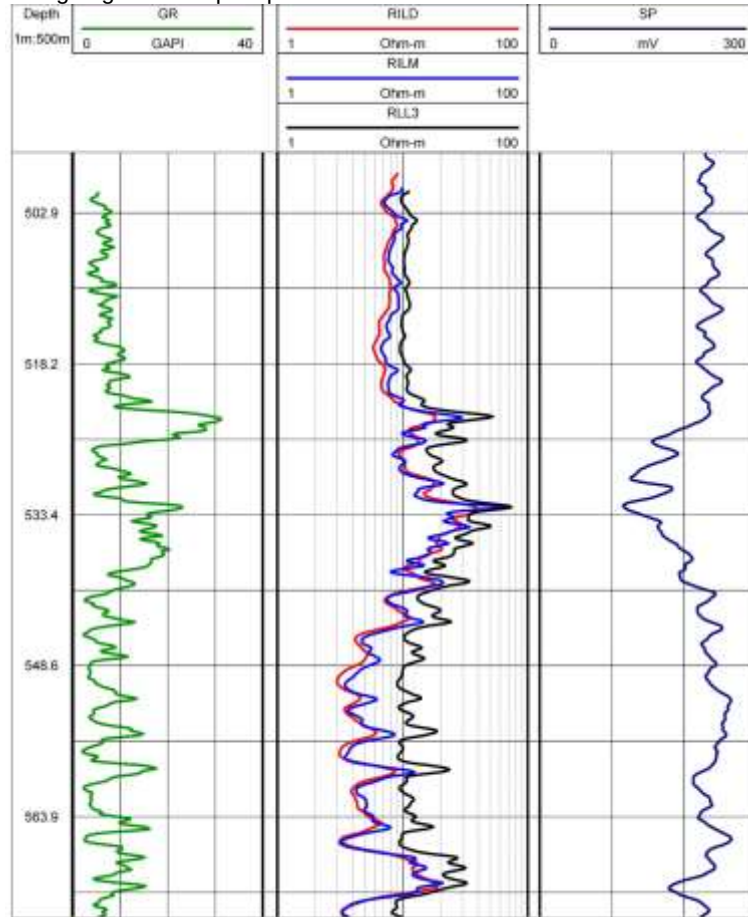


Figure 3 : Exemple de diagraphe de résistivité (Induction) et potentiel spontané.

SP : Potentiel Spontané, RILD : Résistivité longue, RILM : Résistivité Moyenne, RLL3 : Résistivité courte

2.5 Diagraphe de densité (Gamma-Gamma ou RHOB)

La diagraphe de densité (ou diagraphe Gamma-Gamma) consiste à bombarder la formation avec une source radioactive émettrice de rayonnement gamma (^{137}Cs par exemple) et à mesurer (par plusieurs récepteurs de type scintillateur) le rayonnement gamma transitant (effet Compton) par la formation.

La dissipation du rayonnement gamma émis est sensible à la densité électronique de la formation (nombre d'électrons par unité de volume, qui peut être relié à la densité massique). Ainsi, plus le rayonnement gamma aux niveaux des récepteurs est élevé, moins la densité de la formation est importante.

La réponse de l'outil peut être affectée par plusieurs facteurs qui provoquent des anomalies :

- le niveau de l'eau ou la boue de forage ;
- un changement dans la densité du fluide ;
- le mud-cake ;
- le diamètre du forage ;
- la présence de cavité.

Outre l'estimation de la densité qui permet d'établir la lithostratigraphie et les corrélations de faciès, la diagraphe de densité est principalement utilisée dans les réservoirs géothermaux pour

estimer la porosité. Dans le cas où la formation est homogène (matrice simple par exemple calcaire) et où un seul fluide remplit les pores, la porosité peut être estimée par la formule suivante :

$$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f}$$

avec : ρ_{ma} = densité de la matrice rocheuse

ρ_b = densité de la formation mesurée par la sonde

ρ_f = densité du fluide

φ = porosité en %.

La figure ci-dessous illustre la corrélation parfaite entre un *log* de densité (RHOB) et un *log* Neutron-Neutron (NPHI) issus des données de diagraphies réalisées au droit d'une formation calcaire.

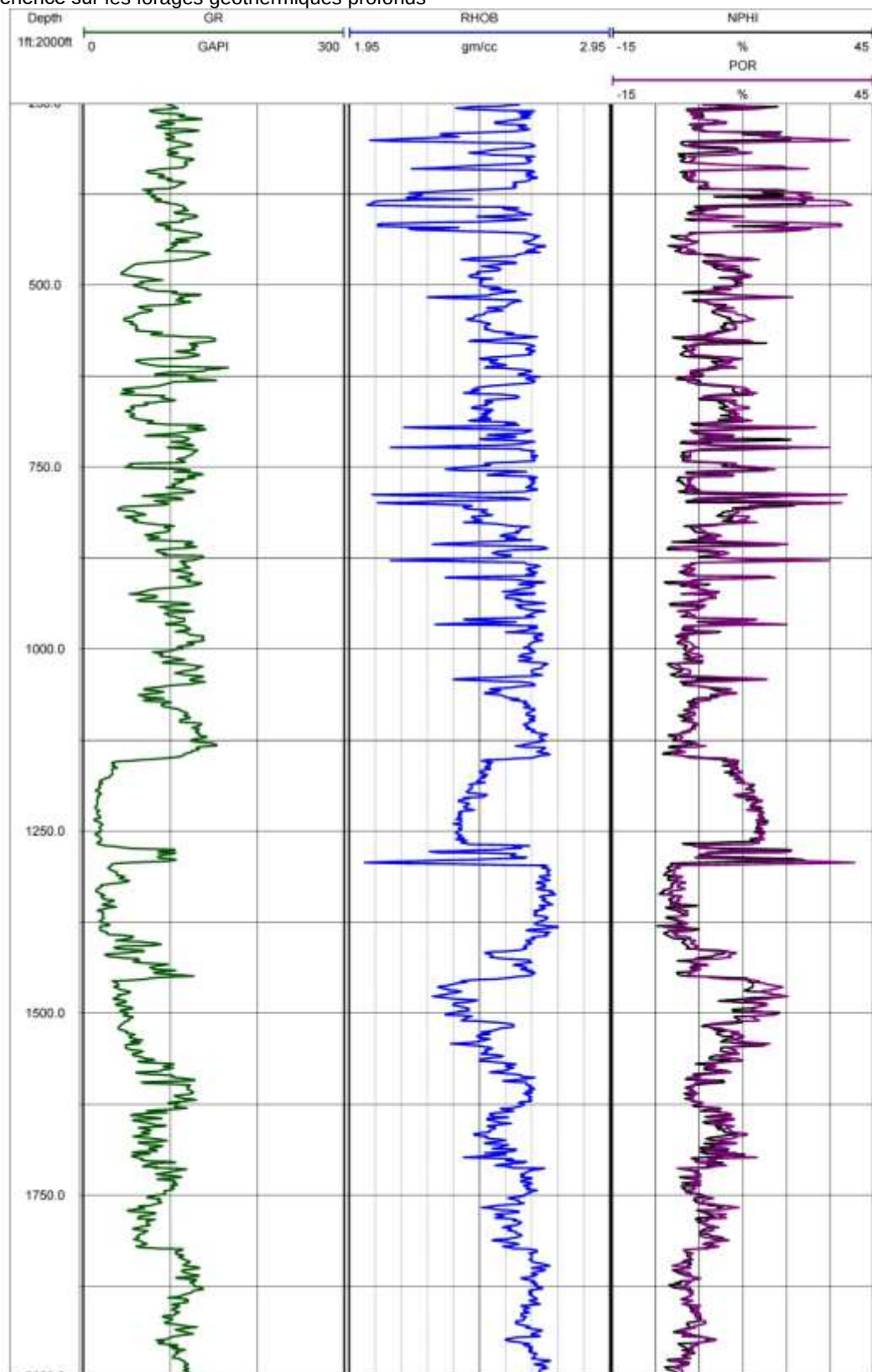


Figure 4 : Exemple de diagraphie de densité et comparaison de la porosité calculée à partir de la densité et de la porosité neutron (formation calcaire)

RHOB : densité; NPHI : Porosité Neutron, POR : porosité calculée à partir de la mesure RHOB

2.6 - Diagraphie sonique

La diagraphie sonique est basée sur l'étude de la propagation d'ondes acoustiques générées par la sonde de mesure à travers les formations géologiques traversées par le forage. Cette propagation dépend des propriétés élastiques des formations. Le paramètre mesuré est la vitesse de propagation des ondes acoustiques, principalement celle des ondes P.

La sonde, équipée généralement de plusieurs émetteurs et récepteurs, mesure le temps de transit Δt (en $\mu\text{s}/\text{pied}$) entre deux récepteurs.

Outre la caractérisation des propriétés mécaniques des roches déduites de la vitesse de propagation des ondes, la diagraphie sonique peut fournir une estimation de la porosité par la formule de Wyllie dans les formations propres et consolidées :

$$\varphi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$$

avec : Δt = temps de transit

Δt_{ma} = temps de transit dans la matrice

Δt_f = temps de transit dans le fluide.

Cette formule peut être corrigée en cas de non compaction des roches, ce qui n'est pas nécessaire pour les formations géologiques des réservoirs géothermaux.

Une seconde formule empirique reliant la porosité et la vitesse a été développée par Raymer-Hunt-Gardner. Elle fournit une meilleure estimation de la porosité sur toute une plage de porosité et elle est applicable aux formations consolidées et à certaines formations non consolidées.

$$\varphi = -\alpha - \left[\alpha^2 + \left(\frac{\Delta t_{ma}}{\Delta t} \right) - 1 \right]^{0.5} \text{ avec } \alpha = \left(\frac{\Delta t_{ma}}{2\Delta t_f} \right) - 1$$

Les effets de trous (cavités) sont négligeables en raison de la présence de plusieurs émetteurs et récepteurs (mesures compensées). La mesure est sensible à la présence de fractures (possible discontinuité du signal) et à la présence d'argiles laminées dans les sables. De plus, dans les milieux à double porosité, la vitesse des ondes acoustiques dépend principalement de la porosité primaire, la porosité issue des mesures soniques est alors sous-estimée.

2.7 - Diagraphie de résonance magnétique nucléaire (Nuclear Magnetic Resonance - NMR)

La diagraphie NMR permet de mesurer le moment magnétique induit des noyaux d'hydrogène contenus dans la porosité des réservoirs.

A la différence des diagraphies Neutron-Neutron qui réagissent à la fois aux propriétés de la matrice des roches et du fluide contenu dans les pores et qui sont dépendantes de la minéralogie, les mesures de diagraphie NMR sont sensibles à la présence des protons des atomes d'hydrogène. Comme ces protons se trouvent principalement dans les fluides des pores, la diagraphie NMR réagit au volume, à la composition, à la viscosité et la distribution des fluides.

- la porosité de la roche ;
- la perméabilité de la porosité primaire ;
- la nature du fluide.

220

2.8 - Diagraphie d'imagerie de paroi

Dans certains réservoirs géothermaux (socle par exemple), la perméabilité est dominée par la perméabilité de fracture. La cartographie de ces fractures est importante pour la compréhension de ce type particulier de réservoir. Plusieurs outils ont été développés dans le but d'étudier les fractures interceptant les forages. Ces outils de mesure fournissent une carte déroulée de la paroi interne du forage.

Plusieurs types d'outils d'imagerie de paroi ont été développés, se basant sur différents principes de mesures. On peut citer :

- les outils acoustiques de type acoustic televiewer où une onde acoustique est émise et le signal réfléchi sur la paroi du forage est analysé ;
- les outils électriques de type Formation MicroScanner (FMS) ou Fullbore MicroImager (FMI) où l'image est obtenue à partir de mesures de micro-résistivité faites par des patins en contact direct avec la paroi.

Les images issues des mesures sont traitées et analysées dans le but de détecter les fractures (apparaissant sous la forme de sinusoïde) visibles sur l'enregistrement. L'orientation apparente des fractures (direction et pendage) est ainsi déterminée par "picking" des sinusoïdes. La détermination des orientations réelles des structures nécessite la prise en compte de la trajectoire du forage.

L'imagerie de paroi permet également de détecter les variations lithologiques et les contacts entre bancs.

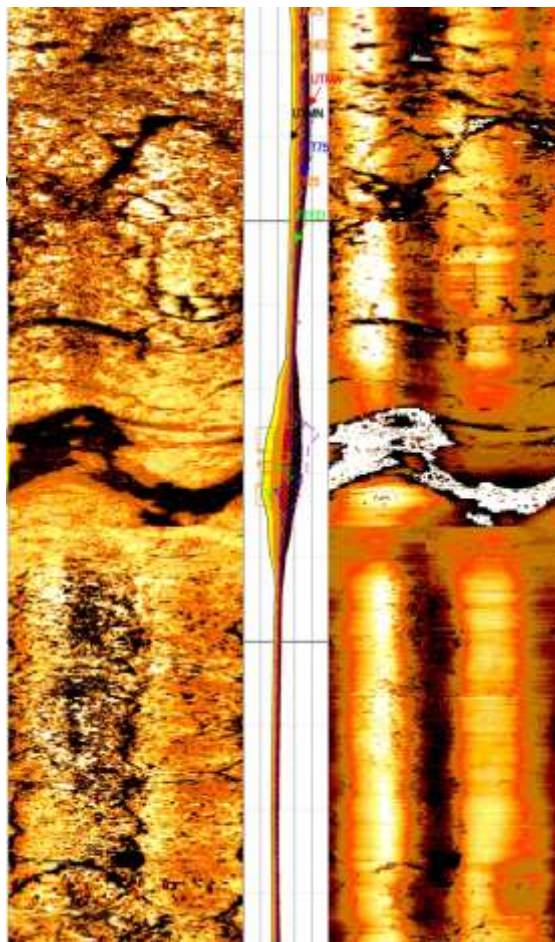


Figure 6 : Exemple d'imagerie de paroi ultrasonique (aquifère de socle).

Image de la partie gauche représente la carte de l'amplitude de l'onde réfléchie. Image de la partie droite représente la carte du temps de transit de l'onde réfléchie

3. DIAGRAPHIES UTILISEES POUR LA CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE DES RESERVOIRS GEOTHERMIQUES PROFONDS : LES DIAGRAPHIES DE PRODUCTION (ou Production Logging Tools - PLT)

Les diagraphies de production sont les mesures les plus importantes dans la caractérisation et le développement des réservoirs géothermaux. L'objectif principal de ces mesures est de déterminer la structure hydrogéologique (localisation des arrivées d'eau) et les températures et pressions du réservoir.

L'outil de mesure (Production Logging Tool) est généralement constitué de 3 capteurs de mesures :

- un capteur de température (le plus fréquent est un capteur de température à résistance de platine) adapté aux températures attendues ;
- un capteur de pression (généralement à quartz) qui doit pouvoir compenser les variations de température ;
- un capteur de vitesse (*flowmètre* ou débitmètre), généralement constitué d'une hélice. Plusieurs types de *flowmètre* existent, en fonction de la taille de l'hélice. Les outils standards, de diamètre autour de 1,5" permettent une utilisation à travers les tiges de forages. La vitesse de rotation de l'hélice est mesurée et reliée à la vitesse relative du fluide lors de sa montée (en production) ou descente (en injection) dans le forage.



Figure 7 : Capteur de vitesse d'un outil PLT

La réalisation des mesures doit être conduite selon un protocole établi en fonction des tests hydrogéologiques entrepris sur l'ouvrage. Généralement, les mesures sont réalisées en plusieurs phases :

- une première phase de mesure, effectuée si possible avec le puits à l'équilibre thermique, est réalisée, **sans sollicitation de l'ouvrage** (production ou injection du fluide géothermal). Ces mesures doivent être pratiquées en descente et en montée afin :
 - o d'établir un profil de pression et température ;
 - o de déterminer si des écoulements ambiants (« *cross-flow* ») sont présents dans le puits. Le forage peut avoir mis en relation des niveaux avec des charges hydrauliques différentes, entraînant un écoulement du niveau à forte pression à celui à faible pression. L'outil « *flowmètre* » mesurant la vitesse relative du fluide par rapport à la vitesse de la sonde, il est nécessaire de réaliser des profils en descente et en montée afin de s'assurer de pouvoir détecter les *cross-flow* ;

- une deuxième phase de mesure est réalisée **en sollicitant l'aquifère par production ou injection du fluide géothermal**. Ces mesures ont pour objectif principal la localisation des différentes arrivées d'eau dans le réservoir. Plusieurs passes réalisées en priorité à contre-courant (en descente si le puits est en production, en montée si le puits est en injection) afin d'augmenter les valeurs de vitesse relative enregistrée et d'éviter que la vitesse relative du fluide soit nulle (lorsque la sonde de mesure se déplace dans le même sens et à une vitesse proche de celle du fluide). Ces enregistrements à différentes vitesses permettent d'identifier des changements de viscosité de fluide et de frottements.

Après soustraction de la vitesse de déplacement de la sonde (vitesse de log), la vitesse du fluide peut être convertie en débit après correction des variations de la section d'écoulement. L'enregistrement d'une diagraphie de diamètre (diamètre 3, 4 ou 6 bras) est requis pour les corrections des variations de section d'écoulement qui influent sur la vitesse.

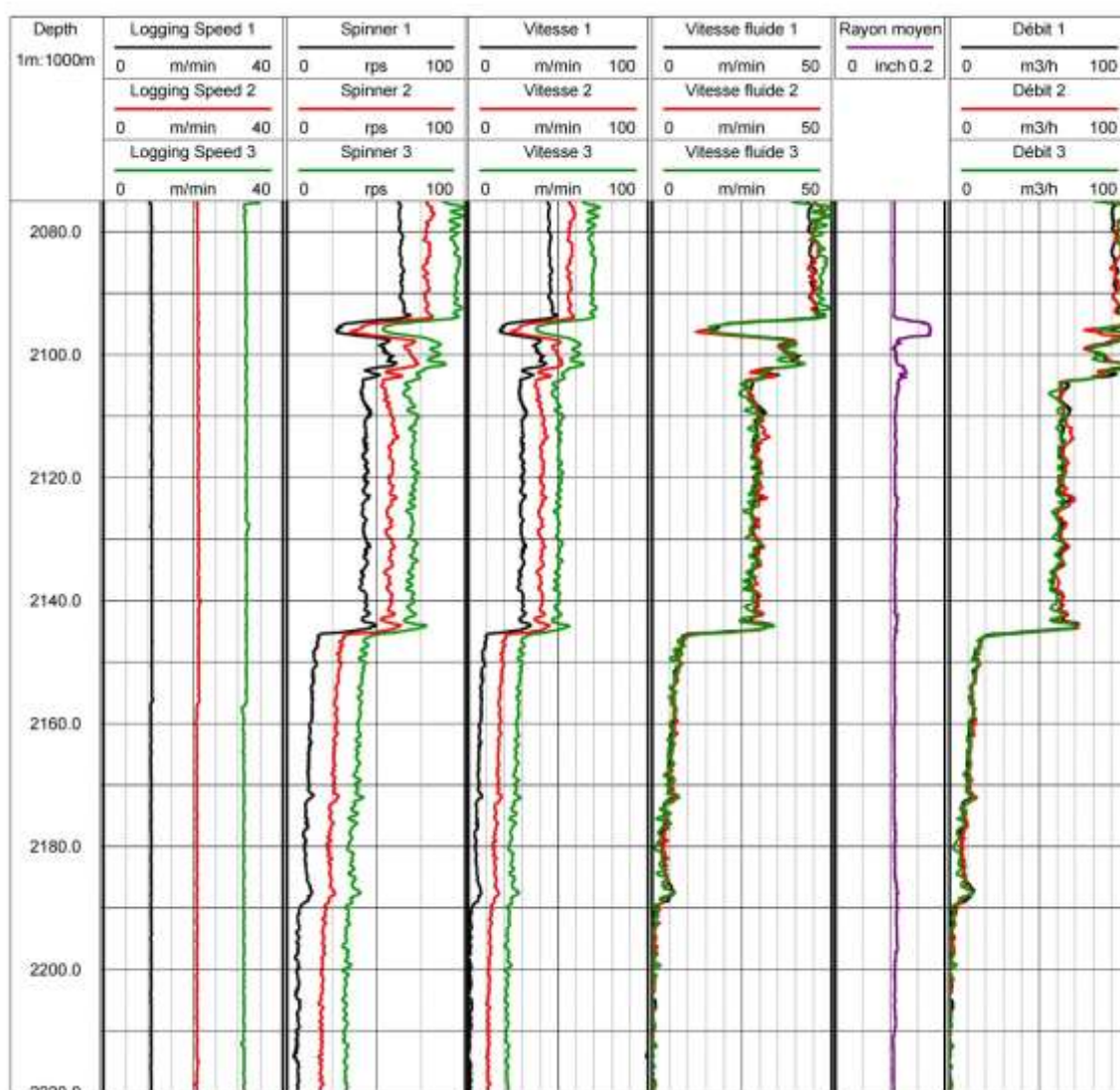


Figure 8 : Exemple de mesure de flowmétrique sous production.

Les logs "**logging speed**" correspondent aux vitesses de descente de la sonde. Les logs "**spinner**" sont l'enregistrement brut de l'hélice du flowmètre. Les mesures sont données en RPS (Rotation Par Seconde) et correspondent à la vitesse relative du fluide par rapport à la sonde. Les logs "**Vitesse**" correspondent à la conversion des RPS en m/min à partir du calibrage de la sonde. Les logs "**Vitesse fluide**" sont obtenus par soustraction du log "logging speed" au log vitesse et correspondent à la vitesse réelle du fluide. Les logs "**débit**" sont obtenus en multipliant le log vitesse par la section du puits (estimé à partir du log "**rayon**").

4. SYNTHÈSE DES DIFFÉRENTS OUTILS ET INFORMATIONS OBTENUES

Le tableau ci-dessous présente de manière synthétique le principe de mesure, les informations obtenues, ainsi que les inconvénients, les risques et les avantages de pour chacun des types de diagraphies décrits précédemment.

Type de diagrapie	Principe de mesure	Type d'informations obtenues	Inconvénients et/ou risques	Avantages
Radioactivité Naturelle (Gamma-ray)	- Mesure des rayons gamma émis naturellement	- Caractérisation lithologique	- Pas de caractérisation des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère	- Rapidité de la mesure - Corrélation spatiale
Porosité Neutron Compensé (NPHI)	- Emission de particules neutrons par une source radioactive d'Am-Be. - Mesure des neutrons non capturés par la formation (principalement par les atomes d'Hydrogène).	- Détermination de la teneur en hydrogène qui peut être reliée à la porosité totale dans le cas d'un aquifère. - Caractérisation lithologique.	- Utilisation d'une source radioactive - Risque d'abandon de puits en cas de perte de la source radioactive - Sensible aux cavités	- Seule mesure directe de la porosité totale - Rapidité de la mesure (vitesse d'acquisition équivalente aux mesures de gamma-ray et de diamètre)
Résistivité	- Mesure de la réponse de la formation soumise à un courant électrique ou électromagnétique	- Détermination de la lithologie - Estimation de la porosité - Mesure de la résistivité de la formation et du fluide	- Difficulté à estimer la porosité (formule empirique)	- Pas d'utilisation de source radioactive - Mesure rapide
Densité (Gamma-Gamma ou RHOB)	- Emission de rayonnement gamma par une source radioactive. - L'énergie des rayons gamma, par effet compton, est atténuée en fonction de la densité électronique de la formation. - Les rayons gamma qui traversent la formation sont enregistrés et permettent	- Détermination de la densité et de la lithologie - Détermination des propriétés minérales (par effets photo-électriques) - Possibilité d'estimer la porosité dans le cas d'une formation constituée d'une roche monominérale	- Utilisation d'une source radioactive - Risque d'abandon de puits en cas de perte de la source radioactive - Mesure indirecte de la porosité basée sur l'hypothèse d'une roche monominérale et d'un seul fluide	- Compensation automatique des effets de paroi et du mudcake - Rapidité de la mesure

	d'établir la densité moyenne de la formation		- Sensible au défaut de placage de la sonde contre la paroi	
Sonique	- Caractérisation des vitesses des ondes de compression et de cisaillement par l'émission d'une onde acoustique et l'enregistrement des ondes réfractées	- Estimation de la porosité et de la lithologie - Détection de fracture - Estimation de la perméabilité à partir de l'analyse des ondes de Stoneley	- Faible résolution verticale en mode dipôle - Mesure indirecte de la porosité basée sur l'hypothèse d'une roche monominérale et d'un seul fluide	- Mesure rapide qui peut être couplée aux autres mesures open-hole - Estimation de la perméabilité de fractures
Résonance Magnétique Nucléaire	- Mesure du moment induit des noyaux d'hydrogène contenu dans la roche poreuse	- Estimation de la porosité et de la perméabilité - Estimation de la perméabilité matricielle	- Mesure 5 à 6 fois plus lente que les diagraphies open-hole classiques - Nécessité de cibler les horizons présentant un intérêt	- Seule mesure in-situ de la perméabilité matricielle

Imagerie de paroi	- Image orientée de la paroi du forage (microrésistivité type FMI, acoustique type BHTV)	- Détection et détermination des fractures - Analyse structurale - Détermination de la texture des calcaires - Détection et évaluation de la porosité secondaire	- Fragilité de la sonde de mesure, nécessité de réaliser une descente au préalable d'un outil type diamètreur pour vérifier que le puits est libre - Mesure moins rapide que les mesures classiques open-hole	- Orientation des structures - Identification de la nature des niveaux producteurs (porosité primaire ou secondaire) - Diamètre de puits jusqu'à 21 pouces pour imagerie électrique, 12"7/8 pour imagerie acoustique
Flowmètre, température, pression (PLT)	- Mesure in-situ de la température, de la pression et des vitesses du fluide	- Localisation des arrivées d'eau - Détermination des flux ambiants - Température du fluide - Mesure de pression au niveau du réservoir, caractérisation des propriétés	- Calibration obligatoire du flowmètre pour estimation des vitesses du fluide - Réalisation d'un log de diamètre pour conversion de la vitesse en débit - Sensibilité de la mesure de flowmètre au changement de viscosité du fluide	- Seule mesure permettant de localiser avec certitude les niveaux producteurs - Détermination des pourcentages de production de chaque arrivée d'eau

Annexe 8

Développement et essais



Version validée le 24 novembre 2015

FICHE TECHNIQUE 081

DETERMINATION DE LA QUALITE DES OPERATIONS DE DEVELOPPEMENT EN FIN DE FORAGE – BASSE ENERGIE

Les opérations de développement d'un ouvrage font partie intégrante du bon déroulement de la réalisation d'un forage : elles vont conditionner le captage optimal de la ressource et l'intégrité de la partie du forage captant le réservoir.

Cette fiche a pour objectif de présenter les moyens à disposition pour évaluer les résultats et la qualité des opérations de développement.

*Le terme de « développement » recouvre dans cette fiche **les opérations allant de la mise en eau du puits à la mise en production en passant par les stimulations hydrauliques ou chimiques**. Seules les opérations en fin de forage sont couvertes. Toutefois, les mêmes types d'opérations peuvent être mis en place, sous des appellations différentes telles que « nettoyage du puits », « acidifications », « régénération », au cours de la vie de l'ouvrage ou de phases de réhabilitations.*

1. Présentation générale et objectifs du développement d'un ouvrage en fin de forage

Les opérations de développement d'un ouvrage recouvrent une large gamme d'opérations visant plusieurs objectifs :

- le nettoyage des résidus du forage (boue, particules fines, cuttings) dans l'ouvrage ;
- l'augmentation de la productivité de l'ouvrage (élimination des fines qui colmatent naturellement le réservoir, augmentation des fissures ou des pores, augmentation locale du rayon du forage) généralement via des opérations de stimulation *stricto sensu* ;
- la stabilisation de la formation et/ou de l'équipement, notamment dans les réservoirs clastiques.

La bonne conduite des opérations de développement est l'un des éléments fondamentaux qui détermine la réussite d'un ouvrage. En effet, un puits mal développé ou mal nettoyé pourra présenter des caractéristiques bien inférieures à celles espérées pour un réservoir de bonne qualité. Les opérations de stimulation peuvent aussi rendre économiquement rentable un ouvrage exploitant un réservoir présentant des caractéristiques naturelles *a priori* insuffisantes.

De plus, ces opérations permettent de limiter les risques de détérioration de l'ouvrage ou des équipements de pompage due à des remontées de débris ou des phénomènes de déstabilisation de la formation réservoir. Dans ce cadre, une attention particulière peut être apportée aux formations non consolidées (aquifères clastiques notamment). En effet, dans ce type de réservoir, le développement permet de finaliser la mise en place des équipements (massif de gravier) et de stabiliser la formation (nettoyage des fines dans l'environnement proche puits). Ces opérations vont directement influencer la qualité de la filtration.

2. Protocoles et suivi des opérations

Le protocole d'un développement (type de stimulation, durée, nombre d'opérations...) dépend de la nature du réservoir visé. A la nature du réservoir vont s'ajouter les caractéristiques locales (perméabilité « de fracture » ou de matrice, géologie locale, transmissivité).

Deux types de protocoles sont détaillés à titre d'exemple ci-après :

- développement du réservoir du Dogger du Bassin parisien (réservoir carbonaté de bonne transmissivité) ;
- développement de l'Albien (réservoir de type clastique).

Ces opérations peuvent engendrer un coût non négligeable en raison de l'immobilisation de la machine en fin de forage. Pour cette raison, elles doivent être anticipées, budgétées et planifiées en amont, malgré les incertitudes pouvant être présentes sur le protocole final à mettre en place. Cette anticipation est d'autant plus importante sur des milieux complexes tels que fracturés ou sablo-gréseux nécessitant une connaissance relevant de l'expertise.

2.1 Les grandes étapes

2.1.1 Déroulement

Les grandes étapes d'un protocole de développement sont :

- 1) la mise en eau du puits ou dégorgement initial ;
- 2) l'évaluation initiale des capacités du puits ;

- 3) l'opération de stimulation proprement dite (stimulation mécanique tel que sur-pompage, jetting, pistonnage, stimulation hydraulique, stimulation chimique) ;
- 4) l'évaluation des capacités de l'ouvrage par rapport à l'objectif visé et l'évaluation du gain engendré par la stimulation.

Les phases 3 et 4 vont se réaliser de manière itérative jusqu'à obtention du débit souhaité ou jusqu'à ce que le gain engendré par la stimulation soit considéré comme nul ou non rentable.

En sus de ces quatre grandes étapes, s'ajoutent :

- des phases de dégorgement lors des stimulations chimiques et hydrauliques ;
- une phase de stabilisation du massif filtrant notamment dans les cas des réservoirs de types clastiques.

2.1.2 Dégorgement initial

En fin de forage, le puits est généralement rempli de la boue ayant servi à la foration. Le dégorgement initial va donc avoir pour objectif de remplacer la boue par le fluide du réservoir.

Le processus généralement utilisé est une « mise en eau » du puits, au moyen d'une injection en fond de puits d'une eau claire (eau du réseau par exemple) suivie par une mise en production (naturelle ou assistée) du puits.

Ce dégorgement initial doit permettre d'obtenir une eau claire et représentative du réservoir en fin de dégorgement, avec une stabilisation des paramètres : pH, température, salinité, débit.

2.1.3 Evaluation du gain de la stimulation - évaluation des capacités de l'ouvrage

L'évaluation des capacités de l'ouvrage et du gain de la stimulation se fait au travers des essais hydrauliques.

Pour rappel, on distingue deux classes d'essais :

- les essais par paliers permettant d'obtenir la courbe caractéristique du puits, c'est-à-dire la représentation graphique du rabattement ou du différentiel de pression en fonction du débit ;
- les essais « longue durée » faisant appel au régime transitoire permettant de connaître les caractéristiques hydrodynamiques du réservoir.

Dans le suivi des opérations de développement, l'utilisation des essais par paliers est privilégiée pour analyser les gains obtenus à chaque phase du développement.

Les essais « longue durée » peuvent être requis lorsqu'une compréhension poussée du réservoir est nécessaire pour la mise en place du protocole (modèle de réservoir à analyser pour évaluer la distance ou le volume à stimuler, souhait d'établir une connexion entre deux puits, localisation précise de la zone productrice etc.). Ce type d'essai est, par ailleurs, obligatoire pour la caractérisation du réservoir, en dehors du suivi et de l'analyse des phases de développement.

Essais par paliers – évaluation du gain

Les essais par paliers consistent à mesurer la pression ou le rabattement obtenu au bout d'une même durée pour différents paliers de débit. Dans le cadre plus large de la caractérisation

hydraulique d'un puits, ces essais permettent d'obtenir la courbe caractéristique du puits ou courbe de productivité¹⁴. Cette courbe constitue la « carte d'identité » du puits.

Pour rappel, ces essais sont normalisés dans le cadre de la production d'eau (potable ou industrielle). La norme (norme NFX 10 -999 révisée en août 2014) implique notamment :

- la réalisation de paliers de débits de durées égales, comprises entre 1 et 2 h ;
- l'utilisation d'un minimum de 3 paliers séparés par des retours à l'équilibre de durée équivalente au palier. Le nombre de trois paliers constitue un minimum, un quatrième palier est souvent nécessaire pour tracer la courbe ;
- l'atteinte d'un débit supérieur au débit d'exploitation.

Dans le cadre des essais en géothermie profonde sur aquifères ou avec des températures supérieures à 30°C, des modifications de ce protocole sont réalisées pour les raisons suivantes :

- **le risque de déstabilisation de la formation** dans la partie « proche puits » pour des débits proches ou supérieurs au débit d'exploitation. En effet, les mises en production dans ce type d'ouvrage doivent éviter toute ouverture ou fermeture brusque du puits. Il n'est donc pas recommandé de réaliser les paliers à forts débits de manière isolés. L'utilisation de paliers enchaînés à débits croissants peut remplacer les propositions de la norme. Toutefois, cette contrainte doit être prise en compte lors de l'interprétation des essais et l'établissement de la courbe caractéristique ;
- **l'effet de la température et de la décompression du fluide** : la mise en production du puits entraîne une variation de température (réchauffement de la colonne d'eau), qui modifie les caractéristiques du fluide et du réservoir. Par conséquent, les premiers temps de production sont fortement perturbés et difficilement contrôlables lors de la mise en œuvre des essais. Le protocole proposé, dans ce cas, est :
 - o la réalisation de paliers enchaînés de manière à limiter les temps de refroidissement/réchauffement ;
 - o la réalisation des paliers d'une durée suffisante pour que la température soit stabilisée en fin de palier ;
 - o la réalisation d'un palier à débit décroissant après les paliers croissants de manière à s'assurer de la répétitivité de la mesure ;
 - o utiliser un protocole expérimental identique entre chaque stimulation.

D'autres recommandations peuvent être émises en termes d'évaluation finale des capacités hydrauliques du forage, notamment sur l'atteinte d'un débit représentatif de l'exploitation, mais dans le cadre strict de l'évaluation du développement, les éléments suivants seront privilégiés :

- le respect du même protocole (nombre de paliers, durée) entre chaque opération de stimulation de manière à bien distinguer l'effet de la stimulation ;
- l'utilisation des mêmes moyens de mesure : débit, pression ;
- le suivi des paramètres du fluide en parallèle du suivi en continu du débit et de la pression durant les essais par paliers. En effet, le développement peut se prolonger durant les essais par paliers et induire des modifications sur les paramètres mesurés. Il faut, dans ce cas, pouvoir les repérer (modifications de température/conductivité, passages de fluide plus turbide, saut de pression ou de débit sans modification des conditions en tête de puits) pour pouvoir analyser les essais de manière fiable.

¹⁴ Le terme de « productivité » utilisé dans le domaine de la géothermie est un raccourci pour désigner l'indice de productivité. Mathématiquement, cela correspond à $\Delta P = f(Q)$ avec ΔP : différence de pression et Q : débit

Analyse du début des essais « longue durée » - Evaluation du proche puits

L'analyse de l'évolution du rabattement ou de la pression en fonction du temps, au début des essais, permet d'évaluer l'état du « proche puits », c'est-à-dire de la zone ayant été stimulée/développée ou dégradée par la réalisation du forage.

Cette analyse se fait généralement sur des essais suffisamment longs pour distinguer la partie réservoir et la partie « proche puits ». En fonction du type de réservoir et du temps nécessaire pour sortir des effets de puits ou pour atteindre un régime représentatif du réservoir¹⁵, l'analyse des essais par paliers peut s'avérer suffisante. Cependant, seul l'essai de « longue durée » permet de connaître la durée « suffisante ».

Le protocole de ce type d'essais n'est généralement pas spécifique de l'évaluation du développement : il s'inscrit dans le cadre de la caractérisation du réservoir. Leur interprétation dans le cadre du développement est discutée au paragraphe 0 page 238.

2.2 Suivi des paramètres

De manière à suivre les opérations de développement, un monitoring en continu des paramètres (pression, débit, température) est nécessaire.

Les mesures de débit devront être effectuées et contrôlées simultanément au moyen de deux équipements différents. On utilise généralement un bac déversoir en V, équipé d'un bassin de tranquillisation et un (ou plusieurs) débitmètre(s) installé(s) sur la ligne de rejet, si possible (fluide non dégazant et peu chargé en particules).

Ce monitoring permet d'analyser et d'ajuster si nécessaire le protocole de développement/stimulation.

De plus, il est préconisé de réaliser la mesure de la pression et de la température en fond de puits, lors des essais hydrauliques (sabot du tubage, ou au niveau des crépines le cas échéant), en parallèle des mesures en tête de puits. En effet, seul ce type de mesures permet de s'affranchir, en grande partie, des effets de puits. Pour les interprétations poussées comme le facteur de skin, ce type de mesure est indispensable.

¹⁵ On entend par partie représentative du réservoir, le temps à partir duquel l'évolution de la pression est en régime « pseudo permanent » en littérature pétrolière. C'est la partie interprétable en termes de paramètres hydrodynamiques (transmissivité, coefficient d'emmagasinement).

3. Evaluation de la qualité des opérations de développement

3.1 Axes d'analyse

La bonne réalisation des opérations de développement nécessite de croiser plusieurs analyses. Si dans certains cas, l'évaluation est simple, elle peut demander une étude plus approfondie dans des cas complexes (protocole de stimulation hydraulique, utilisation de produits particuliers tels que des acides présentant des réactions cinétiques lentes, inhibiteur de corrosion, composition chimique utilisée etc.).

On détaille, ci-dessous, les paramètres récurrents nécessaires à l'évaluation des opérations de développement quelles qu'elles soient. Des paramètres supplémentaires peuvent donc être ajoutés en fonction des protocoles.

La qualité d'une opération de développement peut être évaluée au travers de :

1. La pertinence du protocole face au type de réservoir à développer (cf. exemples traités ci-dessous) ;
2. La stabilité des paramètres du fluide du réservoir lors des essais par paliers, mais aussi à la fin de chaque phase de dégorgement : pH, salinité, température, turbidité ;
3. La diminution de la turbidité, des particules en suspension et de la teneur en sable jusqu'à l'obtention d'une eau claire ;
4. L'analyse et les résultats des essais par paliers aux différentes étapes du développement, ainsi que la cohérence des données mesurées lors des essais ;
5. L'atteinte, lorsque possible (conditions de pompages et rejets en surface), du débit d'exploitation projeté lors des phases de dégorgement ou des essais par paliers.

A ces paramètres indispensables peuvent s'ajouter couramment :

6. L'évolution des flow-métries et des profils de température entre chaque phase de développement/stimulation montrant l'apparition de nouvelles zones productrices ;
7. Le cas échéant, l'analyse des capacités du proche puits (facteur de skin, modèle de réservoir), au travers des essais dits de « longue durée » (essais de production, remontée de pression).

3.2 Stabilité des paramètres du fluide du réservoir

Lors des phases de dégorgement ou de pompage, l'objectif est de nettoyer le puits de l'ensemble des fluides qui ont été injectés lors du forage ou des phases de stimulation. Le suivi des paramètres du fluide permet d'évaluer à quel moment le fluide natif est prélevé. Il permet aussi dans certains cas de vérifier le bon dégorgement des résidus des réactions chimiques résultats des stimulations réalisées dans le réservoir et dans l'ouvrage.

3.3 Diminution de la turbidité, des particules en suspension et de la teneur en sable

Les mesures de turbidité¹⁶, des particules ou matières en suspension et de la teneur en sable¹⁷, dans le cas des aquifères clastiques, sont de bons indicateurs du niveau de nettoyage ou de développement d'un ouvrage.

Leur suivi tout le long des opérations permet d'évaluer l'efficacité de chaque phase (forte teneur en début de dégorgement ou de palier puis diminution) et de la nécessité de continuer ou renouveler le protocole (absence de particules au débit d'exploitation ou venue persistante nécessitant une action complémentaire).

Pour information ou rappel, la Norme NF EN ISO 7027 définit deux unités de mesure de la **turbidité** dont l'une, généralement utilisée, est le « Nephelometric Formazine Unit » ou NTU défini par Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001. Cette unité s'adresse à la mesure de la turbidité d'une eau destinée à la consommation humaine.

Une eau peut être considérée comme claire lorsque la turbidité est inférieure à 5 NTU. En fin de développement, la turbidité devrait par conséquent être inférieure ou égale à 5 NTU au débit maximal d'exploitation projeté.

La **teneur en sable** d'une eau destinée à la consommation humaine n'est pas un paramètre considéré dans l'évaluation de la qualité de l'eau ; toutefois, il est recommandé, notamment par l'Environment Protection Agency (EPA), agence nationale américaine, de ne pas dépasser la valeur de **1 mg/l**. Les forages géothermiques à l'Albien en Ile-de-France pouvant être appelés, en cas de crise, à être utilisés en eau de secours, il est fortement recommandé de respecter, à minima, cette valeur.

Bien qu'aucune norme spécifique à la géothermie ne soit présente, il est recommandé de respecter l'absence de tout dépôt au bout d'une heure de sédimentation. Ce point est très restrictif de manière à prévenir les problèmes liés au colmatage dans le puits de réinjection.

3.4 Analyse des résultats des essais par paliers

Un rappel succinct sur l'interprétation des essais par paliers dans un cadre général est disponible en annexe.

Pour des informations plus approfondies, une fiche technique spécifique sur les essais est disponible.

L'évaluation du gain de la stimulation se fait sur la base de :

- la baisse des pertes de charges quadratiques ;
- un gain en débit entre les courbes caractéristiques obtenues avant et après stimulation pour le même rabattement / différence de pression.

¹⁶ Mesure de la turbidité : les mesures de turbidité NTU peuvent être réalisées par la méthode néphélométrique normalisée (mesure de l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 90 degrés par rapport au trajet de la lumière incidente). A défaut de mesure de turbidité, des analyses de matières sèches (MS) peuvent être effectuées. On considère dans ce cas que 1 NTU mesuré avec un angle de 90° est équivalent à 3,25 mg/l de silice colloïdale

¹⁷ Mesure de la teneur en sable : la mesure de la teneur en sable est réalisée sur le site au moyen d'un cône Imhoff (ou similaire) de 1 litre comportant une graduation basse de 0,1 ml. On considérera comme "trace" une lecture inférieure à 0,05 ml/litre (50 ppm). Pour des mesures plus précises (50 - 1 ppm), en l'absence de turbidimètre, on peut alternativement utiliser le Rossum Sand Tester

Si le gain perçu entre deux essais encadrant une stimulation est nul ou très faible, on considère que la réitération de l'opération de stimulation n'amènerait plus aucun gain.

En sus de l'évaluation du gain, l'analyse des essais par palier peut permettre d'invalider la fin d'une phase de développement par des incohérences dans les résultats obtenus et les paramètres mesurés tels que :

- la présence de saut de pression ou de débit lors des paliers liée à un débouillage du réservoir ;
- une inversion de la courbe ou des tendances de la courbe caractéristique à forts débits ;
- une variation du débit ou de la pression non imputable au réservoir ou à des manœuvres en tête.

3.5 Analyse du proche puits via les essais « longue durée »

Différentes formulations existent pour représenter le comportement hydraulique de la zone proche puits, c'est-à-dire la zone ayant été stimulée/développée ou dégradée par la réalisation du forage. Les plus communes sont le rayon équivalent en hydrogéologie et le facteur de skin pour la géothermie profonde et le milieu pétrolier.

3.5.1 Définition du facteur de skin

Le facteur de skin permet de représenter les effets de paroi du puits, qui modifient le comportement de l'aquifère au proche puits. D'un point de vue théorique, il peut être pris en compte de deux manières :

- en considérant une perméabilité équivalente k_s , sur un rayon r_s autour du puits qui représenterait la zone impactée par l'effet de paroi, responsable de l'écart entre la pression obtenue par le modèle de réservoir utilisé et le comportement réel du puits. Le facteur skin est alors exprimé : $s = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w}$ avec :
 - o r_w et k , rayon du puits et perméabilité de la formation encaissante ;
 - o r_s et k_s , rayon et perméabilité de la zone de perméabilité k_s ;
- en considérant un rayon équivalent du puits. Un rayon équivalent plus large que celui du puits traduira une perméabilité accrue sur le pourtour immédiat de la paroi du forage, tandis qu'inversement, un colmatage partiel des parois du forage se traduira par un rayon équivalent plus étroit que celui du puits.

La convention de signe la plus usitée en géothermie et dans le domaine pétrolier associe un skin négatif pour un ouvrage présentant une perméabilité supérieure à celle naturelle du réservoir. Un skin positif représentera un ouvrage présentant une perméabilité inférieure à celle « naturelle du réservoir ».

Différents paramètres peuvent jouer sur la valeur du facteur de skin (ou du rayon équivalent) en dehors du développement :

- l'inclinaison du puits ;
- la nature du réservoir (fracturée ou matricielle) ;
- la hauteur productrice ;
- la perméabilité/transmissivité naturelle du milieu ;
- la tortuosité de l'ouvrage ;
- le rayon initial/réel du forage.

3.5.2 Analyse pour le développement

Par définition, lorsque la perméabilité du proche puits est plus faible que celle de la formation encaissante, le facteur de skin sera positif (ou le rayon équivalent inférieur au rayon réel). Un facteur de skin positif représente donc un milieu dont on peut attendre une amélioration par une opération de développement.

L'interprétation d'un skin négatif (ou un rayon équivalent supérieur au rayon réel) indiquera un ouvrage ayant une productivité supérieure à celle que fournirait la formation seule. Il pourrait donc indiquer un ouvrage « bien développé ».

Toutefois, les autres paramètres jouant sur le skin sont à prendre en compte lors de l'analyse du développement : un puits incliné pourra présenter « naturellement » un skin négatif avant tout développement. A l'opposé, un puits tortueux pourra présenter un skin positif après développement sans que l'on puisse remettre en cause le développement de l'ouvrage.

Par conséquent, un facteur de skin seul et isolé de son contexte ne peut être utilisé en valeur absolue pour qualifier le développement du réservoir.

Si possible, son analyse doit se faire en relatif :

- entre deux ouvrages présentant les mêmes paramètres hydrogéologiques et techniques ;
- entre deux phases de développement sur un même ouvrage.

4. Exemple de protocole d'opérations de développement

4.1 Exemple de développement chimique par acidification d'un réservoir carbonaté : le Dogger parisien

Dans le cas du Dogger, le développement est assuré par plusieurs acidifications à partir d'acide chlorhydrique (HCl, 15%). Les opérations de développement sont relativement simples et comportent une bonne part d'empirisme. La bonne connaissance de l'aquifère du Dogger et la réalisation de nombreux puits a permis de fixer les étapes selon le protocole présenté ci-dessous.

4.4.1 Protocole usité

Le protocole comprend généralement les phases suivantes :

- **dégorgement initial** : le puits est mis en eau en profitant de la pression artésienne naturelle du Dogger. La densité de la colonne de boue est allégée par injection d'eau afin de permettre au puits de débiter naturellement. Les valeurs usuelles rencontrées lors du dégorgement correspondent à un débit de l'ordre de 70-100 m³/h pendant une durée de 24 heures environ.
- **essai par paliers initial** : après le dégorgement, un premier essai par paliers permet de définir les conditions initiales du puits avant toute opération de développement.
- **stimulation**: l'opération de stimulation consiste à :
 - l'injection, dans le réservoir, de 15 à 20 m³ d'acide chlorhydrique inhibé, l'inhibiteur ayant pour objet de protéger les tiges de forage et les équipements de pompage en contact direct avec l'acide non dilué ;
 - L'injection d'un « volume de chasse » adapté au volume du puits et à la distance d'action souhaitée : trou nu ou zone proche puit ;
 - L'attente de l'effet de cette injection est d'au moins 3 heures.

- **dégorgement après acidification** : après acidification, un nouveau dégorgement du puits est réalisé. Sa durée usuelle est de 12 heures minimum pour un débit visé de 70-100 m³/h ;
- **essais par paliers** : 3 paliers de 1 heure chacun à débits croissants. En fonction des résultats, une stimulation est relancée.

Deux opérations de stimulation sont généralement réalisées avec une injection plus ou moins lointaine dans la formation par le biais du « volume de chasse » : la première stimulation a généralement pour objectif de « nettoyer » et la deuxième de stimuler un peu plus loin le proche puits. En fonction des protocoles, l'acide chlorhydrique sera injecté plus ou moins loin en fonction des zones visées. Toutefois, cette adaptation reste limitée : la cinétique de réaction de l'acide chlorhydrique est rapide et ne permet pas de réaliser une stimulation chimique « lointaine¹⁸ ».

L'évaluation du développement se fait en comparant les résultats obtenus sur tous les essais par paliers : initial, post-stimulation n°1 et post-stimulation n°2.

Généralement, si à l'issue de la deuxième acidification, la productivité prévisionnelle attendue sur le puits est atteinte, on considère que le développement est terminé.

Inversement, si la productivité prévue n'est pas atteinte deux cas sont à envisager :

- l'évolution de la productivité après chaque stimulation reste importante : le développement du puits doit se poursuivre. De nouvelles opérations d'acidification doivent normalement être envisagées ;
- l'évolution de la productivité, après la deuxième acidification, est faible ou nulle. Une nouvelle acidification n'apporterait pas (ou très peu) de changement. On peut, dès lors, considérer que les paramètres du réservoir ne correspondent pas aux attentes initiales ou qu'un autre type/protocole de stimulation devra être apporté.

4.1.2 Recommandations complémentaires

Pour des raisons économiques et de contraintes liées à l'environnement urbain, les opérations de dégorgement se font parfois à un débit largement inférieur au futur débit d'exploitation (70-100 m³/h en dégorgement pour 250-350 m³/h en exploitation).

Cette dérogation est uniquement admise en raison de la « bonne connaissance » du Dogger et de la bonne transmissivité dans les zones exploitées, en géothermie basse énergie, en région parisienne. Toutefois, en cas d'hétérogénéité ou de forage en zone « inconnue », la pratique de ce protocole peut s'avérer insuffisante, d'une part pour les opérations de développement proprement dites, mais aussi pour évaluer l'efficacité du développement.

Il est, dans tous les cas, fortement recommandé de privilégier les plus forts débits (à minima 1/3 du débit d'exploitation) dans les dégorgements pour éviter deux risques :

- le colmatage de la formation, lors des phases d'injection d'acide. En effet, ces phases impliquent de repousser, dans la formation, les débris du forage ou des processus d'acidification pouvant colmater la formation ;
- la venue de particules fines ou morceaux de roches dans les cas les plus critiques, lors de la mise en production de l'ouvrage.

¹⁸ Les notions de « lointaine » et « proche puits » sont uniquement utilisées en relatif. Elles ne peuvent être qualifiées en termes de distance géométrique en l'état des connaissances.

Le recours au pompage par air-lift permet de suppléer aux zones ne présentant pas une pression artésienne suffisante pour obtenir le débit souhaité : son utilisation est très fortement recommandée.

4.2 Exemple de développement d'un aquifère de type sablo gréseux : l'albien

Les aquifères clastiques comme l'Albien, le Néocomien ou le Trias, nécessitent des complétions de captage (crépines et massifs filtrants) permettant le maintien et la filtration des horizons argilo-sableux ou gréseux dont ils sont constitués¹⁹.

Ces éléments complémentaires entraînent des contraintes supplémentaires sur les opérations de développement. En effet, le développement aura pour objectif complémentaire, si ce n'est le premier, de stabiliser la formation et le massif filtrant. Les techniques utilisées sont adaptées à la granulométrie et à la lithologie.

Actuellement, deux solutions sont généralement à disposition pour assurer la filtration des éléments les plus fins de la formation :

- installer un massif filtrant spécifique ("massif de gravier") autour des crépines après leur mise en place ;
- utiliser des crépines doubles ou pré-gravillonnées avec, en sus, la réalisation d'un auto-gravillonnage²⁰ par les éléments de la formation elle-même.

En fonction de la technique utilisée, des précautions supplémentaires doivent être apportées. Le cas du massif de gravier est précisé ci-après.

4.2.1 Etapes principales du développement

Le développement du puits doit être conduit de façon très progressive pour finaliser la mise en place du gravier et assurer l'efficacité de la filtration.

Les premières phases se déroulent à l'air-lift, puis sont poursuivies au moyen d'une pompe d'exhaure.

En dehors de l'augmentation de la perméabilité dans le proche puits, les procédures initiales de développement ont pour objectif de :

- finaliser la mise en place du massif filtrant (principalement en favorisant son tassement) dans les cas où un massif de gravier a été mis en place autour des crépines ;
- mettre en place l'auto-gravillonnage autour des crépines.

Cette phase précède le développement proprement dit du puits (filtration, stimulation et production d'eau claire).

¹⁹ Le matériel nécessaire est décrit dans la fiche dédiée aux complétions

²⁰ L'auto-gravillonnage consiste à réaliser le massif filtrant ou à le compléter en utilisant les éléments sableux de la formation elle-même. C'est une opération qu'il est possible d'effectuer avec des crépines standards dans le cas de formations fortement hétérométriques ou dans toutes les formations avec des crépines disposant d'un système de pré-filtration intégré (crépines doubles ou prépacked).

Mise en eau du puits

La mise en eau du puits se fait à l'air-lift, à faible débit (20-25 m³/h), sur une durée de 12-24 h, dans le cas d'un massif de gravier. Cette durée peut être réduite à 8 h dans le cas d'un système de filtration intégré avec auto-gravillonnage.

Développement pendant la phase d'air lift

La procédure pendant l'air-lift est la suivante :

1. **Pompage par air-lift à débits croissants** : 30 m³/h, 50 m³/h, 70 m³/h, 90 m³/h, jusqu'au maximum de l'air-lift. A chaque palier, on attendra l'obtention d'une eau suffisamment claire avant de passer au palier de débit suivant.
2. **Stimulation mécanique** pour favoriser le tassement du massif de gravier ou la mise en place des éléments de filtration dans le cas d'un auto-gravillonnage (pistonnage, "soutirage", pompage alterné, jetting,...).
3. **Nettoyage par injection de solvants chimiques**. L'opération sera réalisée autant de fois que nécessaire (polyphosphates dans le cas de boues bentoniques, acide dans le cas de boues polymères,...).
4. **Reprise du pompage de développement au débit maximal** de l'air-lift (généralement 70-100 m³/h) pendant, au minimum, 24 heures. Si nécessaire, ce pompage est poursuivi au-delà de 24 heures.

La procédure est réitérée en l'absence de l'atteinte d'une turbidité inférieure à 10 NTU (ou MS < 40 mg/l) au débit maximal de l'air lift, qui devrait être supérieur au débit d'exploitation. Cette condition n'est pas atteinte généralement en raison de la limitation en puissance de l'air lift et des débits utilisés en géothermie.

Si aucun gain (débit, capacité hydraulique) n'est obtenu entre deux cycles de développement alors que le puits montre des indications de développement possible ou que le débit n'est pas atteint, les méthodes de stimulation doivent être modifiées.

L'obtention d'une eau claire ne signifie pas que le forage est développé. C'est pourquoi les méthodes sont alternées et poursuivies pour augmenter la perméabilité du proche puits.

En parallèle de ces phases de développement, une vérification du niveau de gravier résiduel doit être réalisée. Un complément de gravier devra être effectué de manière à conserver une réserve d'au moins 10 % du volume²¹ du massif filtrant au-dessus des crépines. Il est fortement recommandé de réaliser cette vérification quel que soit le massif de gravier ou son volume : la mise en place de ponts peut se produire, lors de la mise en place du gravier entraînant une mauvaise disposition du gravier.

²¹ Dans le cas d'un rayon identique sur l'ensemble du puits, cela correspond à une réserve sur au moins 10 % de la hauteur crépinée au-dessus des crépines

Poursuite du développement à la pompe

Lorsque la phase de développement par air-lift a atteint son but, les opérations se poursuivent au moyen d'une pompe d'exhaure²² :

1. Développement à la pompe par paliers progressifs de débit (par exemple, 50 m³/h, 100 m³/h, 150 m³/h, 200 m³/h, jusqu'au débit maximal de production plus 10%). A chaque palier, on attendra l'obtention d'une eau claire (NTU < 4 ou MS < 15 mg/l) avant de passer au palier de débit suivant.
2. Evaluation du gain par le moyen d'essais par paliers tel que décrits dans le chapitre 233.

Il est recommandé de respecter les **conditions minimales** suivantes :

- a. Nombre minimum de paliers : 4
 - b. Répartition des débits : 25%, 50%, 75% et 100% du débit maximum prévu en production (Q_{max})
 - c. Durée minimale des paliers : 5 x volume du puits / Q_{max}. Valeur arrondie à la demi-heure supérieure.
3. Vérification du fond des crépines et nettoyage éventuel des sédiments par air-lift en fond de puits.

Si les résultats de l'essai de pompage par paliers démontrent un développement insuffisant, la procédure de développement à la pompe est reprise à son début.

5. Annexes : rappel sur les essais par paliers

5.1 Généralités

Les essais par paliers consistent à mesurer la pression ou le rabattement obtenu au bout d'une même durée pour différents paliers de débit. Ils permettent ainsi d'obtenir la courbe caractéristique du puits ou courbe de productivité²³. Cette courbe constitue la « carte d'identité » du puits.

Pour rappel, ces essais sont normalisés (norme NFX 10 -999 révisé en aout 2014) dans le cadre de la production d'eau (potable ou industrielle). Leur interprétation permet de discriminer les pertes de charges linéaires – associées à l'écoulement dans l'aquifère et les pertes de charges quadratiques associées à un écoulement turbulent au proche puits. Ce dernier peut être lié à la présence d'équipement/restriction créant des turbulences où à une vitesse d'écoulement au-delà du régime laminaire.

La méthode la plus courante est la méthode de Jacob (Jacob, 1947), où le rabattement de pression à la fin de chaque palier est décrit par la relation suivante :

$$\Delta p = BQ + CQ^2$$

avec :

²² Cette pompe doit permettre de réaliser un pompage à 110 % du débit maximal prévu pour l'exploitation

²³ Le terme de « productivité » utilisé dans le domaine de la géothermie est un raccourci pour désigner l'indice de productivité. Mathématiquement, cela correspond à $\Delta P = f(Q)$ avec ΔP : différence de pression et Q : débit

- B : le coefficient de pertes de charge linéaires (liées à l'aquifère ; en s/bar²) ;
- C : le coefficient de pertes de charge quadratiques (liées au puits ; en s²/bar⁵) ;
- Δp (bar) le rabattement (différentiel) de pression après un certain temps de pompage, identique pour chaque palier ;
- Q (m³/h ou L/s) le débit de chacun des paliers.

5.2 Le débit critique

La notion de débit critique est relative aux pertes de charge dans l'ouvrage. Les pertes de charge quadratiques résultent de turbulences des écoulements aux passages étroits (porosité de la zone proche du puits, massif filtrant, entrée dans les crépines) où les vitesses d'écoulement sont maximales. Lorsque les pertes de charge quadratiques apparaissent supérieures aux pertes de charge linéaires, le débit est dit critique. L'exploitation au-delà du débit critique est dommageable pour les équipements (abrasion / corrosion), le massif filtrant (déstabilisation, venues de fines) et sur le plan énergétique.

Différentes méthodes permettent de déterminer le débit critique à partir de la courbe caractéristique ($\Delta p=f(Q)$). La norme AFNOR X10-999 décrit l'inconvénient de la méthode Porchet, qui consiste à repérer un point d'inflexion souvent subjectif. Elle préconise le calcul du point d'équilibre entre pertes de charge linéaire et quadratique tout en mettant en garde sur les limites de la méthode : les milieux karstiques ou fracturés se prêtent mal à cette interprétation. En outre, les puits à faible coefficient de pertes de charge quadratiques montrent un débit critique bien supérieur au débit du dernier palier, probablement peu réaliste. La méthode est toutefois applicable dans de nombreux cas et plus rigoureuse que la précédente. Elle est proposée de manière optionnelle dans le logiciel « Ouaip » (BRGM).



Janvier 2016

FICHE TECHNIQUE 082

ESSAIS DE FORMATION EN GEOTHERMIE BASSE ENERGIE

Les essais de formation, ou « essais de longue durée », sont mis en œuvre après les opérations de développement caractérisées par les « essais par paliers » (Cf. Note technique 081). Ils constituent l'opération finale des travaux de forage, qui vise à déterminer les caractéristiques locales du réservoir géothermal. Les conditions de réalisation de ces essais, l'acquisition des données et l'interprétation finale des essais sont des éléments d'appréciation essentiels, dont il convient de conserver la mémoire pour comprendre le fonctionnement du réservoir et son évolution.

Cette fiche a pour objectif de déterminer un cadre commun de réalisation des essais visant à harmoniser les pratiques dans le domaine de la géothermie basse énergie et à enrichir de manière pertinente les bases de données partagées par la filière.

1. Contexte de réalisation des essais de formation en géothermie basse énergie

Par rapport aux essais réalisés en fin de forage dans les domaines de l'hydrogéologie classique ou de l'industrie pétrolière, l'ingénierie de réservoir en géothermie basse énergie intègre des spécificités liées à la performance énergétique du dispositif géothermique (réinjection du fluide géothermal dans le même réservoir d'origine) et aux contraintes de réalisation (temps d'observation court et point d'observation unique). Ces spécificités ont des conséquences sur l'économie de l'opération géothermique.

1.1 Enjeux des essais de formation en géothermie

Dans le domaine de la géothermie basse énergie, la finalité des essais de formation réalisés à l'issue des travaux de forage est de déterminer la puissance thermique du dispositif industriel (constitué d'un doublet ou d'un triplet de forages) effectivement valorisable sur le réseau de chaleur, par l'intermédiaire d'échanges indirects (pompes à chaleur, PAC) ou directs (échangeurs de chaleur), si la température de la ressource géothermale est suffisante.

La performance énergétique du dispositif est appréciée au regard des capacités réelles de production et d'injection des ouvrages (indices de productivité / injectivité) et de la pérennité de

l'exploitation (percée thermique), qui dépendent des caractéristiques locales du réservoir : pression et température du gisement, transmissivité du réservoir.

En cas de remise en cause partielle ou totale de la rentabilité économique du projet, liée à des caractéristiques inférieures aux valeurs prévisionnelles, le Maître d'ouvrage a la possibilité de recourir à un système d'assurance spécifique à la filière (géré par l'organisme SAF Environnement), qui couvre le risque géologique (qui intègre un « risque géothermique », si on se réfère à la courbe succès/échec établie dans les dossiers de la SAF Environnement) lié aux caractéristiques initiales du réservoir (garantie « court terme ») ou à leur dégradation en cours d'exploitation (garantie « long terme »).

L'enjeu économique est donc lié à la connaissance scientifique du réservoir. Les essais de formation doivent fournir les informations suffisantes pour comprendre le fonctionnement du réservoir géothermal, dans les limites liées aux conditions de réalisation des essais, et ainsi rechercher les conditions optimales pour pérenniser l'exploitation de la ressource à l'échelle locale, et plus largement à l'échelle régionale.

Le développement de l'exploitation de la ressource géothermale s'appuie, d'une part, sur la gestion rationnelle des interactions entre les différents dispositifs existants, et d'autre part, sur la constitution de bases de données (réservoirs et exploitations) permettant de fiabiliser la conception de nouvelles opérations. En dehors des secteurs où les caractéristiques des réservoirs géothermiques sont relativement bien connues, une phase exploratoire est nécessaire avant d'envisager une phase de développement.

1.2 Contraintes de réalisation

Les essais de formation sont réalisés sous des contraintes principalement liées au contexte urbain et aux coûts opérationnels inhérents aux projets de géothermie profonde mettant en œuvre des moyens de forage conséquents.

Le contexte urbain génère des contraintes liées au site qui limitent :

- la durée des essais afin de réduire les nuisances générées sur le voisinage : circulation et bruits de chantier notamment ;
- le débit de production afin de respecter les conditions de rejet dans le réseau d'assainissement, dans le cas où le fluide géothermal ne peut être réinjecté dans un puits disponible à proximité immédiate.

Cette limite du débit de production est d'autant plus sensible que le site est exigu, limitant de ce fait le volume des bassins (bourbiers) disponible pour traiter le fluide entre le point de production (tête de puits) et le point de rejet au réseau.

Les coûts opérationnels génèrent une contrainte temporelle qui limite la durée des essais.

Les essais de formation sont réalisés en toute fin d'opération de forage, à un stade où les opérations critiques, présentant les risques opérationnels les plus élevés (coincement de la garniture de forage, mise en place et cimentation des tubages,...), sont terminées.

Cependant, l'appareil de forage, ses équipements et les moyens humains restent en grande partie mobilisés pour toute éventuelle reprise de forage, en cas de problème constaté sur le puits en cours d'achèvement, mais également pour anticiper les opérations de déménagement de la machine vers un nouveau puits ou vers un autre lieu.

Le risque opérationnel (lié à la perte d'outils dans le puits) limite également le nombre d'instrumentations menées dans le puits (diagraphies).

La durée des essais et leur instrumentation doivent donc correspondre à un compromis technique permettant d'acquérir des données suffisantes à un coût et un risque opérationnel acceptables.

2. Mode opératoire en géothermie basse énergie

Le nombre d'ouvrages profonds disponibles à proximité du site étant généralement faible et leur accessibilité extrêmement réduite (très souvent impossible), le mode opératoire des essais de formation en géothermie basse énergie est exclusivement concentré sur le forage en cours d'achèvement. Cet ouvrage constitue, de fait, le seul point disponible pour les opérations de production, d'instrumentation et d'observation.

2.1 Organisation des essais et sécurité

Compte tenu des contraintes environnementales du chantier (contexte urbain et proximité des lieux d'habitation, surface disponible limitée et conditions de rejet des eaux d'essais), les essais de formation nécessitent une organisation rigoureuse afin d'optimiser leur durée et de limiter les risques, notamment pendant la phase de production. Cette organisation doit intégrer les phases suivantes :

- la conception des essais (programme prévisionnel) ;
- la mise en place du matériel sur chantier (qui peut être réalisée en même temps que la dernière phase de forage) ;
- le suivi en continu des essais et l'acquisition des données ;
- l'interprétation des essais et la rédaction du rapport final (DOE).

En pratique, le programme établi par le responsable des essais est discuté avec les principaux opérateurs sur site, et avec l'entreprise de forage en particulier qui gère les équipements.

Le rejet des eaux d'essais se fait généralement dans le réseau d'assainissement le plus proche, sous conditions fixées par une convention établie par le gestionnaire du réseau. Ces conditions imposent classiquement de suivre et de contrôler le débit, la température et le pH des eaux rejetées.

Ceci implique donc une gestion rationnelle des volumes disponibles, souvent limités, sur site (bassins de l'appareil de forage et éventuels bourniers) et une adaptation en conséquence du débit de production mesuré en continu et contrôlé par une vanne de régulation, placée en amont sur la ligne d'essai.

Une vanne de fermeture est également mise en place sur la ligne d'essai, au plus près de la tête de puits, afin de pouvoir fermer le puits, notamment en cas d'urgence.

Le rejet des eaux d'essais peut également être effectué dans un puits existant à proximité immédiate du puits testé, à condition que ce puits capte le même aquifère. La réinjection dans un ancien puits devant être prochainement abandonné sera préférée à la réinjection dans un puits nouvellement foré. A défaut, toutes les précautions (décantation, filtration) seront prises afin de ne pas risquer l'endommagement du réservoir.

Du point de vue de la sécurité, les moyens humains et les équipements sont également adaptés aux conditions du chantier.

Les risques de chute du personnel dans les bassins utilisés pour stocker temporairement le fluide géothermal doivent être pris en compte et appréhendés.

Des émanations d'hydrogène sulfuré (H₂S) peuvent se produire au cours des tests de production concernant notamment l'aquifère du Dogger.

2.2 Principe et déroulement des essais

En géothermie basse énergie, les essais de formation consistent à réaliser un « test de remontée de pression » dans le puits en cours d'achèvement, comprenant successivement :

- une **phase de production** d'eau géothermale pendant laquelle le débit est mesuré en surface et des diagraphies sont réalisées au niveau du réservoir ;
- une **phase d'enregistrement** de la remontée du niveau piézométrique de la nappe dans le puits provoquée par l'arrêt de la phase de production précédente.

L'interprétation de la remontée de pression (ou de la vitesse de remontée de la nappe dans le puits) a pour objectif principal de déterminer la transmissivité du réservoir dans l'environnement proche du puits (et d'identifier d'éventuelles limites du réservoir traduisant de fortes variations de ce paramètre) et, dans un second temps, de caractériser qualitativement le développement de l'ouvrage (« skin ») en cours d'achèvement, suite aux opérations précédentes comprenant les phases de stimulation du réservoir et les phases de production (dégorgement).

A noter qu'une période de 12 heures de repos, entre la fin des opérations précédentes de développement (stimulations et dégorgements) et le début de la phase de production des essais de formation, est classiquement respectée afin que la pression du réservoir soit stabilisée à un niveau proche de son état d'équilibre naturel avant de commencer la phase de production.

A ces essais de formation doivent s'ajouter des essais d'injection pour les puits destinés à être des ouvrages injecteurs (détermination de l'indice d'injectivité final du puits). Des essais d'interférences entre les puits accessibles sur le site peuvent également être réalisés afin d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques à l'échelle du dispositif et accéder notamment au coefficient d'emmagasinement de l'aquifère (non accessible sur un essai de remontée de pression au puits). La durée de ces essais dépend de la capacité de stockage du fluide sur site.

2.3 Spécificités des essais concernant les aquifères de l'Albien / Néocomien et du Dogger du Bassin parisien

Ce chapitre fait spécifiquement référence aux essais de formation tels qu'ils sont classiquement pratiqués en Ile-de-France pour les aquifères sableux de l'Albien / Néocomien et calcaire du Dogger (étage du Bathonien), dans le Bassin parisien.

2.3.1 Durées et mode de production pour les essais de formation concernant l'Albien / Néocomien

Pour les essais de formation concernant l'aquifère de l'Albien / Néocomien, la durée totale consacrée aux essais de formation est classiquement de 156 heures.

Elle intègre une période de repos de 12 heures (recompression de l'aquifère après les opérations de développement) suivie de deux périodes successives de production et de remontée de pression de 72 heures chacune.

Pendant la phase de production, le débit est assuré par une pompe d'essai descendue dans le puits. Compte tenu des conditions de rejet compatibles avec les caractéristiques du fluide, le débit de production peut être aussi proche que possible de la valeur du débit d'exploitation maximal visée (généralement de l'ordre de 200 m³/h).

2.3.2 Spécificités des essais de formation concernant le Dogger

D'une manière générale, les pratiques concernant les essais au Dogger sont héritées des modes opératoires mis en œuvre, lors de la réalisation des premières opérations géothermiques dans les années 70-80. Ceux-ci donnent un cadre de référence pour les opérations de renouvellement de ces dispositifs et pour les nouvelles opérations menées depuis 2007.

A titre d'exemple, le schéma ci-dessous représente une disposition type des équipements utilisée lors des essais concernant l'aquifère du Dogger. Les moyens techniques sont nécessairement adaptés en fonction du contexte environnemental du chantier et notamment de la place disponible permettant la mise en place de bourniers.

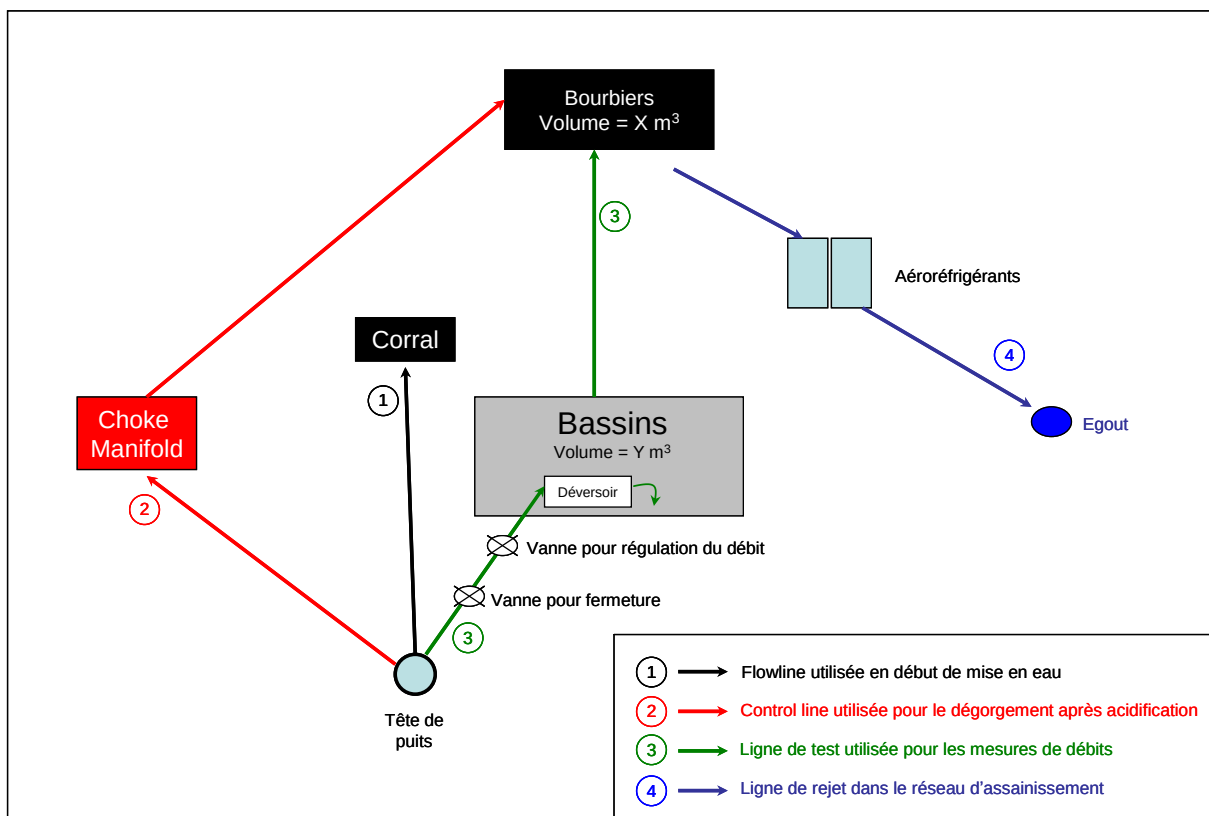


Figure 1 : Exemple de disposition des équipements utilisée pour la réalisation des essais concernant l'aquifère du Dogger

Durées et mode de production pour les essais de formation concernant le Dogger :

La durée totale consacrée aux essais de formation est généralement réduite à 36 heures pour l'aquifère du Dogger, afin de respecter les conditions de rejet dans le réseau d'assainissement, beaucoup plus contraignantes, compte tenu des caractéristiques du fluide (température de rejet inférieure à 30°C notamment), dans le cas où le fluide géothermique ne peut être réinjecté dans un puits disponible à proximité immédiate.

Cette durée comprend les périodes de repos, de production et de remontée de pression de 12 heures chacune.

Pendant la phase de production, le débit minimal visé est généralement de l'ordre de 100 m³/h, pendant toute la durée de production.

La production peut être artésienne (c'est-à-dire naturellement produite par le gisement géothermique dans le cas où le niveau piézométrique de l'aquifère est supérieur à la cote topographique du site) ou assistée par la technique « d'air lift », si la pression en tête de puits est insuffisante pour obtenir le débit de production visé.

La valeur du débit de production, lors des essais de formation (de l'ordre de 100 m³/h), est donc nettement inférieure au débit d'exploitation généralement envisagé pour le Dogger (de l'ordre de 300 à 350 m³/h).

Au stade des essais de formation, intervenant en fin d'opération de forage, cette valeur suffit, néanmoins, pour déterminer la transmissivité du réservoir et préciser le dimensionnement de la pompe d'exhaure qui peut être commandée pour l'équipement ultérieur du puits de production.

Lors de la mise en service du dispositif, le bon fonctionnement de la pompe sera contrôlé au débit maximal d'exploitation et les indices de productivité et d'injectivité des puits, jusqu'alors extrapolés, pourront être mesurés précisément par les équipements de surface. Ces mesures constitueront les indices de référence pour le suivi réglementaire de l'exploitation.

Limites de caractérisation du réservoir compte tenu des conditions des essais de formation :

Dans les secteurs où la transmissivité du Dogger est de l'ordre de 10 D.m (valeur basse pour les exploitations géothermiques au Dogger en Ile-de-France), une période de production de 12 heures à un débit de 100 m³/h permet de couvrir un rayon d'investigation autour du puits équivalant à l'écartement classique des points d'impact au réservoir des puits, au sein d'un même dispositif, de l'ordre de 1500 mètres.

Cette investigation permet donc de vérifier (lors de l'interprétation de la remontée de pression), la continuité du réservoir à l'échelle du dispositif, ce qui permet de s'affranchir de l'essai d'interférence entre puits tel qu'il était pratiqué dans les années 70-80.

Par contre, les contraintes de réalisation des essais de formation concernant l'aquifère du Dogger ne permettent pas d'identifier une éventuelle limite du réservoir (ou une forte variation de transmissivité) au-delà de ce rayon d'investigation, qui serait atteinte par le rayon d'influence plus grand de l'exploitation fonctionnant sur une durée et un débit bien plus importants.

De même, le débit de production limité lors des essais ne permet pas d'identifier la contribution réelle des niveaux producteurs dans les conditions d'exploitation à débit maximal, faussant probablement les valeurs d'épaisseur productrice et de perméabilité du réservoir, sans que la valeur de la transmissivité (produit de l'épaisseur par la perméabilité) soit remise en cause. L'erreur faite sur ces paramètres pourrait influencer dans une certaine mesure les prévisions en termes de percée thermique et par conséquent de performance énergétique du dispositif.

Gestion du risque lié aux émanations possibles de gaz H₂S :

Afin de réduire les nuisances olfactives générées sur le voisinage par les émanations possibles d'H₂S pendant la phase de production en surface d'eau géothermale provenant du Dogger (odeur « d'œufs pourris », à faible concentration dès 1 ppm) et de supprimer les risques liés à la toxicité du gaz à partir de concentrations plus élevées (100 ppm), une chaîne de neutralisation de l'H₂S, exigée dans le cadre de l'arrêté préfectoral relatif à l'autorisation d'ouverture des travaux, est mise en place (neutralisation de l'H₂S par injection d'un oxydant puissant, type Eau de Javel ou équivalent).

Des ventilateurs peuvent également être mis en place aux endroits où le fluide géothermal arrive en surface (plancher et bacs de l'appareil de forage). Cette aération constante du site pendant cette phase permet d'orienter les gaz à l'opposé des habitations les plus proches et empêche toute concentration du gaz.

Afin de contrôler les concentrations en H₂S, des capteurs sont disposés sur le site, notamment à proximité immédiate du bac déversoir et du corral. Ces capteurs sont systématiquement testés avant le début de la mise en eau du puits.

Le personnel présent sur site est informé des consignes de sécurité à respecter avant chaque phase de production d'eau géothermale (tenue régulière de « safety meeting »).

Les opérateurs travaillant sur les bassins au cours des phases de production sont équipés de masques de fuite et d'un capteur H₂S portatif. Un équipement de secours (bouteilles d'oxygène et masque de secours) est accessible et disponible en permanence sur le site.

3. Acquisition de données

La compréhension du fonctionnement du réservoir dépend de l'interprétation d'un ensemble de données de nature différente, dont l'acquisition nécessite des moyens correspondant à des équipements mis en œuvre en surface et des instrumentations descendues dans le puits jusqu'au niveau du réservoir (diagraphies).

Par rapport aux travaux réalisés dans les années 70-80, les développements informatiques permettent aujourd'hui de gérer une quantité de données beaucoup plus importante et de représenter graphiquement, à l'aide de logiciels plus ou moins spécialisés, l'évolution des paramètres permettant de donner un sens physique à ces mesures et ainsi de définir, ou d'affiner, le modèle conceptuel formalisant la compréhension du fonctionnement du réservoir.

3.1 Nature des données

Afin de renseigner de manière pertinente les bases de données partagées, les données utiles pour l'interprétation des essais de formation sont listées ci-dessous selon trois catégories. Ce canevas correspond à une proposition de présentation synthétique pouvant être renseignée dans le cadre des rapports de fin de travaux (DOE) et, plus particulièrement, de la partie relative aux essais.

Toute donnée complémentaire et toute observation utile, permettant de conserver la mémoire relative aux conditions d'acquisition des données et à leur interprétation, peuvent être ajoutées.

- **Les données du forage :**
 - Architecture du puits au niveau du réservoir :
 - diamètre et profondeurs de la phase de forage du réservoir ;
 - diamètre et profondeur du sabot du dernier tubage ;
 - mesures de déviation (inclinaison et azimuth) et profondeurs correspondantes.
 - Caractéristiques des équipements du puits au niveau du réservoir (Albien / Néocomien) : crépines (nature, hauteur, diamètre, ouverture) et massif filtrant (hauteur, granulométrie).
 - Paramètres de forage du réservoir :
 - variation de la vitesse d'avancement à paramètres de forage constants (poids sur l'outil, rotation du train de tiges, débit et pression d'injection) en fonction de la profondeur pouvant indiquer les variations de la porosité du réservoir ;
 - profondeurs et valeurs des gains ou des pertes éventuelles de fluide en cours de forage, et densité du fluide de forage (boue) correspondante, pouvant indiquer les zones perméables au sein du réservoir ;

- variation des valeurs de calcimétrie, relevées sur échantillons en cours de forage du réservoir, permettant de déterminer la profondeur des différentes unités lithologiques du Dogger.
- Descriptions lithologiques des déblais de forage (cuttings).
- **Les données des essais mesurées en surface :**
 - Historique des événements intervenus pendant toute la période des essais couvrant les opérations de développement et d'essais de formation ;
 - Représentation graphique des enregistrements continus de la pression en tête de puits, du débit et de la température de production.
- **Les données des essais mesurées au niveau du réservoir :**
 - Représentations graphiques (logs) des instrumentations réalisées dans le puits (diagraphies) permettant de visualiser les variations des propriétés physiques du réservoir et du fluide géothermal en fonction de la profondeur, avec en particulier :
 - le diamètre du trou nu permettant de localiser les variations de section du puits ;
 - la radioactivité naturelle des formations permettant de localiser les niveaux comportant une fraction plus argileuse ;
 - la porosité de la formation, qui traduit la proportion des vides au sein de la matrice solide de la roche, à l'intérieur desquels le fluide est contenu et peut circuler si ces vides sont bien connectés (perméabilité) ;
 - les profils de pression et de température du fluide ;
 - la débitmétrie (ou flowmétrie) qui traduit le positionnement et l'épaisseur des niveaux perméables au sein du réservoir au travers desquels le fluide circule (transmissivité).

Dans l'intérêt général, compte tenu du coût des diagraphies et du risque opérationnel pour ce type d'instrumentation dans les puits, il est convenu, au sein de la filière, que les données brutes (fichiers ASCII) soient transmises au Maître d'Ouvrage en même temps que le rapport de fin de travaux (DOE), afin de garantir l'archivage de ces données et d'en permettre une utilisation ultérieure.

3.2 Moyens d'acquisition

3.2.1 Les équipements de surface

La mise en place de la ligne de test est assurée par l'entreprise de forage. Elle comprend, *a minima*, les canalisations, les vannes de fermeture et de régulation, et le bac déversoir.

Le **bac déversoir** permet de contrôler manuellement les valeurs du débit de production en mesurant la hauteur d'eau à la sortie du bac en forme de V. La norme AFNOR X.10.311 définit les dimensions caractéristiques requises du bac déversoir.

Dans le cas d'un fluide géothermal non dégazant et peu chargé en particules, un ou plusieurs débitmètres peuvent également être utilisés sur la ligne de rejet.

La **vanne de régulation**, positionnée en amont du bac déversoir, permet de fixer les paliers de débit lors des tests par paliers (Cf. Note technique 081 relative à la qualité des opérations de développement), mais également de limiter le débit de production à une valeur permettant de respecter les conditions de rejet des eaux d'essai, ou de ne pas dépasser la capacité maximale du bac déversoir (overflow).

Dans le cas où le débit de production doit être bridé, la contre-pression exercée par la vanne de régulation, mesurable en tête de puits, est enregistrée et conservée pour que la valeur du débit de production soit représentative.

A l'inverse, en cas de production artésienne insuffisante, le débit de production peut être artificiellement augmenté par la mise en œuvre de la technique d'air-lift. Celle-ci consiste à injecter de l'air dans le puits afin d'alléger la colonne de fluide et ainsi permettre au gisement de débiter jusqu'en surface. Dans ce cas, la profondeur d'injection d'air par l'intermédiaire du train de tiges descendu dans le puits, et la contre-pression appliquée à la sortie du compresseur, qui permet de réguler le débit de production, sont enregistrés et conservés.

Les **équipements de surface** visant à acquérir les données des essais correspondent à des capteurs, dont la mise en place est assurée par un technicien qui suit les consignes transmises par le responsable des essais.

L'instrumentation des essais en surface a pour objectif l'enregistrement en continu :

- du débit mesuré au bac déversoir par un capteur de niveau ;
- de la température en tête de puits, mesurée sur la ligne d'essai ou dans le bac déversoir, qui permet de contrôler la stabilité de ce paramètre au cours des essais en fonction de la valeur du débit de production ;
- de la pression en tête de puits par un capteur positionné en amont de la vanne de régulation, sur la ligne d'essai ou au niveau du Choke Manifold, afin de contrôler la pression lorsque le puits est fermé et de mesurer la contre-pression exercée par la vanne de régulation lorsque le débit de production est bridé.

La photographie ci-dessous présente un exemple d'équipement de la ligne d'essai et du bac déversoir.

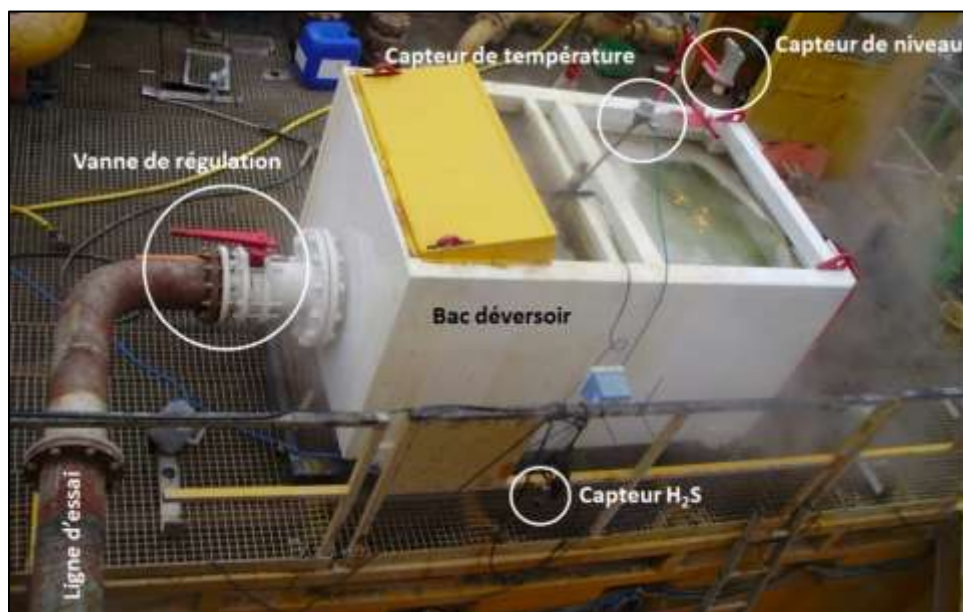


Figure 2 : Exemple d'équipement de la ligne d'essai et du bac déversoir

Les capteurs utilisés apportent une précision (généralement au centième) et une fréquence d'acquisition (généralement à la seconde) suffisantes pour les essais qui permettent de contrôler l'atteinte des niveaux de stabilisation des paramètres mesurés à chaque modification du débit de production pour régulation.

L'ensemble des capteurs est relié à une centrale d'acquisition disposée sur le site qui permet l'enregistrement des données et le monitoring des essais en suivant l'évolution des paramètres du test. La centrale d'acquisition étant déportée par rapport au bac déversoir et aux émanations éventuelles de gaz, ceci réduit les risques d'exposition pour le personnel en charge du suivi du test.

Ce dispositif fiable et sécurisé permet de suivre l'ensemble des opérations de développement et d'essais de formation, depuis les phases de dégorgement faisant suite à la stimulation du réservoir (essais par palier) et la phase de production finale.

En fin de phase de production, l'opérateur procède à la prise d'échantillons en surface, au niveau du bac déversoir, afin de caractériser le fluide géothermal d'un point de vue géochimique.

3.2.2 Les diagraphies de réservoir

Une société spécialisée est en charge de la réalisation des diagraphies, en particulier pour celles concernant le réservoir. Par l'intermédiaire d'outils spécifiques descendus au câble dans le puits, l'entreprise procède à la mesure et à l'enregistrement des caractéristiques physiques du réservoir en fonction de la profondeur.

Selon les outils utilisés, les instrumentations peuvent être combinées dans un ou plusieurs passages (« runs »).

Ces opérations sont menées après la phase de forage proprement dite, d'où le terme de diagraphies différées. Ces diagraphies présentent un risque opérationnel moins élevé que des diagraphies dites instantanées, pour lesquelles certaines instrumentations peuvent être incorporées au train de tiges, juste au-dessus du trépan et ainsi donner une information en temps réel. Outre leur coût supérieur, le principal inconvénient est qu'en cas de coincement de la garniture de forage, les outils peuvent être perdus dans le puits.

Un ingénieur hydrogéologue assure le suivi de l'acquisition des données ainsi que l'interprétation.

Les diagraphies de réservoir sont généralement menées en deux temps distincts :

- **avant la mise en eau du puits**, celui-ci étant encore rempli du fluide de forage (boue), et concerne, *a minima*, les instrumentations suivantes :
 - la radioactivité naturelle de la formation (« Gamma-Ray » – GR) ;
 - le diamètre du trou nu (« Caliper ») ;
 - la porosité de la formation.
- **pendant la phase de production** de l'essai de formation (le puits est alors en eau) dont la durée (plus longue que celle des essais par paliers) permet de réaliser :
 - les profils de pression et de température ;
 - la débitmétrie (ou flowmétrie).

Quelques heures avant la fin de la phase de production (ou fermeture du puits), la sonde de pression et de température est positionnée au toit du réservoir (généralement en sécurité à 10 mètres au-dessus du sabot du dernier tubage) pour commencer l'enregistrement en continu

de la pression du réservoir, qui va couvrir la fin de phase de production et toute la remontée de pression.

La débit-métrie (ou flow-métrie) consiste à mesurer le flux d'eau circulant à travers la section du forage depuis le toit du réservoir (où le débit est maximal) jusqu'en bas du forage (où le débit est nul). De cette manière, le débit provenant de chaque niveau producteur se soustrait au débit total au fur et à mesure que l'outil passe en dessous d'un niveau producteur.

Cette instrumentation permet donc d'identifier le positionnement des niveaux producteurs et de mesurer la contribution de chaque niveau au débit total.

L'outil (flow-mètre) est constitué d'un micro-moulinet dont la rotation de l'hélice croît de manière proportionnelle à la vitesse de circulation ascendante du fluide dans le puits.



Figure 3 : Exemple de flowmètre utilisé pour la mesure du débit dans le puits

Cette mesure est donc extrêmement sensible à la section du puits (la vitesse de circulation du fluide est ralentie dans une section plus grande) et à la vitesse de descente de l'outil qui peut elle-même être influencée par l'inclinaison du puits (ralentissement ou accélération de la descente de l'outil).

En pratique, plusieurs passages sont nécessaires afin de déterminer la meilleure vitesse d'acquisition permettant une lecture cohérente du signal et son interprétation.

4. Interprétation des essais

L'interprétation des essais de formation est confiée à un ingénieur hydrogéologue.

Elle peut être décomposée en deux phases :

- une première phase consistant à interpréter la flow-métrie pour déterminer l'épaisseur productrice du réservoir ;
- une seconde phase qui consiste à interpréter le test de remontée de pression pour déterminer la caractéristique hydrodynamique principale du réservoir (transmissivité) et la qualité du développement du puits (facteur de skin) au stade final des travaux de forage.

4.1 Interprétation des données de forage et d'essais

Le tableau ci-dessous montre un exemple de présentation synthétique des données relatives aux épaisseurs calculées pour 8 niveaux producteurs identifiés dans cet exemple, correspondant à un puits ayant atteint le réservoir du Dogger et dont l'épaisseur verticale cumulée atteint 9 mètres.

Niveau	Longueur forée		Profondeur verticale		Epaisseur		Contribution	Porosité	Température
	Toit	Mur	Toit	Mur	Déviée	Verticale	%	%	°C
1	1776.2	1777.9	1519.16	1520.42	1.7	1.3	4.9	9.75	62.800
2	1796.5	1799.2	1534.1	1536.07	2.7	2.0	9.8	10.5	62.815
3	1805.8	1807.5	1540.8	1541.89	1.7	1.1	24.6	13.8	62.87
4	1811.9	1814.4	1545.3	1547.11	2.5	1.8	21.3	16.1	62.95
5	1823.4	1824.5	1553.59	1554.38	1.1	0.8	4.9	15	63.05
6	1826	1826.8	1555.45	1556.31	0.8	0.86	9.8	5.9	63.08
7	1829.3	1830.3	1557.82	1558.54	1	0.72	19.7	15.4	63.09
8	1837.2	1837.7	1563.44	1563.95	0.5	0.51	4.9	8.8	63.1
				Total	12	9.0	100	Moyenne / Contribution	
								13.1	

Tableau 1 : Exemple de présentation synthétique des épaisseurs des niveaux producteurs (Dogger)

Cette première étape est le résultat de l'analyse de l'ensemble des données collectées en cours de forage (observation des cuttings, variation des paramètres de forage et des indices de porosité et de perméabilité) et de manière différée lors des diagraphies du réservoir.

L'ensemble de ces données peut être représenté graphiquement sous la forme d'un document synthétique (« Masterlog »), dont un exemple est présenté ci-dessous.

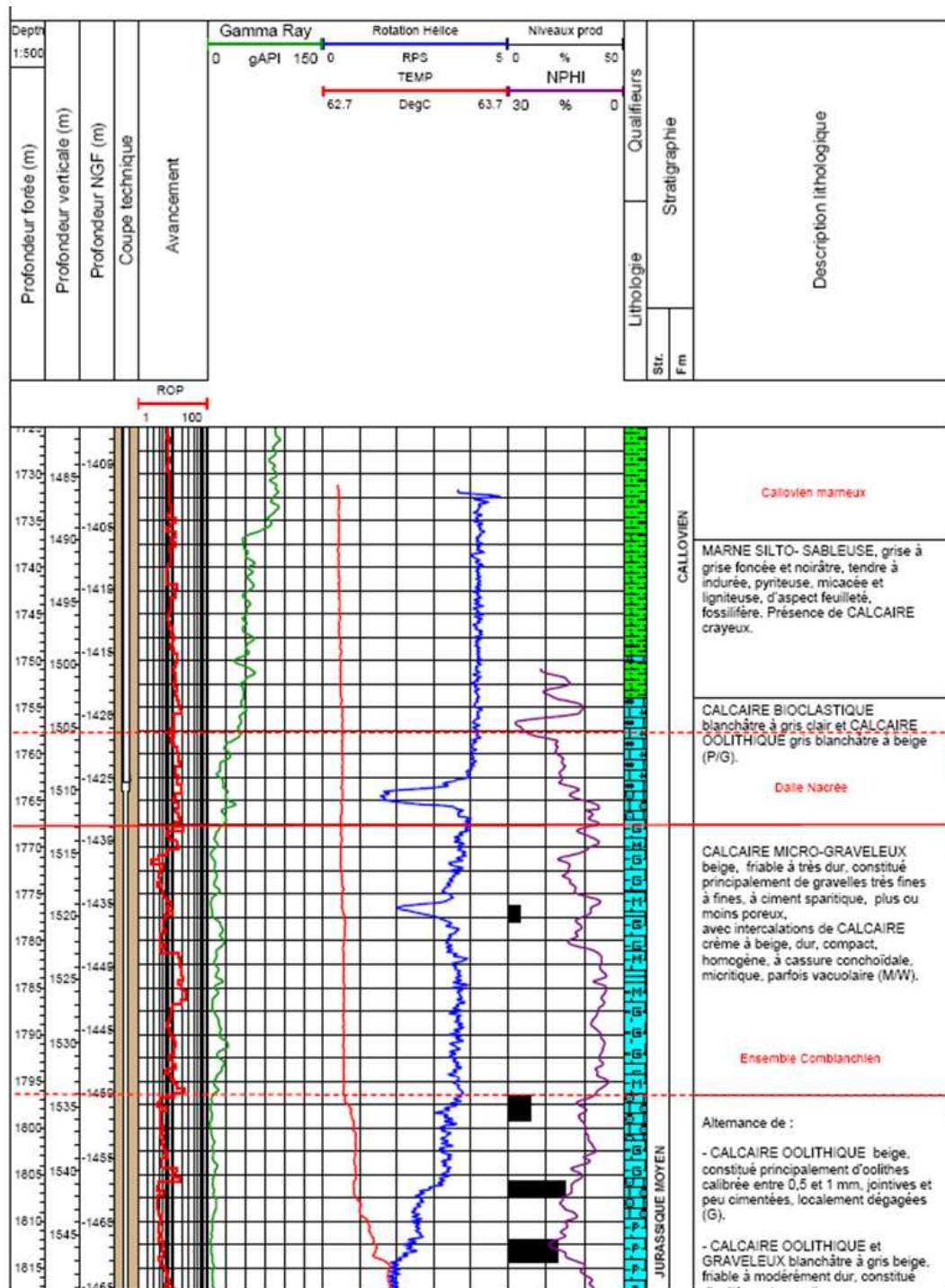


Figure 4 : Exemple de représentation graphique de l'ensemble des données collectées au niveau du réservoir (Dogger)

Ce type de document synthétique permet de comprendre l'interprétation, qui est faite à partir des données de forage (architecture du puits, avancement, lithologie) et des diagraphies (Gamma-Ray, température, porosité, flowmétrique), et qui conduit au modèle conceptuel correspondant au fonctionnement du réservoir.

4.2 Interprétation du test de remontée de pression

L'interprétation du test de remontée de pression correspond à l'étape finale des essais de formation.

Il vise principalement à **déterminer la transmissivité du réservoir**, caractéristique hydrogéologique fondamentale, qui se traduit physiquement par la capacité du réservoir à transmettre le fluide qu'il contient et qui correspond mathématiquement au produit de la perméabilité par l'épaisseur du réservoir.

Selon les aquifères considérés et les usages consacrés, l'unité de la transmissivité s'exprime différemment :

- en mètre carré par seconde (m^2/s) pour l'Albien / Néocomien, suivant le système classiquement utilisé dans le domaine de l'hydrogéologie ;
- en Darcy*mètre (D.m) pour l'aquifère du Dogger, suivant le système classiquement utilisé dans le domaine pétrolier où la viscosité du fluide est prise en compte.

L'interprétation du test de remontée de pression permet également de caractériser le développement du puits, ou facteur de « skin » (Cf. Fiche technique 081), qui se manifeste dans les tous premiers temps de la remontée de pression, ainsi que les limites éventuelles du réservoir qui s'observent dans les derniers temps de la remontée de pression.

Les méthodes d'interprétation du test de remontée de pression ont évolué au cours des dernières décennies avec le développement des capacités informatiques.

Les opérateurs ont désormais la possibilité de disposer, sur site, de logiciels spécialisés pour l'interprétation des essais hydrogéologiques, permettant de procéder à des interprétations graphiques extrêmement rapides par superposition de modèles de réservoir préexistants.

Les outils les plus récents permettent d'appliquer la méthode dite « des dérivées de pression » développée par Bourdet dans les années 80, qui permet de prendre en compte des débits de production variables au cours des essais et des géométries de réservoir complexes.

La figure suivante représente une interprétation d'un essai de formation concernant le réservoir du Dogger faite à l'aide d'un logiciel permettant d'utiliser cette méthode.

Les méthodes plus anciennes comme la solution de Theis (1935) et ses dérivés (Cooper-Jacob, 1946), classiquement utilisées en hydrogéologie, ou celle de Horner, utilisée notamment pour les interprétations concernant l'aquifère du Dogger dans les années 70-80, offrent moins de flexibilité par rapport au déroulement du test (nécessité d'un débit constant, par exemple) et moins de finesse et d'efficacité dans l'analyse. Elles restent, néanmoins, valables à partir du moment où elles sont appliquées de manière cohérente par rapport aux caractéristiques physiques du réservoir géothermal et à son fonctionnement.

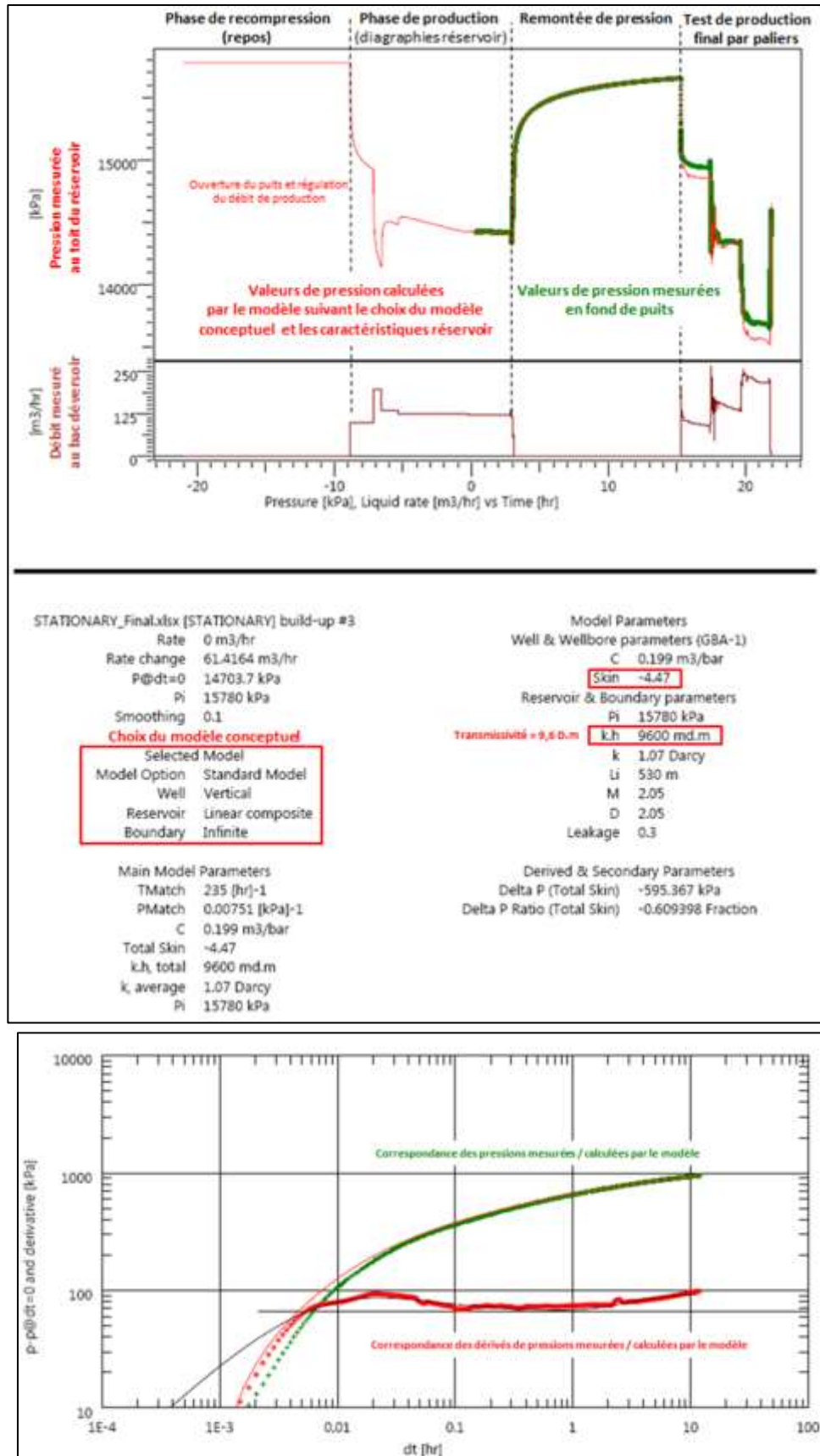


Figure 5 : Exemple d'une interprétation d'un test de remontée de pression réalisée en appliquant la méthode des dérivés de pression à l'aide d'un logiciel spécialisé

Annexe 9

Exploitation



Août 2017

FICHE TECHNIQUE N°090

CONDITIONS D'EXPLOITATION DES INSTALLATIONS GEOTHERMIQUES AU DOGGER

Outre les normes et réglementation en vigueur dans les permis d'exploitation, le respect des conditions d'exploitation des puits et des caractéristiques nominales des équipements associés doit permettre d'assurer la longévité des installations géothermales. Les contraintes physiques et chimiques liées à l'exploitation du fluide géothermal s'appliquent principalement sur les puits, les équipements de pompage, les conduites et robinetterie, et les échangeurs de chaleur.

Cette fiche aborde uniquement les modes d'exploitation et les conditions d'exploitation des puits producteur et injecteur.

1. Contraintes d'exploitation liées au débit d'exploitation

Un des paramètres ayant une influence majeure sur la longévité d'une installation géothermique est le débit d'exploitation. La chronique d'exploitation annuelle d'un doublet se compose en effet de trois périodes :

- la période de saison de chauffe (novembre à mars) où le débit géothermal moyen est le plus élevé (80 à 100 % du débit nominal de l'installation) ;
- la période de mi-saison (avril et octobre) où le débit est variable en fonction des amplitudes de températures (30 à 100 %) ;
- la période estivale (mi-mai à septembre) où le débit est en règle générale le plus faible (production d'ECS seule) sauf sur certains réseaux de chaleur de grande taille. Ce fonctionnement à débit réduit et donc à faible vitesse de circulation représente environ 4 à 5 000 heures annuelles de fonctionnement de l'installation.

La vitesse du fluide géothermal dans les cuvelages et les installations de surface est directement liée au débit d'exploitation et à la section des tubages et conduites. **La vitesse de circulation de l'eau géothermale au contact de l'acier des tubages et conduites est un paramètre qui conditionne de façon importante les phénomènes de corrosion-dépôts se produisant à la surface de l'acier.** L'augmentation de la vitesse de circulation de l'eau, à la surface de l'acier, se traduit par une augmentation de la vitesse de corrosion qui n'est pas linéaire en fonction de la valeur de la vitesse du fluide. Il faut atteindre une vitesse de circulation de plus de 8 m/s pour avoir des phénomènes de corrosion-érosion qui sont amplifiés par les matières en suspension éventuellement présentes dans le fluide. Concernant l'effet de cette vitesse sur les dépôts présents à la surface de l'acier, son augmentation induit un phénomène abrasif vis-à-vis des dépôts alors que sa diminution favorise au contraire la formation de dépôts conduisant à un encrassement prématuré des cuvelages, conduites et échangeurs par phénomènes de dépôts de sulfures de fer. Ces dépôts entraînent une augmentation des pertes de charges linéaires dans les conduites ou singulières dans les équipements. Ils induisent également un risque accru de corrosion sous dépôts liée à l'activité des bactéries sulfurogènes présentes dans l'eau géothermale.

Des relevés d'épaisseur minimale de cuvelage, d'après les diagraphies de contrôle réglementaire, ont permis d'établir une relation entre la corrosion (variation d'épaisseur négative) ou l'encroûtement (variation d'épaisseur positive), et les vitesses minimales du fluide à travers les tubages.

Sur la base de ces relevés, le fluide géothermal au contact d'un cuvelage ne devrait pas circuler à une vitesse inférieure à environ 1,2 m/s. Afin d'ajouter une marge de sécurité, il est suggéré un régime de fonctionnement idéal supérieur ou égal à 1,5 m/s. Limiter le régime de fonctionnement à 1 m/s permet, cependant, de maintenir à un niveau acceptable le développement des désordres sur l'installation. **La plage de vitesse préconisée dans les installations géothermales devrait se situer dans une fourchette de 1 à 1,5 m/s.**

Diamètre (pouce)	Rayon (mm)	Vitesse (m/s)	Débit (m ³ /h)	Vitesse (m/s)	Débit (m ³ /h)
5" 18#	54.30	1	33	1.5	50
7" 26#	79.70	1	72	1.5	108
7"5/8 33.7#	87.32	1	86	1.5	129
9"5/8 47#	110.25	1	137	1.5	206
10"3/4 51#	125.10	1	177	1.5	265
13"3/8 68#	157.65	1	281	1.5	422

Tableau 1 : Vitesses et débits minimaux en fonction des rayons internes des tubages

Le maintien d'un débit minimal en exploitation permet de limiter les phénomènes de dépôts et de corrosion, excepté sur les chambres de pompage en 10"3/4 et 13"3/8 où les seuils minimaux de vitesse seront difficilement atteignables (cf. Tableau 1).

2. Contraintes d'exploitation liées à la température de réinjection

La température minimale de réinjection influe sur les risques de précipitation, mais aussi de dissolution de minéraux, qui diffèrent selon qu'on s'intéresse au réseau de surface ou au

réservoir. Le refroidissement du fluide géothermal au sein des échangeurs thermiques peut entraîner des risques de précipitation / dépôt en surface, par exemple, au sein des échangeurs et des groupes de pompage, mais aussi dans le puits injecteur, le proche puits et le réservoir

En raison de la fluctuation de la demande de chaleur sur les réseaux (saison hivernale et saison estivale) et la température d'exhaure, les variations de la température d'injection peuvent être importantes modifiant les conditions de précipitation/dissolution des espèces minérales. L'adjonction de PAC sur un certain nombre d'installations nouvelles ou réhabilitées induit une réinjection à des températures plus faibles que celles observées usuellement (minimales de 20-25°C).

D'après le suivi de l'injectivité des ouvrages, depuis leur mise en exploitation dans les années 80, les résultats montrent que la température de réinjection dans une fourchette de 35 à 55°C ne dégrade pas les caractéristiques de la ressource.

Une étude spécifique menée par le BRGM (rapport BRGM/RP-67061-FR) a évalué par modélisation quel pouvait être l'impact thermo-hydro-chimique (THC) et thermomécanique (TM) pour différentes températures de réinjection du fluide (entre 15 et 45°C) sur la base d'une température moyenne initiale de 70°C et pour un débit moyen de réinjection de 250 m³/h.

2.1 Contraintes thermo-hydro-chimiques

Les résultats présentés sont issus des calculs thermo-hydro-chimiques réalisés à l'aide du logiciel MARTHE-REACT (code de calcul MARTHE pour l'hydrodynamique et le transport de masse et de chaleur développé au BRGM, couplé aux modules géochimiques du code de calcul TOUGHREACT développé par le LBNL de Berkeley).

L'altération maximum observée des deux principaux minéraux constituant les calcaires du Dogger (calcite et dolomite), du fait de la réactivité géochimique du fluide, sont de 1 m pour la calcite et 50 m de distance au puits pour la dolomite, au bout de 30 années d'exploitation. Le profil d'altération des carbonates est peu sensible à la température pour les températures de réinjection comprises entre 25 et 15°C, et par conséquent, il en va de même pour l'impact sur la porosité du milieu. Cette faible différence sur les impacts entre 25°C et 15°C s'explique, notamment, par l'altération de l'albite (feldspath), qui est beaucoup plus importante à 15°C, et qui favorise la stabilité des minéraux carbonatés (i.e. calcite et dolomite), du fait de l'augmentation du pH du fluide.

La porosité du milieu est impactée sur une distance entre 50 m (à 45 °C) et 200 m (à 15°C) du puits. Cela se traduit par une augmentation de la porosité sur les 5 premiers mètres (accroissement de la porosité supérieur à 400%) et une diminution de la porosité de l'ordre de 20%, au maximum, entre 5 et 50 à 200 m, suivant la température du fluide réinjecté.

La modification de la porosité induit une modification de la perméabilité intrinsèque du milieu : cette dernière est augmentée au proche puits (< 5 m) où l'on observe la dissolution des carbonates (majoritairement la calcite) et, au contraire, est diminuée ensuite, du fait de la ré-précipitation de la calcite et de la dolomite (au maximum sur 200 m pour une température de réinjection de 15°C) et va, de fait, impacter les pressions du fluide au proche puits et dans le réservoir. **Cette modification des pressions est, néanmoins, limitée dans le temps et l'espace.** Elle se traduit par une réduction de la pression d'injection au proche puits entre 5 et 10 bar, au maximum. Inversement, au-delà de 1 m du puits, la pression est accrue (maximum de 8 bar à environ 5 m de distance du puits d'injection), puis le profil de pression n'est pas modifié au-delà de 50 à 200 m du puits, selon la température de réinjection.

2.2 Contraintes thermo-mécaniques

Les potentialités d'endommagement de la roche et d'initiations de fissures à partir du puits, liées au chargement thermique couplé au chargement mécanique que représente la surpression hydraulique dans le puits, ont été analysées par approche numérique (approche particulière). En plus des aspects thermiques et mécaniques liés à la réinjection du fluide, l'approche proposée prend en compte l'endommagement préalable de la roche proche du puits associé aux opérations de foration.

Pour la foration, il est considéré l'hypothèse d'un poids de la colonne de boue suffisant pour équilibrer la pression interstitielle. Cette situation ne permet pas d'équilibrer la totalité des contraintes normales dans le puits et apparaît donc comme plutôt défavorable lors du forage, tout en évitant un à-coup de pression (kick), lié à une pression interstitielle de la formation plus élevée que celle engendrée par la boue. En fonction de l'état des contraintes, et notamment de la valeur du déviateur, une ovalisation plus ou moins importante apparaît. Ce phénomène de « breakout » est associé au surcreusement du puits sur une profondeur de 3,5 cm dans le cas du plus faible déviateur ($\sigma_H/\sigma_h=1,5$), et à un endommagement de la roche particulièrement important et au-delà d'une distance de 1 m du puits (limites du modèle), dans le cas du plus fort déviateur ($\sigma_H/\sigma_h=2$).

Au-delà des ruptures engendrant un agrandissement local du diamètre du puits, des ruptures inter-granulaires plus diffuses apparaissent dans la matrice rocheuse. Celles-ci sont à l'origine d'un affaiblissement des propriétés mécaniques du massif rocheux sur plusieurs dizaines de centimètres des bordures du puits et probablement également d'une augmentation de la porosité (non quantifiable par la méthode utilisée).

L'application d'une surpression dans le puits, comprise entre 1 MPa et 3,5 MPa, n'a que peu d'incidence sur l'état de la roche autour du puits : seules quelques ruptures dans les zones pré-endommagées par la foration sont constatées. Elles représentent un accroissement du nombre de ruptures inférieur à 2%. Les surpressions appliquées sont, en effet, très éloignées des pressions nécessaires à l'ouverture de fractures préexistantes ou à la création de nouvelles fractures (breakdown). Cette surpression dans le puits aura plutôt tendance à stabiliser celui-ci en éloignant la pression dans le puits de la pression limite du « kick » et en reprenant une partie des contraintes normales dans le puits.

Au cours de la sollicitation thermique (gradient maximal de 60°C), et à court terme (quelques minutes), des ruptures continuent à apparaître dans la zone pré-endommagée par la foration, aggravant ainsi l'endommagement de cette zone. Leur nombre reste, cependant, très faible au regard du nombre de ruptures engendrées par la foration. Le taux de rupture est d'autant plus faible que la surpression dans le puits est élevée, celle-ci assurant une diminution du déséquilibre liée au creusement du puits.

Les résultats indiquent, dans la limite des hypothèses considérées, **que la sollicitation thermo-mécanique induit un faible endommagement de la roche dans la zone déjà perturbée par la foration**. La foration apparaît donc être l'élément principal de la dégradation de la roche autour du puits, et ce, d'autant plus que le déviateur des contraintes est important. **Les modèles présentés ne permettent, néanmoins, pas de conclure quant à la dégradation de la roche, à moyen et long terme, induite par la propagation du gradient thermique.**

3. Contraintes d'exploitation liées à la pression de point de bulle

3.1 Exploitation équipée d'un groupe électropompe immergé (GEI)

La pression de point de bulle est la pression en-dessous de laquelle il y a séparation de phase entre le liquide et les gaz dissous. Tout dégazage de l'eau géothermale peut induire des

phénomènes de corrosion et de dépôts (formation de carbonates notamment), au niveau des tubages et des équipements de la boucle géothermale.

Le maintien d'une pression, en tout point de l'installation (du puits d'exhaure au puits de réinjection), supérieure à la pression de point de bulle, permet de limiter ce risque. En conséquence, toute perte d'étanchéité de la boucle nécessite une réparation dans les plus brefs délais.

Cette pression de point de bulle, qui est la somme des pressions partielles des gaz dissous dans l'eau géothermale, doit être déterminée à une fréquence minimale annuelle. Le principe de la mesure est de faire circuler l'eau géothermale dans une cellule et de baisser la pression dans cette dernière jusqu'à l'apparition des premières bulles de gaz. La pression correspondant à l'apparition de ces dernières correspond à la pression de « point de bulle ».

3.2 Exploitation en artésien

Moins d'une dizaine d'opérations géothermiques au Dogger fonctionnent ou ont fonctionné avec un mode d'exploitation en artésien sans groupe de pompage immergé.

Les forages exploités en mode artésien sont soumis aux mêmes contraintes d'exploitation que les forages exploités par groupe de pompage, à savoir principalement celles liées à la vitesse de circulation du fluide dans les tubages. Le débit artésien du puits étant contrôlé par la pression en tête du puits et les diamètres des tubages, la distinction peut être faite entre les puits artésiens à fort débit de production et ceux à faible débit.

Dans le cas des puits à faible débit artésien, inférieur à 100 m³/h (généralement puits avec des tubages de diamètre 7" et 5" et une faible pression artésienne), la vitesse de circulation de l'eau dans les tubages est réduite, ce qui engendre un encrassement beaucoup plus rapide des tubages.

En revanche, dans le cas des puits avec un débit artésien suffisamment élevé (supérieur à 130 m³/h), la vitesse de circulation peut être proche de la vitesse limite minimale indiquée dans le tableau 1, réduisant le risque de corrosion et de formation de dépôts sur le tubage. Pour s'affranchir de ces risques, l'utilisation de tubages en matériaux composites est recommandée (cas du puits PM4 à Melun l'Almont).

Outre la vitesse de circulation de l'eau, l'exploitation du puits en mode artésien ne permet pas de conserver une pression supérieure à la pression de point de bulle sur toute la hauteur du puits. Il convient donc de positionner dans des puits en acier, une colonne de production à une profondeur suffisante pour permettre le dégazage du fluide dans la colonne de production, lors de la remontée vers la surface. Cela ne permet toutefois pas de s'affranchir de la formation de dépôts carbonatés dans la zone où la pression atteint la pression de point de bulle du fluide.

4. Contraintes d'exploitation liées aux risques de corrosion/dépôts

Suite aux premiers retours d'expérience des années 1990 sur les installations géothermales exploitant le Dogger du Bassin parisien, un traitement chimique anti-corrosion a été progressivement généralisé sur l'ensemble des installations. La mise en place d'un suivi de ce traitement est imposée par le permis d'exploitation. Le traitement doit être continu et régulier pour assurer une efficacité optimale.

L'efficacité du traitement chimique contre les phénomènes de corrosion doit par ailleurs être suivie via des mesures de la vitesse de corrosion qui s'effectuent par différentes méthodes (méthode gravimétrique sur coupons, méthode électrochimique via la mise en place d'une sonde à résistance de polarisation linéaire, méthode chimique à partir du taux de fer présent dans l'eau géothermale).

En outre, les autres indicateurs listés ci-dessous permettent d'apprécier l'efficacité du traitement chimique mis en place :

- fréquence de nettoyage des filtres par les exploitants ;
- fréquence de nettoyage des échangeurs à plaque ;
- fréquence d'entretien et de remplacement de la robinetterie et des conduites de la boucle géothermale (les dépôts provoquant une perte d'étanchéité des vannes, un bouchage des piquages, une corrosion sous dépôts dans les bras mort) ;
- présence de dépôts sur les coupons de corrosion (examen visuel qualitatif) ;
- état des équipements de pompage et de la colonne d'exhaure lors d'une manœuvre de remplacement ;
- diagraphie CIT 40 bras sur les puits lors des inspections réglementaires (mesure de l'épaisseur des dépôts).

Toute augmentation des paramètres indicateurs de la corrosion (teneur en fer, vitesse de corrosion) et/ou toute dégradation des paramètres hydrodynamiques des puits ou augmentation des pertes de charge des échangeurs et filtres doit immédiatement alerter l'exploitant. Il convient alors, dans ce cas, de réaliser un audit complet de la boucle géothermale afin d'identifier l'origine de la dégradation et de prendre rapidement les mesures qui s'imposent (adaptation de conditions d'exploitations, modification de la concentration en produit chimique injecté, remplacement d'un équipement, etc...).

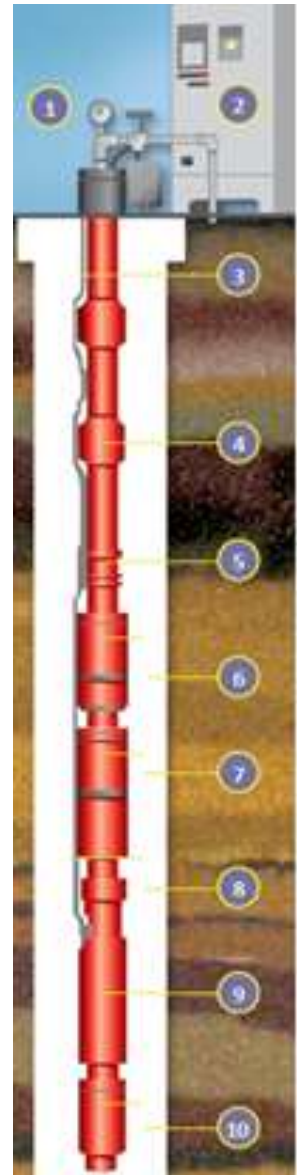
5. Contraintes d'exploitation liées aux groupes de pompage

Les groupes de pompage utilisés actuellement en géothermie basse énergie sont issus de l'industrie pétrolière. Ce choix d'équipements robustes vise une durée de fonctionnement d'environ cinq ans (période entre deux diagraphies réglementaires) et s'explique également par les contraintes liées aux caractéristiques de la ressource du Dogger à savoir:

- rabattement impliquant une profondeur d'immersion dans les puits entre 100 à 350 m ;
- température du fluide géothermal entre 50 et 85 °C ;
- salinité de l'eau géothermale (10 à 40 g/L) ;
- présence de gaz (CO₂, H₂S), de particules, de débris et de bactéries (BSR, BTR) dans le fluide géothermal.

Les groupes de pompage sont constitués des éléments suivants :

- ❶ - bride de suspension
- ❷ - variateur de fréquence
- ❸ - câble électrique de puissance H.T
- ❹ - colonne de production
- ❺ - clapet
- ❻ - hydraulique multi-étages
- ❼ - dispositif d'étanchéité (Protecteurs)
- ❽ - accouplement moteur
- ❾ - moteur électrique
- ❿ - système de monitoring



Le fonctionnement du groupe de pompage à débit variable est assuré par un dispositif d'alimentation électrique de surface composé, en règle générale, d'un variateur de fréquence basse tension et d'un transformateur élévateur de tension. Le système de régulation et d'automatisme du groupe de pompage doit être configuré pour assurer la protection électrique du moteur et respecter les plages de fonctionnement des équipements hydrauliques.

5.1 Profondeur d'installation

La première contrainte concerne la profondeur d'installation du groupe de pompage immergé. La crépine d'aspiration des pompes d'exhaure doit être positionnée à une profondeur correspondant au rabattement maximal attendu auquel sont ajoutés :

- une hauteur correspondant à la pression du poids de bulle de l'eau géothermale (en mCE) afin d'éviter son dégazage au niveau de la pompe ;
- une hauteur liée au NPSH requis par le constructeur de la pompe (pression minimale à l'entrée de la pompe avant la création d'un phénomène de cavitation) ;
- une hauteur de sécurité correspondant à la dégradation attendue du rabattement.

Par exemple, pour un puits produisant un débit géothermal maximum de 300 m³/h, avec un rabattement de 150 m, et un point de bulle de 8 bar relatif (80 mCE), la profondeur d'immersion de la crépine d'une hydraulique (NPSH requis par le constructeur de 30 mCe) devra être, au minimum, de 260 m. Une marge de sécurité pour tenir compte de la dégradation des puits "gros diamètre" de 20 m sera ajoutée et 40 m pour les puits "petit diamètre".

5.2 Refroidissement du moteur submersible

Le refroidissement du moteur électrique du groupe de pompage immergé est assuré par la circulation de l'eau géothermale le long de son enveloppe extérieure. La température de l'eau et, principalement, le débit géothermal, conditionnent la qualité du refroidissement interne du moteur. En règle générale, l'exploitant devra veiller à maintenir un débit minimum supérieur à 60 m³/h pour assurer un refroidissement correct du moteur de sorte que la température interne du moteur ne dépasse pas 180°C.

5.3 Plage de fonctionnement du groupe de pompage

Compte tenu de la technologie des groupes de pompage, il est indispensable de respecter les plages de fonctionnement suivantes :

- plage de température et débit pour le refroidissement du moteur (cf. ci-dessus) ;
- plage de fréquence de rotation des équipements (généralement entre 30 et 65 Hz) ;
- plage de débit et de HMT selon les courbes caractéristiques de l'hydraulique du constructeur.

5.4 Alimentation électrique du groupe de pompage

L'utilisation d'un variateur de fréquence associé à un transformateur élévateur pour alimenter les groupes de pompage permet d'ajuster la production géothermale du doublet en fonction des besoins thermiques du réseau. L'usage d'un variateur permet également un démarrage du groupe de pompage sans surpression, dans les installations de surface, notamment pour les puits ayant une forte pression artésienne (supérieure à 8 bar). Le choix de la technologie du variateur doit s'orienter sur des équipements permettant de délivrer des grandeurs électriques "propres" (limitation des harmoniques par utilisation systématique de filtre sinus, choix du découpage, etc.).

En coordination avec le constructeur, le variateur doit être également configuré pour permettre de protéger le moteur (butée courant et fréquence selon les paramètres électriques nominaux du moteur, rampe de démarrage et de régulation du débit, temporisation entre chaque arrêt/démarrage, etc.)

5.5 Défaillances des éléments du groupe de pompage

En cas de défaillance prématurée du groupe de pompage, il convient de réaliser une expertise pour connaître la cause et préconiser les actions correctives.

Principaux dysfonctionnements électriques :

- défaut d'isolement du moteur, du câble ou de la prise moteur par un défaut de l'étanchéité à l'eau géothermale (perte d'étanchéité des protecteurs, corrosion perforante des enveloppes en acier, endommagement de la gaine de protection du câble électrique, etc...) ;
- court-circuit du moteur électrique par vieillissement ou stress électrique des isolants lié à la qualité de l'alimentation électrique.

Principaux dysfonctionnements mécaniques :

- rupture de l'arbre ou d'un des éléments par vibrations, fatigue ou contrainte mécanique ;
- blocage ou détérioration des performances de l'hydraulique par la corrosion, les dépôts (scaling) et les débris (nécessité d'une crépine à l'aspiration des ouïes de l'hydraulique) ;
- usure prématurée des butées et des paliers par non-respect des plages de fonctionnement préconisées par le constructeur.

6. Conditions d'exploitation spécifiques d'un triplet

Par rapport à une exploitation en doublet classique, la principale différence de l'exploitation en triplet se situe au niveau du débit de réinjection dans les deux puits.

Un doublet classique fonctionne avec un seul puits de réinjection. Le débit d'exhaure est donc intégralement réinjecté dans le puits de réinjection, la pression de réinjection s'adaptant au débit.

Pour un triplet, les deux puits de réinjection fonctionnent en parallèle, à partir d'une seule pompe de réinjection. Sans intervention, le débit de réinjection dans chaque puits est régulé automatiquement afin d'équilibrer les pressions en tête de chaque puits. Toutefois, suite aux différences de géométrie de puits (longueur et diamètre des tubages) et de caractéristiques du réservoir, les pertes de charges dans chaque puits, à un débit donné, sont légèrement différentes. Le débit transitant dans chaque puits s'adapte aux conditions du puits de réinjection afin de minimiser la pression de réinjection.

Le débit de réinjection, dans chaque puits, doit donc être régulé afin d'obtenir une circulation d'eau suffisante dans les tubages afin de limiter le risque d'encrassement lié à une faible vitesse d'écoulement, comme pour un puits d'injection d'un doublet.

Les préconisations d'exploitation en mode triplet sont les suivantes :

- un relevé du débit d'injection dans chaque puits (installation, au minimum, d'un débitmètre sur une des deux conduites de réinjection) doit être périodiquement réalisé afin de s'assurer que le débit de réinjection transitant dans chaque puits est supérieur au débit critique (cf. tableau 1) ;
- la régulation des débits dans chacun des puits doit être assurée par des vannes de régulation en amont de chacun des puits de réinjection. La régulation de leur ouverture permet d'injecter dans chaque puits un débit suffisant afin de limiter les phénomènes de

dépôts/corrosion à la surface des parois des tubages. Ces vannes permettent de moduler le fonctionnement de l'exploitation géothermique, soit par ouverture des deux puits de réinjection, soit par fermeture d'un des deux puits, ou soit par bridage des débits transitant dans un puits ;

- en période de fonctionnement à débit réduit (été et mi-saison), le mode de fonctionnement privilégié doit consister à réinjecter dans un seul puits, afin de maintenir une vitesse de circulation de l'eau géothermale supérieure à la vitesse critique (cf. tableau 1). Il faut également inverser régulièrement la circulation, dans chacun des deux puits, afin d'éviter la stagnation prolongée de l'eau géothermale dans le puits à l'arrêt.

La mise en place d'un groupe électropompe de réinjection par puits injecteur pourrait permettre de faciliter la gestion des débits transitant dans chaque puits injecteur sans avoir besoin d'utiliser une vanne de régulation en tête de puits. La contrainte principale liée à ce type d'installation sera la surconsommation électrique des deux pompes de réinjection par rapport à une seule pompe.

Le retour d'expérience sur les triplets en exploitation et la conversion des anciens producteurs en injecteur montre une dégradation des caractéristiques d'injectivité du réservoir au droit de certains anciens puits producteurs, au cours des premiers mois d'exploitation. Une acidification du réservoir permet, en général, de retrouver des caractéristiques satisfaisantes.



Octobre 2017

FICHE TECHNIQUE N°091

TRAITEMENTS INHIBITEURS DE CORROSION-DEPOT DES ACIERS

Les phénomènes de corrosion-dépôt représentent un risque technique, environnemental et financier pour les exploitations géothermiques vis-à-vis duquel il est indispensable de se prémunir.

Les matériaux utilisés pour la conception des puits et des installations de surface sont, en grande majorité, des aciers (acier au carbone non allié API K55 pour les tubages des puits, acier inoxydable 316 L ou acier duplex pour les équipements). L'utilisation de métaux nobles (titane, alliages à base nickel) est réservée aux équipements sensibles (échangeurs, pompes, instrumentation, tube de traitement, etc.)

La corrosion peut générer des percements des tubages des puits pouvant conduire à des communications entre aquifères, notamment entre les aquifères à forte salinité comme le Dogger et des aquifères moins profonds utilisés pour l'eau potable (ex. Albien). La réparation des percements entraîne des opérations coûteuses de réhabilitation des puits (rechemisage des cuvelages) et une augmentation des coûts électriques de pompage due aux pertes de charge provoquées par la réduction du diamètre des tubages neufs.

Par ailleurs, les dépôts, en s'accumulant sur les parois des tubages, rétrécissent le passage du fluide et augmentent les pertes de charges dans les tubages, ce qui peut se traduire par une baisse de débit, une augmentation de l'énergie de pompage et/ou injection, ou une augmentation du rabattement et/ou pression d'injection. Les particules issues des processus de corrosion-dépôt peuvent colmater les filtres et/ou les échangeurs thermiques présents en surface nécessitant des démontages et des opérations de nettoyage coûteuses. Ces dépôts peuvent également s'accumuler dans le découvert du puits de réinjection, mais aussi entraîner le colmatage du proche puits injecteur. Les opérations de nettoyage des puits et/ou du découvert avec un appareil de forage ont un impact financier lourd sur l'exploitation et sont toujours associées à des risques techniques, comme toute intervention dans un puits.

Cette fiche aborde les phénomènes mis en jeu et les dispositifs mis en œuvre afin de réduire les risques de corrosion-dépôts sur les puits géothermiques.

1. Nature des phénomènes de corrosion et principaux paramètres influents

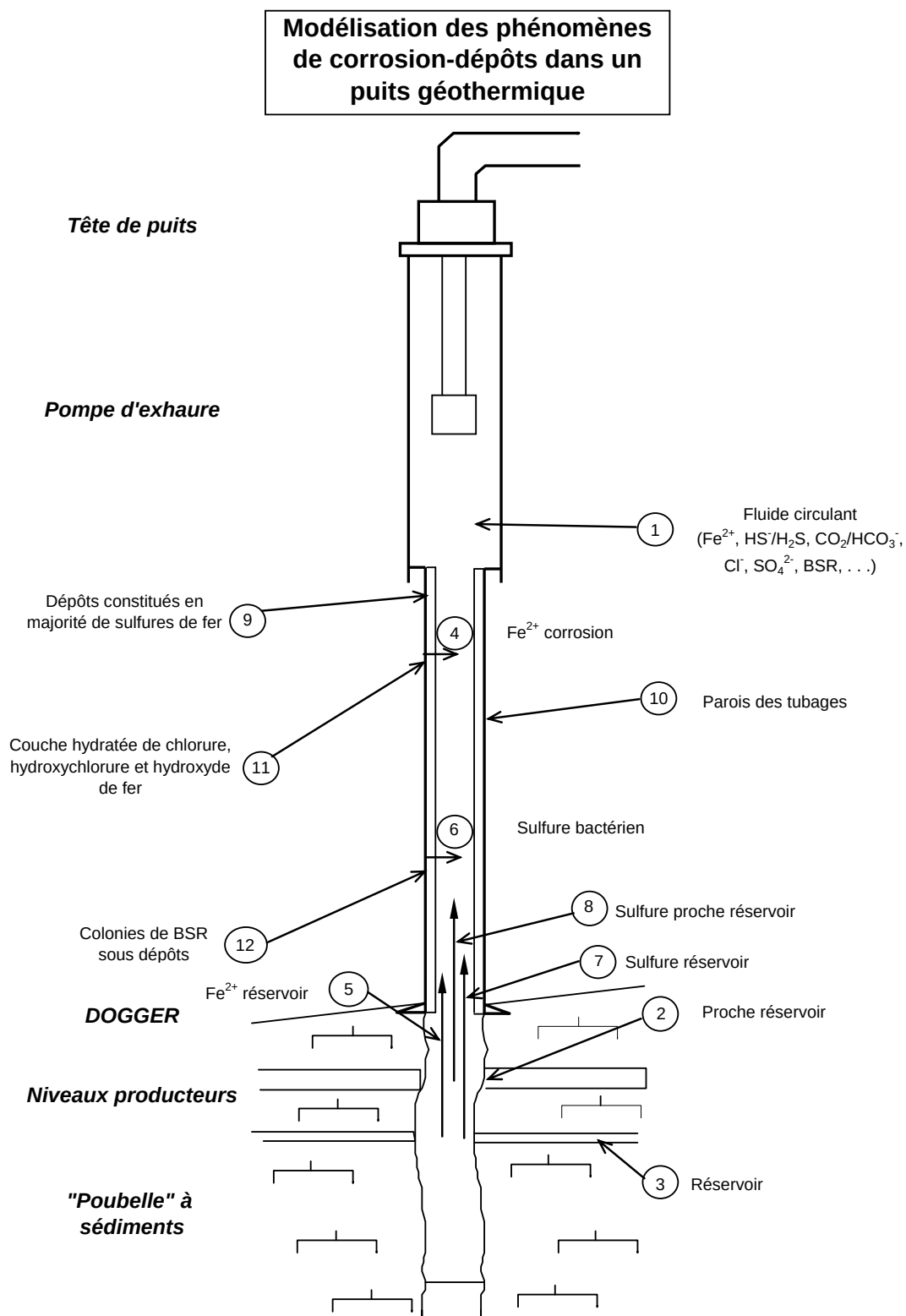


Figure 1. Illustration des phénomènes de corrosion-dépôts dans un puits

1.1. Nature des phénomènes mis en jeu

Les eaux de l'aquifère du Dogger présentent une minéralisation élevée, une microflore bactérienne (notamment présence de bactéries sulfurogènes de type sulfato-réductrices BSR et thiosulfato-réductrices BTR) et contiennent des gaz dissous parmi lesquels le sulfure d'hydrogène (H_2S) et le gaz carbonique (CO_2). Les principales caractéristiques physico-chimiques des fluides sont les suivantes : température de 55 à 85°C, pH de 6,1 à 6,5, teneur en sels totaux dissous de 6 à 35 g/L dont une grande partie sous forme d'ions chlorures (Cl^-), $[H_2S, HS^-]$ de 5 à 100 mg/L, $[SO_4^{2-}]$ de 300 à 1200 mg/L, $[CO_2/HCO_3^-]$ de 250 à 600 mg/L et absence d'oxygène en fonctionnement normal. Ces caractéristiques physico-chimiques sont telles que le fluide géothermal **(1)**²⁴ est très corrosif vis-à-vis de l'acier au carbone du tubage des puits **(10)**. Le phénomène de corrosion de l'acier au carbone engendre la dissolution de celui-ci et le passage en solution d'ions ferreux **(4)**, qui viennent s'ajouter à ceux naturellement présents dans le fluide. Etant donné la forte teneur en sulfures dissous au sein du fluide **(1)** et la faible solubilité des sulfures de fer, le fer issu de la corrosion **(4)** et des divers niveaux producteurs du réservoir **(5)** précipite sous forme de sulfures de fer sur les parois des tubages des puits **(10)** et au sein du fluide **(1)**. Les dépôts **(9)** présents sur la surface interne des tubages, constitués en majorité de sulfures de fer, engendrent un rétrécissement du diamètre interne du tubage et un accroissement de sa rugosité conduisant à des problèmes d'exploitation du doublet (augmentation des pertes de charge).

1.2 Principaux paramètres intervenant dans les phénomènes de corrosion-dépôts

Les principaux paramètres exerçant un contrôle sur les phénomènes de corrosion-dépôts sont : les teneurs en ions sulfures et chlorures au sein du fluide, la présence d'une microflore bactérienne, les conditions d'exploitation telles que le débit d'exploitation, le respect de la pression de point de bulle.

Influence des sulfures dissous

Les sulfures dissous présents au sein du fluide prélevé en tête de puits proviennent des divers niveaux producteurs du réservoir et peuvent être produits localement, au niveau du tubage **(6+10)**, du proche réservoir **(8+2)** ou du réservoir **(7+3)** par activité bactérienne. Les bactéries sulfato-réductrices (BSR) présentes au sein du fluide **(1)** et plus particulièrement sur les parois des tubages **(12)** réduisent en effet les ions sulfates **(1)** en ions sulfures.

La présence du sulfure d'hydrogène dans l'eau géothermale provoque une modification du comportement électrochimique de l'acier au carbone se traduisant par une augmentation du courant de corrosion et donc de la vitesse de corrosion.

Influence des ions chlorures

Les ions chlorures **(1)** augmentent l'agressivité du fluide géothermal vis-à-vis de l'acier au carbone des tubages. En effet, les chlorures et hydroxy-chlorures de fer très solubles forment une phase hydratée **(11)** à la surface du métal et sous les dépôts **(9)** constitués en majorité de sulfures de fer. Cette phase hydratée tend à augmenter la porosité de la phase de sulfures de fer activant les échanges ioniques, et donc, le processus de corrosion.

²⁴ Les chiffres indiqués entre parenthèses font référence à la figure 1

Rôle des bactéries sulfurogènes

Les bactéries sulfurogènes jouent un rôle déterminant dans les phénomènes de corrosion-dépôt en modifiant localement, à la surface du métal, les caractéristiques physico-chimiques du fluide telles que le pH et le potentiel d'oxydo-réduction. En effet, les colonies de BSR et/ou de BTR **(12)** présentes à la surface du métal créent localement des zones d'aération préférentielle et une acidification locale, qui activent le processus de corrosion, et peuvent conduire à une perforation de la paroi du tubage. De plus, les sous-produits issus de leur métabolisme (ions HS^-) **(6)** participent à la formation des sulfures de fer **(9)**.

1.3. Influence des conditions d'exploitation

L'augmentation du débit réduit la vitesse de corrosion en limitant le temps de contact fluide-métal et conduit à une diminution de l'épaisseur des dépôts de corrosion, notamment par effet d'abrasion. A l'opposé, des débits d'exploitation trop faibles ou des arrêts prolongés favorisent la prolifération bactérienne sous dépôts et augmentent le risque de corrosion. Enfin, un mode d'exploitation en artésien (à une pression inférieure à la pression de point de bulle du fluide) induit un dégazage du fluide provoquant la libération de dioxyde de carbone, gaz acide corrosif.

2. Les différents types de dépôts

Les dépôts se formant à la surface des tubages et équipements peuvent être de nature minérale et/ou organiques.

2.1 Dépôts minéraux

Les ions ferreux **(4)** issus du processus de corrosion de l'acier réagissent avec les ions sulfures **(1+6)** pour former du sulfure de fer initialement amorphe, puis cristallisant sous forme de mackinawite (Fe_{1+x}S). Malgré l'état de sursaturation des autres phases de sulfures de fer (pyrrhotite Fe_{1-x}S , greigite Fe_3S_4 , pyrite FeS_2), la mackinawite cristallise en premier pour des raisons cinétiques. En outre, des hydroxydes de fer, hydroxy-chlorures de fer et chlorure de fer **(11)** peuvent se former sur la paroi métallique. Le dépôt de mackinawite croît jusqu'à l'obtention d'un dépôt "limite", dont l'épaisseur dépend de la teneur du fluide en sulfure. La présence du sulfure de fer amorphe à la surface du dépôt et l'adsorption du sulfure d'hydrogène rendent le dépôt plus compact et moins perméable à l'échange entre le fluide géothermal et le métal. Une diminution de la concentration des ions ferreux à l'extérieur du dépôt provoque une transformation de la mackinawite en pyrite et la formation des autres phases de sulfure de fer (telles que la pyrrhotite) et de carbonate de fer.

Les dépôts formés poreux **(9)** et plus nobles que le fer ne sont pas protecteurs et peuvent participer à l'activation de la corrosion par transfert des sites cathodiques sur leur surface.

2.2 Dépôts organiques

Les dépôts de nature organique sont souvent de type biofilm lié au métabolisme des bactéries sulfato-réductrices, thiosulfato-réductrices et autres bactéries anaérobies. Pour une infime partie, les dépôts organiques peuvent être constitués de composés hydrocarbonés et d'hydrocarbures libres, dont l'origine provient de la matière organique sédimentaire, intrinsèque au réservoir du Dogger.

3. Dispositif de traitement, nature et types de produits utilisés en géothermie au Dogger

Afin de maîtriser les processus de corrosion-dépôt des aciers, il existe des technologies permettant d'injecter, au fond du puits de production, des inhibiteurs limitant les effets de ces processus. Le dispositif d'injection comprend, en surface, un réservoir et une pompe doseuse. L'inhibiteur est diffusé de façon permanente dans le puits, durant l'exploitation, par l'intermédiaire d'un tube de traitement en fond de puits (cf. figure 2).

Les produits utilisés sont des composés organiques dont l'action anticorrosion s'appuie principalement sur la création d'un film protecteur à l'interface, entre la paroi interne des tubages en acier et le fluide de la formation. Les autres fonctions de l'inhibiteur peuvent être inhibiteur de croissance cristalline et bactéricide (à des concentrations de plusieurs dizaines de mg/L).

La plupart des inhibiteurs de corrosion mis en œuvre actuellement pour le traitement de l'eau géothermale du Dogger du Bassin parisien sont des formulations concentrées en amines filmantes, utilisant des dérivés glycolés et des tensio-actifs cationiques (sels d'ammonium quaternaire) pour stabiliser leur solubilisation. Les sels d'ammonium quaternaire ont, de plus, un effet détergent notamment sur les dépôts organiques. Ces formulations sont mises en œuvre à des dosages moyens entre 2 et 10 mg/L, ce qui ne leur confèrent pas un effet bactéricide.

Le tableau 1 ci-après synthétise les principales caractéristiques des produits inhibiteurs utilisés actuellement sur les opérations géothermiques au Dogger.

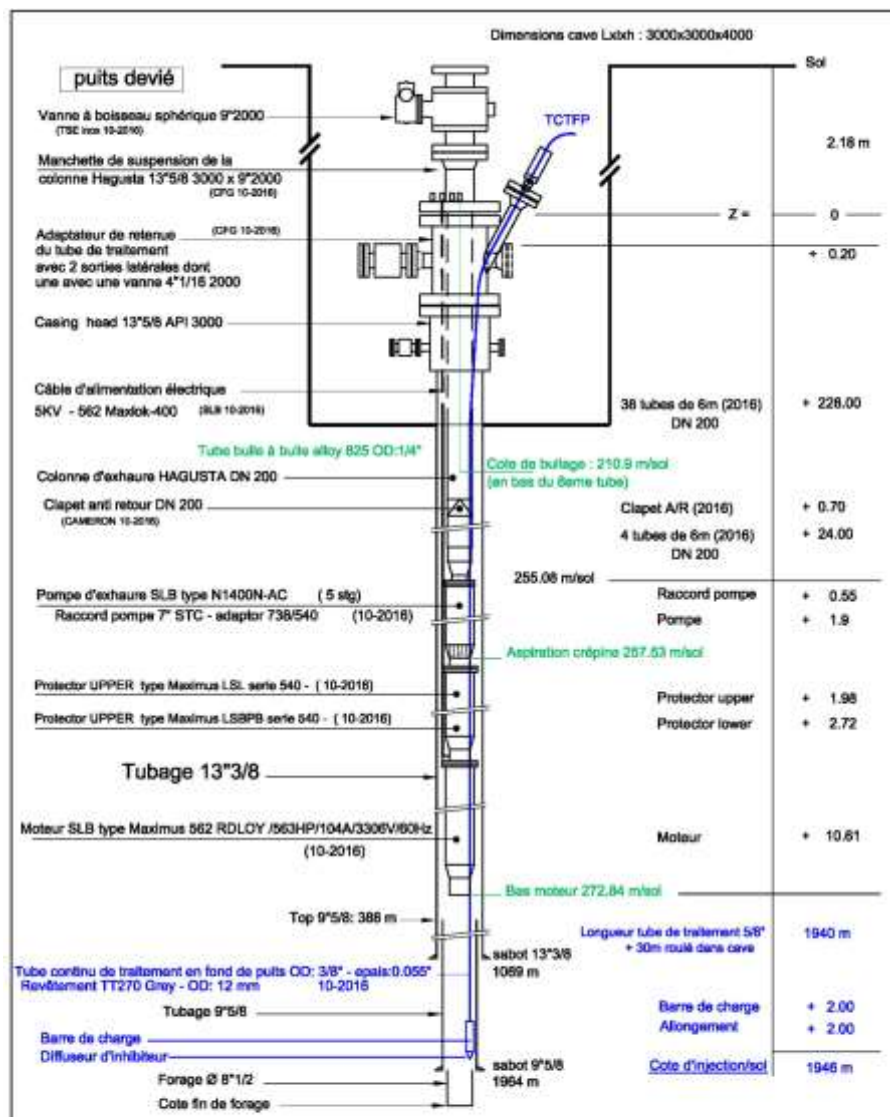


Figure 2. Exemple d'équipement d'un puits producteur au Dogger avec tube de traitement fonds de puits (Sources : CFG-Services)

Nom du produit	pH	Formulation chimique	Propriétés physiques et chimiques	Mode d'action
AQUAPROX MMC 3000	Solution aqueuse à 100%: 7.1	Amine grasse polyéthoxylée 20-25% (Xn R22/36)	Liquide incolore à légèrement jaune Miscible/soluble dans l'eau	Non renseigné
		2-(2-Ethoxyéthoxy) éthanol (Xi R36)	Incompatible avec les oxydants puissants	
AQUAPROX MMC 7300	8.1 (20 °C)	Ion amonium quaternaire	Liquide limpide fluide jaune fluorescent	Propriétés filmogènes à caractère anti-corrosion et caractère microbiocide qui s'étend à tous les micro-organismes qui lui confère un large spectre d'action
			Incompatible avec les oxydants puissants	
		Alkyl en C8-18Benzyl diméthyles	Soluble	Limitation du colmatage des dépôts de carbonates de calcium
		Chlorures d'amines cocoalkyléthoxylées	Dégagement de monoxyde et dioxyde de carbone, fumés et oxydes à température élevée	
CECA NORUST 491	6.8 (20 °C)	Ethane-1,2-diol	Soluble dans l'eau et les saumures	Tensio-actifs cationiques qui s'adsorbent sur les surfaces chargées négativement et qui deviennent lipophiles (agent mouillant, inhibiteur de corrosion en milieu acide, hydrophile)
		Dérivées d'amines grasses	Incompatible avec les oxydants puissants, les acides forts et les composés organohalogénés	
		Alkylamines (R22, R38, R41 et R50)	Produits de décomposition dangereux (oxydes)	
SEPPIC SOLAMINE 129	Solution aqueuse à 10%: 7-9	Amine éthoxylé: agent mouillant hydrophile, inhibiteur de corrosion en	Limpide et transparent stable à température élevée	Non renseigné
		Amines, alkyl de coco diméthyles (R34)	soluble dans l'eau	
		Amine de type sel d'ammonium quaternaire (chlorure de	Incompatible avec les acides, bases et agents oxydants. Tenir à l'écart de	

Tableau 1. Liste des principaux produits inhibiteurs utilisés au Dogger

4. Retour d'expériences sur les nouvelles opérations depuis 2007

Le contrôle des processus de corrosion-dépôt ne repose pas seulement sur la formulation chimique du produit inhibiteur de corrosion-dépôt. Les conditions d'exploitation, la régularité du traitement et le respect de la consigne de traitement contribuent fortement à la maîtrise des processus de corrosion-dépôt.

Les différents produits inhibiteurs de corrosion mis en œuvre sur les installations géothermiques exploitant l'eau du Dogger ont fait la preuve de leur efficacité à en juger par la durée de vie moyenne des installations (30 ans). Le tableau 2 synthétise les nouvelles opérations réalisées entre 2007 et 2015 et le ou les produits mis en œuvre.

Opérations au Dogger	Année de réalisation	Douplet ou puits unique	Suivi réglementaire	Type de produit inhibiteur
Orly 2 Le Nouvelet	2007	2	CFG Services puis ANTEA depuis 2015	AQUAPROX MMC 7300
Sucy-en-Brie	2008	1	CFG Services	CECA NORUST 491 et AQUAPROX MMC 7300 depuis octobre 2012
Paris Nord-Est	2009	2	GEOFLUID	SEPPIC SOLAMINE 129
Orly ADP	2010	2	CFG Services	AQUAPROX MMC 7300
La Courneuve-Nord	2011	1	CFG Services	SEPPIC SOLAMINE 129
Val-Maubuée	2011	2	CFG Services	AQUAPROX MMC 7300
Coulommiers	2011	2	CFG Services	CECA NORUST 491 et AQUAPROX MMC 7300 depuis mars 2015
Bonneuil-sur-Marne	2012	1	GEOFLUID (excepté traitement anti-corrosion)	?
Champigny-sur-Marne	2012	1	CFG Services	AQUAPROX MMC 7300
Le Mée-sur-Seine	2013	2	CFG Services	AQUAPROX MMC 7300
Chelles	2013	2	GEOFLUID	SEPPIC SOLAMINE 129 et AQUAPROX MMC 7300 depuis 2016
Meaux Meauval 1	2013	1	CFG Services	CECA NORUST 491, AQUAPROX MMC 3000 depuis fin sept 2015 et AQUAPROX MMC 7300 depuis fin nov 2016
Meaux Meauval 2	2013	1	CFG Services	CECA NORUST 491, AQUAPROX MMC 3000 depuis mi sept 2015 et AQUAPROX MMC 7300 depuis fin avril 2016
Neuilly-sur-Marne	2013	2	GEOFLUID	AQUAPROX MMC 7300
Meaux Hôpital	2014	1	CFG Services	CECA NORUST 491 et AQUAPROX MMC 3000 depuis sept 2015, AQUAPROX MMC 7300 depuis avril 2017
Arcueil-Gentilly	2014	2	GEOFLUID	SEPPIC SOLAMINE 129
Fresnes	2014	1	CFG Services	CECA NORUST 491, AQUAPROX MMC 3000 depuis sept 2015 et AQUAPROX MMC 7300 depuis décembre 2016
Villejuif	2014	2	CFG Services	Permo BWT SH-1092
Bagneux	2014-2015	2	GEOFLUID (excepté traitement anti-corrosion géré par Dalkia)	?
Rosny-sous-Bois	2015	2	CFG Services	SEPPIC SOLAMINE 129
Villepinte	2015	2	GEOFLUID	SEPPIC SOLAMINE 129
Bailly-Romainvilliers (Village Nature)	2015	2	CFG Services	SEPPIC SOLAMINE 129

Tableau 2. Opérations réalisées entre 2007 et 2015 et type de produits utilisés

Les paramètres de suivi de la corrosion généralisée (fer dissous, vitesse de corrosion déterminée sur coupon et mesurée par sonde électrochimique) et les paramètres déterminants dans les processus de corrosion (pH, concentrations en sulfures d'hydrogène, ions chlorures) des nouvelles exploitations géothermiques, réalisés entre 2007 et 2015 et traités depuis leur mise en service, sont synthétisés sur les graphiques en figure 3. Ces graphiques indiquent, pour chaque paramètre, sous forme de rectangle et de barres, les valeurs minimums et maximums (traits à l'extrémités des barres), les quartiles à 25 et 75% (limites basse et haute du rectangle), la médiane (trait à l'intérieur du rectangle) et la valeur moyenne (croix).

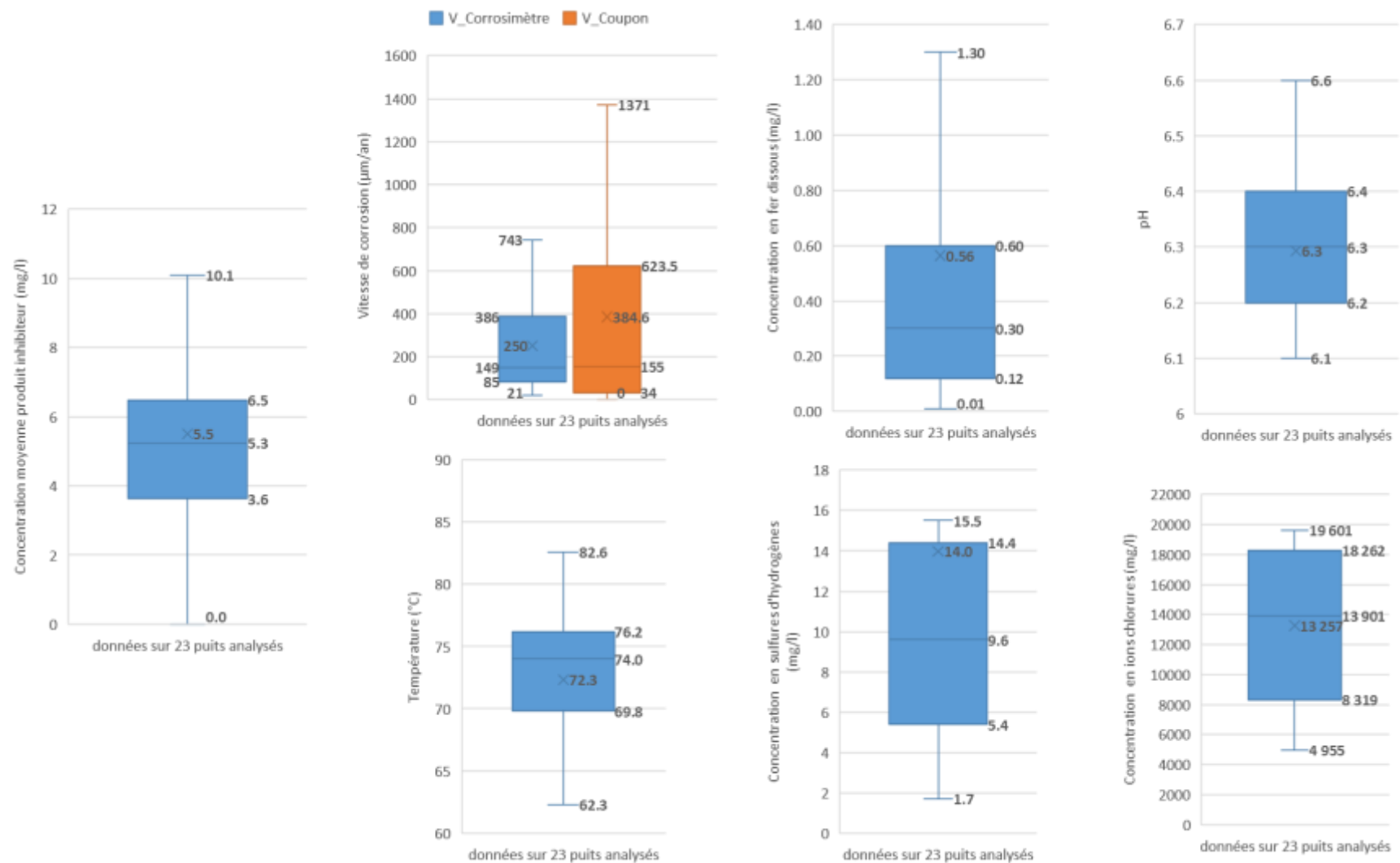


Figure 3. Principaux paramètres de suivi de corrosion (23 installations concernées)

La concentration moyenne en produit inhibiteur est de 5,5 g/l sur les nouvelles installations mises en service depuis 2007. Certaines installations ont changé de traitements inhibiteurs, depuis leur mise en service avec des dosages qui ont pu évoluer au cours du temps. Ces paramètres montrent globalement des phénomènes limités de corrosion, d'après notamment les vitesses de corrosion qui sont peu élevées.

Le bon état des tubages présumé du fait des faibles vitesses de corrosion mesurées en surface est confirmé par les diagraphies périodiques des puits, qui indiquent globalement des phénomènes limités de corrosion et des développements relativement faibles de dépôts à la surface des parois en acier. Néanmoins, malgré l'injection de produit inhibiteur, certaines zones de la boucle géothermale sont le siège de processus de dépôts plus marqués ; ceci est le cas, en particulier, pour la chambre de pompage au-dessus de l'aspiration de la pompe d'exhaure (zone de faible turbulence) et pour les zones mortes de la boucle géothermale (piquages, purges).

Les suivis périodiques des installations neuves montrent, qu'à traitement identique, la passivation des tubages neufs nécessite un laps de temps plus ou moins long selon les installations. Ainsi, à traitement identique, la réponse à un traitement n'est pas similaire d'un site à l'autre. La spécificité des installations, les conditions d'exploitation, la chimie du fluide géothermal et le dosage initial du traitement, au cours de la passivation des tubages, expliquent ces comportements différents des installations.

En outre, les paramètres de suivi de la corrosion-dépôt (teneurs en fer et en sulfure, vitesses de corrosion) sont très sensibles au débit d'exploitation et traitement appliqué. Une réduction même temporaire du débit d'exploitation (pendant la saison estivale notamment, cf. figure 4) ou un traitement inadapté (cf. figure 5) intensifient rapidement les processus de corrosion. Le retour à des processus de corrosion à nouveau maîtrisés a lieu dans un temps plus ou moins long, selon les installations.

A ce jour, de nombreux exploitants se plaignent de dysfonctionnements au niveau de leurs filtres et/ou échangeurs. Ces dysfonctionnements sont dus à des dépôts de nature organique et inorganique, qui peuvent colmater entièrement les filtres et/ou échangeurs et perturber le bon fonctionnement des installations, en induisant des pertes de charges dans les filtres et les échangeurs, mais aussi en réduisant l'efficacité thermique des échangeurs.

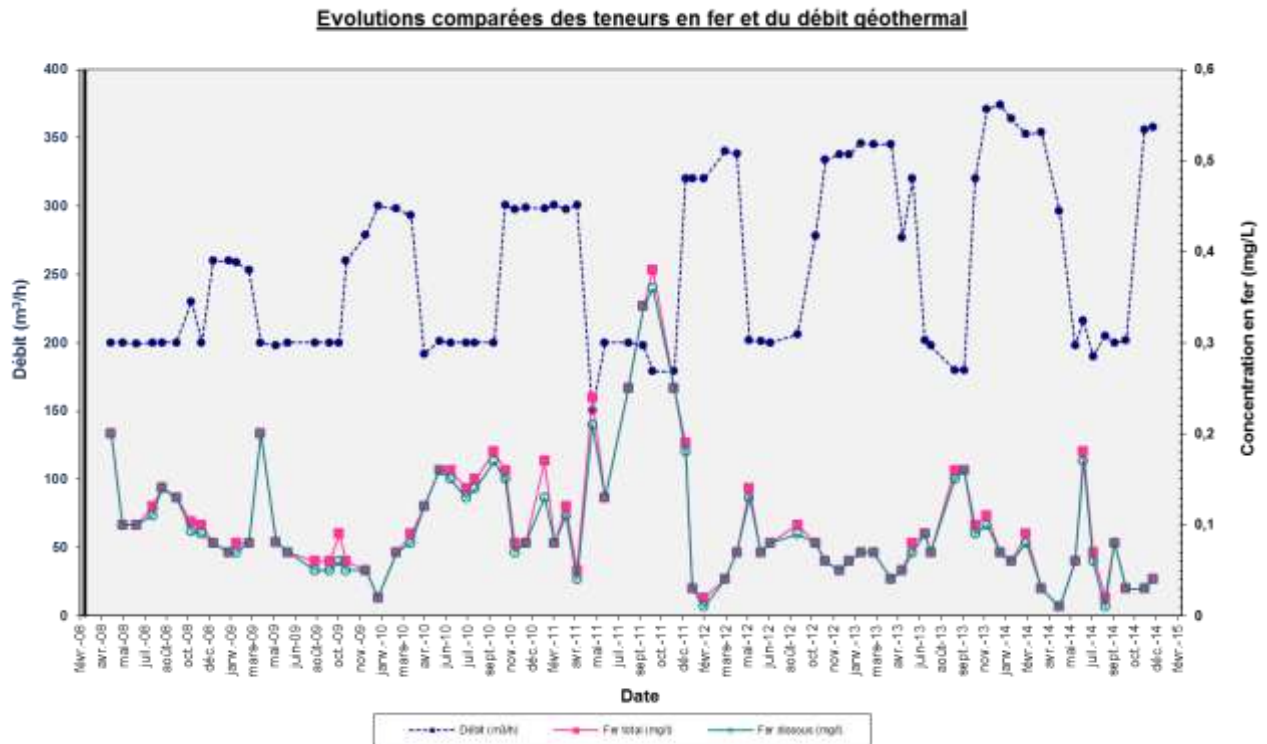


Figure 4 : Evolutions comparées des teneurs en fer et du débit géothermal au sein d'une installation géothermique

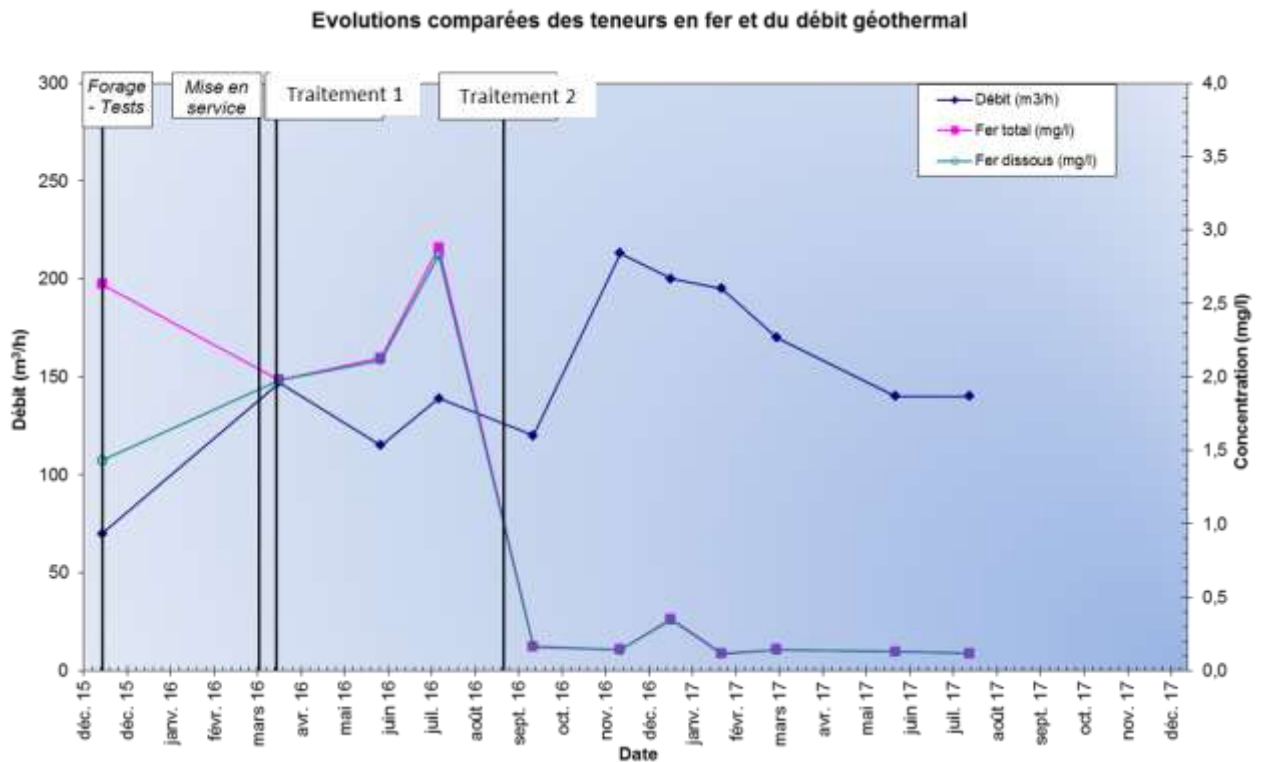


Figure 5 : Evolutions comparées des teneurs en fer et du débit géothermal au sein d'une installation géothermique

5. Recommandations

Le retour d'expérience montre que les traitements inhibiteurs de corrosion mis en œuvre contribuent globalement à la maîtrise des processus de corrosion généralisée et réduisent la formation des dépôts issus des processus de corrosion. Afin d'optimiser l'efficacité du traitement, quel que soit le traitement choisi, il doit être injecté régulièrement et en continu. La consigne de dosage donnée par le traiteur d'eau et/ou le bureau d'études en charge du suivi réglementaire doit être respectée. Elle doit être ajustée en fonction des conditions d'exploitation.

Par ailleurs, il est à noter que les faibles vitesses d'exploitation sont propices à l'intensification des processus de corrosion et à la formation des dépôts. Les exploitants doivent suivre les recommandations de leurs bureaux d'études sous-sol qui leur signifient, selon les caractéristiques de leurs équipements et de leurs installations, les débits minimum d'exploitation.

Il est impératif que les paramètres de suivi de la corrosion soient contrôlés régulièrement. Avec le suivi des paramètres hydrodynamiques des ouvrages et le contrôle de l'évolution des pertes de charges au niveau des filtres et échangeurs, les paramètres de corrosion permettent de juger de l'efficacité du traitement mis en œuvre. Les diagraphies effectuées périodiquement tous les 3 ans (puits injecteurs) et tous les 5 ans (puits producteurs) permettent de conforter l'analyse sur l'efficacité du produit.

Tout changement de traitement doit être effectué avec précaution, compte tenu des cinétiques rapides des processus de corrosion-dépôt. Un suivi intensifié de l'installation est recommandé afin de s'assurer de l'efficacité du nouveau produit et de la maîtrise des processus de corrosion-dépôt.



Avril 2017

FICHE TECHNIQUE N°092

FILTRATION DES EAUX GEOTHERMALES EN SURFACE

Le choix d'une solution de filtration optimale contribue de manière déterminante à limiter les désordres et à améliorer la disponibilité des installations géothermiques de surface et ainsi à augmenter la productivité de façon notable. Dans certains contextes hydrogéologiques (cas des aquifères sableux et/ou non consolidés Albien, Néocomien, Trias), la filtration de l'eau géothermale est requise pour réduire le risque de colmatage physique du forage de réinjection et de l'aquifère au voisinage de l'ouvrage d'injection. Le choix de la technologie du filtre aura un impact sur la fréquence et la durée des nettoyages par les exploitants et sur les consommations électriques de pompage engendrées par les pertes de charges hydrauliques.

Les dysfonctionnements apparaissent en règle générale lorsque les particules et les débris sont aussi gros que les jeux de fonctionnement des pièces en mouvement (cas des pompes d'exhaure, des pompes de réinjection et de la robinetterie) ou bien lorsque leur taille provoque un colmatage (cas des échangeurs à plaques et des piquages de petit diamètre des conduites de surface).

Cette fiche décrit les dispositifs disponibles et mis en œuvre en géothermie basse énergie.

1. Critères de choix de la filtration et définition d'indicateurs de performance

Les principaux critères, qui déterminent la capacité nominale, le type de filtre, la maille du système de filtration à retenir, sont les suivants :

- Débit à traiter ;
- Température de l'eau de production ;
- Pression de service ;
- Concentration en matières en suspension ;
- Distribution granulométrique des particules ;
- Compatibilité physico-chimique des matériaux composant le filtre avec l'ensemble des équipements du doublet géothermique ;

- Propriétés du réservoir d'injection (perméabilité, porosité, distribution de la porosité). **La notion de plage critique de colmatage du réservoir d'injection** permet de préciser la maille à retenir pour limiter le colmatage des puits d'injection (maille < plage (1/10-1/3) du diamètre d'ouverture des pores du massif de réinjection).

Le taux de filtration absolu indique la taille maximale des particules pouvant passer à travers l'unité de filtration.

Le taux de filtration nominal indique le pourcentage de matériau de taille supérieure à la maille nominale du filtre susceptible de passer au travers du filtre.

Le taux d'efficacité nominal du filtre correspond au pourcentage de matériau bloqué par le filtre.

Le ratio Béta correspond au ratio entre le nombre de particules entrantes et le nombre de particules en aval du filtre.

2. Nature et origines des particules solides et des débris présents dans le fluide géothermal

Lors de son exploitation, le fluide géothermal est susceptible de se charger en matières en suspension (particules solides et débris). Les particules solides et les débris présents dans le fluide géothermal de surface proviennent de trois sources :

- **le réservoir** : arrachement de la matrice rocheuse (érosion) sous l'effet de la circulation turbulente de l'eau géothermale dans les niveaux producteurs et dans le découvert. Dans le cas des aquifères sablo-gréseux, la complétion mise en place (crépine et massif filtrant) doit limiter cet effet. Dans le cas de l'aquifère carbonaté du Dogger, il n'y a pas de complétion au réservoir (trou nu) ;
- **le puits** : arrachement des dépôts formés à la surface des cuvelages et de la complétion d'exhaure par processus de corrosion, sédimentation ou dégazage ; sous l'effet de la turbulence du fluide liée aux changements de vitesse de circulation dans les tubages, les dépôts se trouvent remobilisés dans le fluide géothermal ;
- **les équipements** : les débris (usure, morceau de revêtement, collier, reste de bridge-plug reforcé, reste de ciment etc.) des différents produits et équipements mis en œuvre dans le puits à l'occasion des travaux de maintenance de type manœuvre de pompe et dispositif de traitement ou Work-Over.

2.1 Particules fines solides

Dans la cadre de l'arrêté préfectoral d'exploitation, le fluide géothermal fait l'objet d'une analyse des particules par compteur à absorption de lumière sur une gamme de 1 à 40 µm. Les mesures réalisées montrent que les particules ont essentiellement une taille inférieure à 12 µm.

Compte tenu du seuil dimensionnel des particules fines solides (cf. Figure 1), celles-ci ne font pas l'objet d'une filtration et circulent donc librement dans la boucle géothermale.

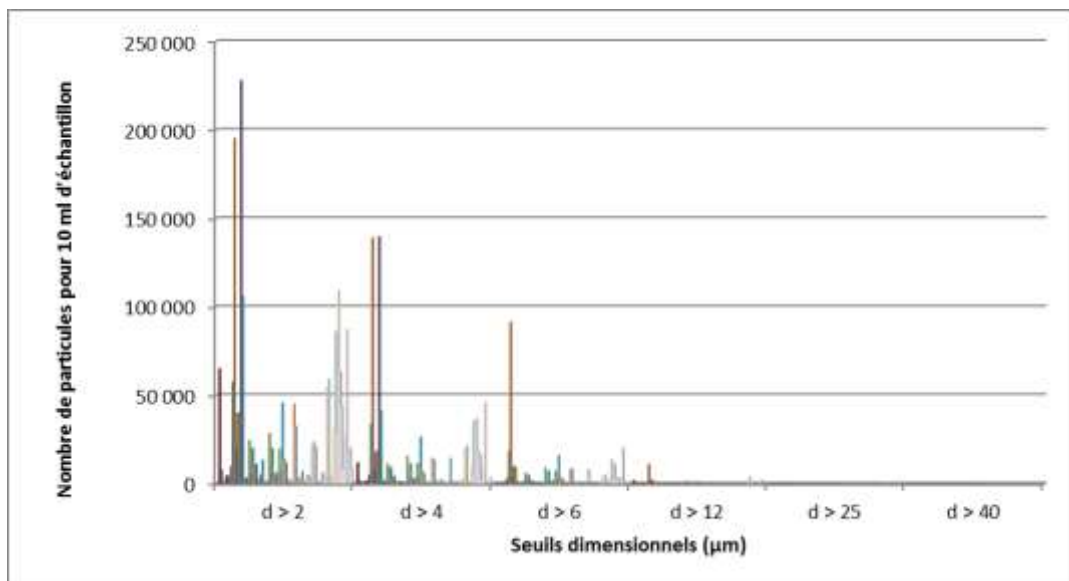


Figure 1 : Exemple d'histogramme de répartition des particules circulant dans le fluide géothermal

2.2 Particules grossières

Les particules grossières se composent de morceaux de roches et de dépôts arrachés par la circulation du fluide géothermal dans le découvert, les tubages et les équipements de surface.



Figure 2 : Particules grossières

2.3 Débris

Les débris proviennent soit de morceaux d'équipements perdus dans les puits à l'occasion de travaux, soit de dépôts arrachés à la surface des parois des tubages à l'occasion de manœuvres d'équipements dans le puits (pompe, garniture de forage).



Figure 3 : Débris sous forme de plaques de sulfure de fer et morceau d'un bridge-plug reforé



Figure 4 : Dépôts récupérés sur les filtres

3. Dispositif de filtration utilisé en géothermie basse énergie

3.1 Règle générale de dimensionnement

Un dispositif de filtration surdimensionné va en faveur de la durée de vie, mais il faut s'attendre à des coûts d'investissement plus élevés. Si toutefois, on choisit une filtration de plus petite taille, on risque, malgré des coûts d'acquisition moins élevés, de diminuer fortement la durée de vie de l'élément et le niveau de protection des composants. Le but est évidemment de trouver le filtre le plus économique en tenant compte de la durée de vie de l'ensemble de l'installation et du temps nécessaire à la maintenance et au nettoyage par les opérateurs.

Les dispositifs de filtration d'une boucle géothermale exploitant l'eau du Dogger ou de l'Albien sont généralement dimensionnés selon les données suivantes :

- Débit géothermal entre 0 et 350 m³/h ;
- Pression de service entre 0 et 16 bar ;
- Température de service entre 20 et 90°C ;
- Pertes de charge des éléments filtrants et du corps < 1 bar ;
- Fréquence de nettoyage hebdomadaire au maximum ;

Il est recommandé de disposer d'un système de filtration en tandem afin de pouvoir maintenir l'exploitation de la boucle géothermale lors de la phase de nettoyage des éléments filtrants. Il est également possible d'installer un second filtre, avec un plus petit tamis de filtration, juste en amont des échangeurs afin de limiter la vitesse d'encrassement des échangeurs à plaques.

3.2 Filtre à paniers et tamis

Principe :

Son média filtrant, métallique, existe dans une gamme de seuils de filtration de 10 µ à plusieurs millimètres. Quand il est colmaté, il doit être démonté pour être nettoyé, le plus souvent avec un nettoyeur à haute pression. Les filtres sont équipés de manomètres différentiels pour mesurer la perte de charge du filtre afin d'évaluer son degré de colmatage.

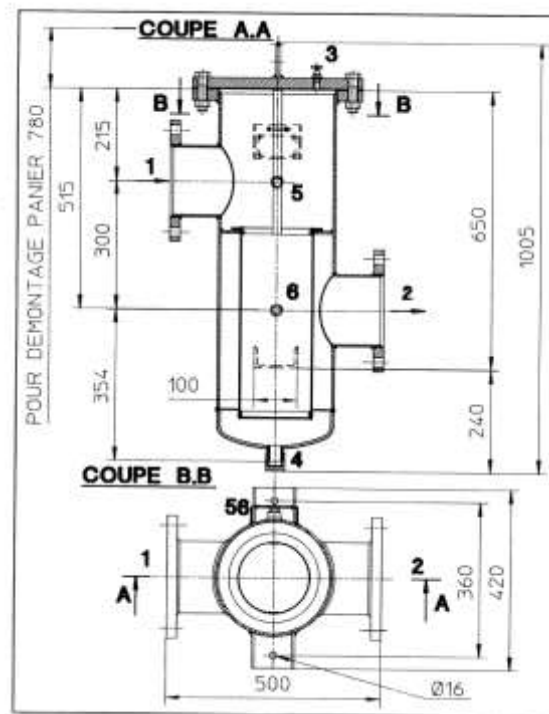


Figure 4 : Filtre PHILIPPE à tamis

Avantages :

- Les filtres à tamis sont robustes et d'un coût relativement modéré.

Inconvénients :

- Fréquence de nettoyage élevée, si le fluide présente une forte charge en particules solides ;
- Nettoyage du tamis parfois difficile avec un nettoyeur haute pression notamment avec des dépôts indurés à base de pyrite qui nécessitent l'utilisation d'un bain d'acide nitrique pour parfaire le nettoyage ;
- Risque de collapse ou rupture du tamis du filtre si ce dernier se remplit rapidement et n'est pas nettoyé à temps par l'exploitant.

Efficacité de filtration :

- L'efficacité des filtres à panier est bonne pour les débris et les particules grossières dans une gamme de 50 à 500µm. En revanche, les particules fines passent à travers les mailles du filtre.

3.3 Filtre cyclonique

Principe :

L'utilisation de la force centrifuge (effet vortex) pour faire tourbillonner l'eau géothermale, au-dessus du média filtrant, facilite l'enlèvement des plus grosses particules tout en augmentant, de

façon significative, la surface de filtration, à l'intérieur du réservoir. La turbulence favorise l'accumulation des particules. L'eau ainsi débarrassée d'une grande partie de ses impuretés est filtrée en passant au travers du média filtrant (maille 250 μm) pour, ensuite, être collectée. Les contaminants emmagasinés seront, par la suite, expulsés par des lavages à contre-courant, lesquels ne nécessitent qu'un volume d'eau plus faible.

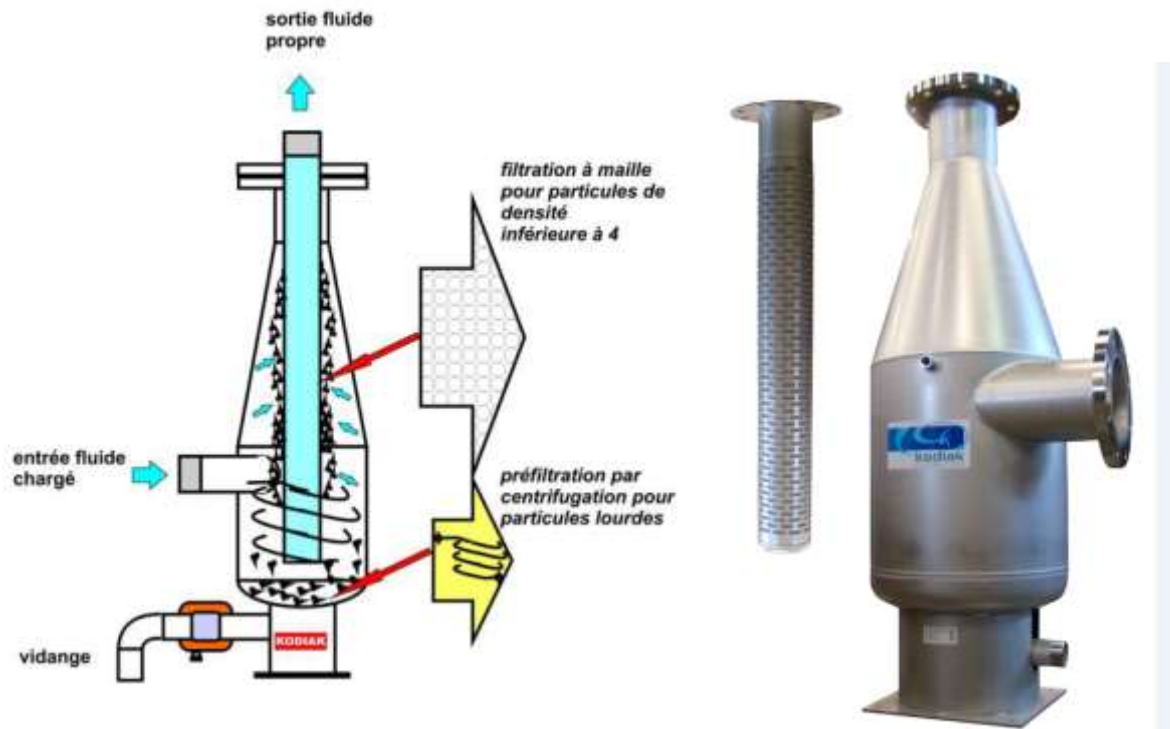


Figure 5 : Schéma de principe du filtre cyclonique

Avantages :

- Filtration par l'extérieur du tamis contrairement aux filtres à paniers ;
- Meilleure étanchéité entre le fluide chargé et le fluide filtré ;
- Equipements plus robustes que les filtres à paniers au niveau du tamis ;
- Pas d'ouverture des filtres et d'arrêt : une simple chasse par la conduite de vidange suffit à nettoyer le tamis.

Inconvénients :

- Coût plus élevé que les filtres à panier

Efficacité de filtration :

- Meilleure efficacité que les filtres à paniers notamment sur les particules fines qui s'agglomèrent en forme de boues sous l'effet cyclonique.

3.4 Exemples

Exemple 1 : Dispositif de filtration à tamis



Filtration à tamis vertical DUPLEX



Filtration DUPLEX en Y

Exemple 2 : Dispositif de filtration avec filtres cycloniques



Jeu de trois filtres cycloniques – débit d'eau filtré 350 m³/h

La configuration avec trois filtres et leur dimensionnement permet d'intervenir sur l'un d'entre eux sans arrêter le fonctionnement de la boucle géothermale.

4. Autres dispositifs de filtration de surface à nettoyage automatique

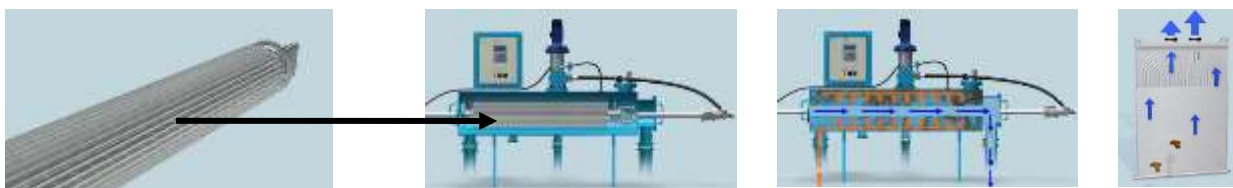
Des solutions industrielles commencent à se développer dans le domaine de la géothermie avec, en particulier, des modules de filtration automatiques capables de traiter des débits importants correspondant à ceux rencontrés sur la plupart des doublets géothermiques.

En particulier, la société AMIAD développe des modules de filtration en profondeur à nettoyage automatique (filtre AMF). Trois gammes de débit sont proposées (jusqu'à 30 m³/h, 50 m³/h ou 320 m³/h). Les seuils de filtration se situent entre 20 et 2 microns. La pression minimale de fonctionnement est de 0,5 bar et la pression maximale est de 10 bar. La température maximale de service est de 40°C pour les produits standards. Des développements permettraient d'étendre la plage de température d'utilisation jusqu'à une température de 60 à 70°C.

Le média filtrant est composé de fibres textiles identiques à celles composant les filtres à cartouches. L'élément de base du filtre à microfibres est constitué par la cassette bobinée. Un fil de section variable, composé d'un nombre déterminé de brins en fonction du seuil de filtration recherché, est bobiné autour de cassettes rigides cannelées. Les cassettes sont montées tout le long et tout autour d'un tube creux de collecte des eaux filtrées.

Les filtres AMF retiennent les particules au fur et à mesure du passage de l'eau au travers des cassettes à microfibres (1).

L'eau filtrée est collectée via une canalisation et s'écoule par la sortie du filtre (2). Les particules s'accumulant sur et dans les microfibres créent une pression différentielle. A une valeur pré-déterminée ou suite à un intervalle de temps donné, l'unité de contrôle déclenchera un cycle de nettoyage.



Inconvénients :

- Coût d'investissement plus élevé que les systèmes de filtration à cartouches. Exemple : 1 filtre AMIAD AMF 36K (36 000 cm² de surface filtrante filtration de 2 à 20 µm: 40 k€ HT capable de traiter 30 m³/h - seuil de filtration de 20 µm - (prix pour le filtre seul sans les accessoires ni le montage). CAPEX + OPEX : 12 500 k€/an sur 20 ans pour 150 m³/h ;
- Nécessité de prévoir un exutoire pour les rejets chargés en MES ;
- Attention aux fréquences et temps de nettoyage des filtres qui peuvent se traduire par des volumes de rejet importants et une baisse de la production. Etant donné le temps de lavage qui peut excéder les 30 minutes, il faut prévoir une bêche en aval pour assurer la continuité de la production durant les périodes de lavage ou doubler la ligne de filtration.

Avantages :

- Coût d'exploitation à priori plus faible car moins consommateur de main d'œuvre et de médias filtrants.

5. Recommandations générales

Compte tenu de l'exploitation d'une ressource géothermale profonde dont le fluide est chargé de particules liées au réservoir exploité et à ses conditions d'exploitation, il apparaît qu'un moyen de filtration de l'eau produite en surface est nécessaire afin d'éviter un encrassement des échangeurs et un colmatage du réservoir et proche réservoir. La qualité de la filtration est un élément particulièrement sensible pour les réservoirs sableux et nécessite de choisir une filtration adaptée.

Le choix de la technologie du filtre a un impact sur la fréquence et la durée des nettoyages par les exploitants et sur les consommations électriques de pompage engendrées par les pertes de charges hydrauliques.

Les filtres à panier et les filtres cycloniques mis en œuvre, à ce jour, montrent leurs efficacités dans les installations en cours d'exploitation. Le nettoyage périodique des filtres, si nécessaire, permet d'éviter leur colmatage.

Annexe 10

Synthèse des défauts et malfaçons observés depuis 2015



Mars 2021

GUIDE DE BONNES PRATIQUES

SYNTHESE DES DEFAUTS ET MALFAÇONS OBSERVES DEPUIS 2015

Cette note technique propose une synthèse des principales malfaçons, défaillances et défauts de conception observés lors de la réalisation des ouvrages géothermiques depuis 2015, en regard des règles de l'art et des recommandations du guide de « bonnes pratiques » sur les retours d'expérience des forages géothermiques profonds.

Les différents thèmes abordés concernent :

- l'architecture et la structure des puits ;
- les déviations et le contrôle des trajectoires ;
- les tubages de soutènement et les colonnes d'exploitation ;
- le centrage des colonnes ;
- la cimentation des tubages et les attentes de prise du ciment ;
- la complétion des aquifères captés ;
- le développement des zones productrices.

Pour établir ce document, les défauts et anomalies les plus significatifs observés au cours des travaux de forage réalisés entre début 2015 et fin 2020 ont été répertoriés. Cet inventaire ne prend toutefois en compte que les travaux qui ont fait l'objet - pendant cette période - d'une analyse de conformité à la demande de la SAF.

La liste des défauts et anomalies de cet inventaire n'est volontairement pas éditée afin d'éviter de stigmatiser - ce n'est pas le but de ce document - les maîtres d'ouvrage ou les maîtres d'œuvre des opérations pouvant être concernées. De la même manière, le nom des forages servant d'exemple n'est pas explicitement mentionné. Dans les faits, la quasi-totalité des ouvrages est affectée, le plus souvent heureusement de manière mineure, par un ou plusieurs défauts. Il est seulement souhaité que ce retour d'expérience fournisse à l'ensemble des opérateurs et aux différents intervenants des informations et des pistes de travail qui leur permettent d'améliorer la qualité des futurs ouvrages.

1. ARCHITECTURE DES PUIITS

L'architecture d'un puits (note technique n°021) est principalement commandée par cinq facteurs :

- le type de l'aquifère capté. Dans le Bassin Parisien, il s'agit - du moins jusqu'à présent - de l'Albien, du Néocomien et du Dogger. Les aquifères du Trias (hormis à Châteauroux) et du Lusitanien ne sont pas encore exploités. L'aquifère Crétacé du Bassin Aquitain a également été pris en compte ;
- la profondeur verticale du toit du réservoir et la trajectoire du puits ;
- le mode d'exploitation de l'aquifère (puits unique, doublet, triplet, autre) ;
- le débit maximum souhaité en exploitation ;
- l'ensemble des contraintes d'accès à la ressource, qu'elles soient réglementaires, géologiques ou hydrogéologiques.

Le débit d'exploitation est un facteur déterminant. Il influence à la fois le diamètre des colonnes de production - et en conséquence les diamètres de foration - l'écartement entre les puits au toit du réservoir (temps de percée thermique) et, de ce fait, l'inclinaison finale de l'ouvrage.

Dans le Bassin Parisien, des contraintes d'accès réglementaires sont imposées pour protéger les aquifères traversés par les forages. Il s'agit d'assurer la protection des aquifères superficiels (entre la surface et environ 150-200 m) et celle des aquifères stratégiques de l'Albien et du Néocomien (entre 700 m et environ 1000 m). La DRIEAT impose, sauf rares exceptions, la présence d'un double tubage cimenté en face de ces aquifères.

Les paramètres hydrogéologiques attendus dans le réservoir ciblé peuvent également imposer des architectures spécifiques. C'est le cas par exemple de certaines zones géographiques où la plus faible productivité de l'aquifère impose la création de drains fortement inclinés, sub-horizontaux ou multiples.

Enfin l'architecture des puits doit s'adapter aux options techniques retenues pour construire les ouvrages. Il peut s'agir par exemple d'intégrer des DV pour réaliser des cimentations étagées ou de mettre en oeuvre des matériaux spécifiques (matériaux composites, acier inoxydable).

Les défauts ou malfaçons les plus fréquemment observés dans les architectures sont pour la plupart issus des situations suivantes :

- la recherche d'un débit d'exploitation particulièrement élevé ($> 300 \text{ m}^3/\text{h}$) ;
- un recouvrement insuffisant dans le télescopage des colonnes ;
- un positionnement inadéquat des DV ;
- une pratique partielle du double tubage réglementaire.
- des complétions (matériel, développement) inadaptées ou insuffisantes.

1.1 Débit d'exploitation élevé

Les Maîtres d'Ouvrage souhaitent rentabiliser au mieux leurs exploitations - ce qui est tout à fait naturel et compréhensible. Dans cette optique, la recherche d'un débit de production élevé fait partie des solutions les plus fréquemment envisagées pour atteindre cet objectif.

Une augmentation du débit de production influence nécessairement l'architecture des puits. En effet, en prenant des conditions hydrogéologiques identiques :

- les pertes de charge dans les colonnes de production et d'injection vont augmenter. Les diamètres des tubages - et donc les diamètres de forage - devront être adaptés au débit attendu et, lorsque nécessaire, augmentés en conséquence ;
- l'écartement à observer entre le puits de production et le puits d'injection va devoir s'accroître afin de continuer à respecter le temps de percée thermique ;
- la chambre de pompage devra être approfondie pour s'adapter à l'augmentation des débits et des pertes de charge.

Ces modifications ont des conséquences sur la structure des puits :

- la nécessité de respecter un écartement plus important entre les puits impose inévitablement de plus fortes inclinaisons ;
- de la même façon, sur les puits de production, une chambre de pompage plus profonde va impliquer une amorce de déviation plus tardive et donc une inclinaison encore plus importante ;
- l'augmentation conjointe de l'inclinaison et du diamètre de forage détermine une aggravation sensible des difficultés pour réaliser les trajectoires et augmente le niveau de risque pendant les travaux ;
- les moyens à mettre en œuvre pour obtenir un centrage efficace des tubages vont se montrer de plus en plus exigeants ;
- enfin, d'une façon générale, les conditions facilitant l'obtention de cimentations de bonne qualité se dégradent très largement.

De telles contraintes ont été observées sur certains forages construits en vue d'atteindre un débit de 350 m³/h au lieu du plus habituel 280 m³/h à 300 m³/h. Ce débit important a incité - très raisonnablement - le maître d'œuvre du projet à proposer une colonne de production en 10"3/4 (au lieu de 9"5/8) afin de limiter les pertes de charge en exploitation. D'autre part, les inclinaisons qui ont été imposées par un déplacement horizontal nécessairement plus important atteignent de ce fait plus de 50°, c'est à dire supérieures d'environ 10° aux inclinaisons habituelles. Malencontreusement, les conséquences induites par cette double augmentation de diamètre et d'inclinaison ont pour la plupart été insuffisamment prises en compte lors de l'établissement des programmes de forage. Il en a résulté de nombreuses difficultés :

- pour réaliser les déviations : des trajectoires difficiles à maîtriser, de fortes instabilités dans les formations tendres, des contraintes mécaniques élevées, des ruptures fréquentes de garniture conduisant parfois à des pertes de matériel, des side-tracks ;
- pour garantir un centrage efficace des différentes colonnes ;
- pour assurer des cimentations de bonne qualité.

1.2 Recouvrement des colonnes

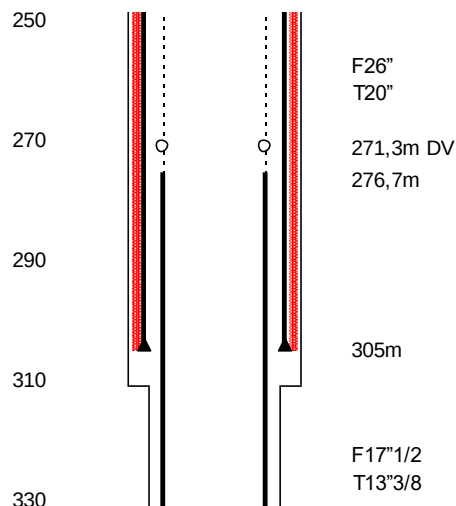
Dans la plupart des programmes de forage, on observe le plus souvent la mise en place de 3 colonnes télescopées. En considérant un programme classique :

- une colonne de diamètre 18"5/8 couvrant les formations superficielles avant le début de la déviation ;
- une colonne de diamètre 13"3/8 installée au mur des formations stratégiques de l'Albien-Néocomien. Cette colonne couvre la phase de prise d'angle et contribue au double tubage protégeant ces formations ;
- une colonne de diamètre 9"5/8 installée au toit du réservoir servant de colonne de production ou d'injection.

Dans la plupart des cas, les programmes de forage prévoient de télescoper ces colonnes jusqu'en surface, avec toutefois une exception pour les forages de production. Dans les forages de production, la construction de la chambre de pompage implique en effet le plus souvent de retirer la partie supérieure de la colonne de production 9"5/8 entre la surface et 300 m ou 400 m de profondeur afin de libérer la chambre de pompage en 13"3/8.

Par sécurité, il est recommandé sur les puits de production d'observer un recouvrement d'au moins 50 m (sauf contrainte architecturale spécifique) entre le sabot du tubage 18"5/8 et la cote atteinte par le ciment dans la colonne 9"5/8 (niveau correspondant généralement à la DV supérieure). Cette précaution permet de mieux sécuriser la base de la chambre de pompage dans le cas d'une cimentation défectueuse ou de mauvaise qualité. Cette recommandation est néanmoins rarement appliquée.

Un cas particulier a été observé sur un forage de production dont l'architecture ne prévoyait la présence que d'une seule colonne de soutènement en acier. Sur ce forage un tubage 20" a été posé à 305 m. Il est uniquement prolongé par un tubage 13"3/8 allant de 276,7 m jusqu'au toit du Dogger, sachant qu'il sert ensuite à suspendre une colonne libre en matériaux composites.



*Coupe schématique de la zone de raccordement des tubages 20" et 13"3/8
Tubages acier (traits noirs), tubage retiré (pointillé) et zone annulaire cimentée (rouge)*

Comme on peut le constater sur la coupe schématique ci-dessus, l'étanchéité du raccordement entre les deux colonnes s'avère peu probable du fait de la faible hauteur du recouvrement (28,3 m seulement) et de l'absence ou quasi absence de ciment constaté dans l'annulaire 13"3/8 entre la DV supérieure positionnée à 271,3 m (qui a d'ailleurs pu être retirée, preuve concrète d'une absence de ciment) et la profondeur d'au moins 671 m.

Or cette étanchéité va garantir le maintien du fluide inhibiteur remplissant l'annulaire de la colonne qui sera suspendue à l'intérieur de cette structure. Il y a là une fragilité architecturale importante qui pourra devenir ultérieurement la source de désordres potentiels.

Un autre exemple moins critique mais plus fréquemment rencontré est celui où le recouvrement entre la base de la colonne 18"5/8 et la DV du tubage 9"5/8 est inexistant ou bien trop faible. Dans l'exemple proposé ci-après, il n'est que de 4,9 m. Un tel recouvrement n'est pas suffisant

pour garantir la sécurité de la base de la chambre de pompage lorsque les cimentations sont de mauvaise qualité.

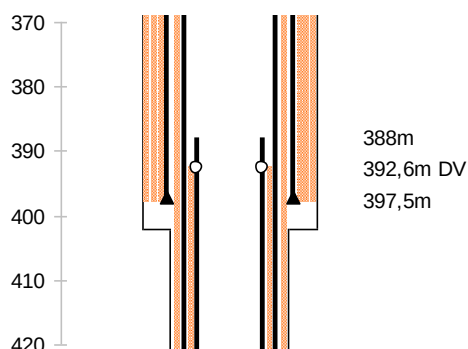


Schéma de la base de la chambre de pompage
Noir : colonnes 18"5/8, 13"3/8 et 9"5/8
Orange : annulaires cimentés

1.3 Positionnement des DV

Le positionnement des DV (Diverting Valve) servant aux cimentations réclame les mêmes attentions que le recouvrement des colonnes. Ce matériel est en effet constitué de pièces mobiles et de chemises coulissantes en aciers spéciaux permettant l'ouverture et la fermeture d'opercules contrôlant le passage vers l'annulaire : il est mécaniquement plus fragile que la colonne dans laquelle il est intégré et fait assez fréquemment l'objet de dysfonctionnement. Il est également plus sensible à la corrosion. Il convient donc, lorsque l'architecture le permet, de protéger les DV en les positionnant une cinquantaine de mètre à l'intérieur du tubage précédent.

Plus les diamètres sont importants, plus les DV sont sensibles aux contraintes mécaniques imposées par les trajectoires, ce qui réduit leur fiabilité opératoire. L'utilisation de DV à pilotage hydraulique associée au choix d'utiliser du matériel provenant de marques réputées a contribué à faire largement diminuer le nombre de dysfonctionnements constatés au cours de ces dernières années.

Un exemple de dysfonctionnement de DV a pu être observé en 2018 sur un forage de production en région parisienne. Sur ce forage, une colonne 13"3/8 a été installée au toit du Dogger (inclinaison 38,5°). Cette colonne a été cimentée en utilisant deux DV :

- une DV inférieure, de type hydraulique, placée dans le découvert à 1125,9 m, permettant la cimentation des deux premiers étages ;
- une DV supérieure, de type mécanique, placée dans l'entrefer vertical à 271,3 m, permettant de réaliser la chambre de pompage.

L'architecture spécifique du puits ne permettait pas de placer la DV inférieure à l'intérieur d'un entrefer. Elle se situe donc sans protection au milieu du découvert. Or cette DV n'a pas pu être refermée après son ouverture et les opercules sont restés ouverts. La continuité hydraulique de la colonne 13"3/8 n'est donc pas assurée au niveau de ce point singulier. Cela ne veut pas dire que le ciment injecté n'assure pas l'étanchéité de la zone, mais que cette anomalie représente pour le futur un point de faiblesse mécanique et une étanchéité potentiellement incertaine dans une zone ne présentant aucune autre protection externe.

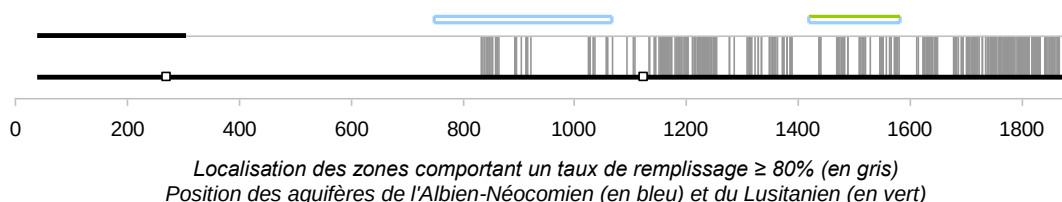
1.4 Pratique partielle du double tubage réglementaire

Dans le Bassin Parisien, la DRIEAT impose le plus souvent la présence d'un double tubage cimenté en face des aquifères de l'Albien et du Néocomien. Le but est de limiter le risque de pollution de ces aquifères stratégiques par des fluides géothermiques profonds pouvant transiter par l'intérieur des forages ou remonter par leurs annulaires. Certaines architectures alternatives proposent la mise en place d'un premier tubage cimenté, recouvert par un deuxième tubage (principalement en matériaux composites) librement suspendu à l'intérieur de celui-ci. L'annulaire entre les deux colonnes n'est alors rempli que par un fluide inhibiteur et se trouve en relation hydraulique directe avec le réservoir. Une telle pratique ne correspond pas pleinement à la règle du double tubage cimenté, mais peut néanmoins recevoir l'agrément des autorités.

Pour garantir la sécurité des aquifères concernés, ce type de structure implique d'assurer une étanchéité annulaire efficace sur l'unique colonne cimentée. Pour ce faire, il faut :

- empêcher les fluides des différents aquifères profonds (principalement Dogger et Lusitanien) de remonter dans l'annulaire ;
- isoler de la même manière les aquifères de l'Albien et du Néocomien des aquifères superficiels ;
- protéger au mieux l'extrados de la colonne contre la corrosion afin d'éviter de futures pertes d'étanchéité par perforations.

Une diagraphie de contrôle effectuée en 2018 sur la cimentation d'un tubage 13"3/8 a ainsi permis de constater qu'un seul de ces trois objectifs avait été atteint. Sur ce log, le remplissage annulaire par le ciment s'avère en effet probablement suffisant pour empêcher une remontée des fluides du Dogger et du Lusitanien vers l'Albien-Néocomien. Il ne détermine par contre aucune isolation effective au-dessus de 834 m. D'autre part la protection de l'extrados du tubage assurée par le remplissage de l'annulaire par le ciment n'apparaît véritablement efficace que sur 22% de la hauteur du découvert.



La protection attendue n'est donc pas obtenue. Dans le cas d'une architecture classique, la pratique du double tubage cimenté aurait très certainement conduit à une bien meilleure sécurisation des aquifères de l'Albien et du Néocomien.

2. DEVIATION ET CONTRÔLE DES TRAJECTOIRES

La programmation des trajectoires est principalement déterminée par la valeur du déplacement horizontal recherché. Cet objectif fondamental fait parfois oublier l'importance de facteurs annexes pouvant influencer fortement sur la réalisation des opérations de déviation et sur la qualité des trajectoires. En particulier :

- le choix d'un gradient de prise d'angle adapté aux terrains concernés ;

- les paramètres fixés pour réaliser la traversée des formations clastiques fragiles de l'Albien et du Néocomien ;
- la détermination de la cible et l'utilisation des tolérances d'accès.

2.1 Choix du gradient de prise d'angle

Sur les forages d'injection, en l'absence d'une chambre pompage, il est possible d'envisager un démarrage plus précoce de la déviation. Dans un tel cas, l'amorce de la déviation (KOP, Kick-Off Point) va se situer dans des formations superficielles peu indurées.

Deux des architectures analysées prévoyaient ainsi un KOP à 220 m en gros diamètre (18"1/2) avec un gradient de prise d'angle de 1°/10 m jusqu'à environ 700 m.

Les travaux réalisés ont montré :

- sur le premier puits : KOP à 217 m, obtention d'un gradient moyen de 0,49°/10 m jusqu'à 494 m, puis de 1,33° jusqu'à 774 m.

sur le deuxième puits : KOP à 218 m, obtention d'un gradient moyen de 0,47°/10 m jusqu'à 283 m, puis de 1,05°/10 m jusqu'à 601 m.

Dans les deux cas, il a été impossible de dépasser un gradient de 0,50°/10 m à l'initialisation de la déviation. La cause principale tient au manque de cohérence des formations superficielles, cause qui a été encore aggravée sur ces ouvrages par le diamètre important de la phase concernée.

Le choix d'un gradient de prise d'angle inadapté aux formations traversées entraîne le plus généralement un retard dans l'obtention du déplacement horizontal avec pour conséquence :

- soit une augmentation du niveau d'inclinaison - rarement souhaitable - afin de rattraper ce retard ;
- soit un déplacement final au niveau de la cible inférieur à celui attendu, ce qui n'est généralement pas non plus souhaité.

2.2 Traversée des formations clastiques

Les formations clastiques de l'Albien et du Néocomien sont connues pour être particulièrement fragiles et instables. Les risques de collage et de coincement y sont particulièrement élevés. Outre le contrôle appliqué aux fluides et aux paramètres de foration, les recommandations qui sont faites pour limiter ces risques sont :

- de traverser ces formations en phase de déviation stabilisée ;
- et de limiter dans cette zone l'inclinaison à une valeur maximale de 35°.

Toutefois ces recommandations influent directement sur les paramètres de la trajectoire et ne peuvent malheureusement pas toujours être appliquées.

Les trajectoires prévisionnelles envisagées sur 3 ouvrages au Dogger en gros diamètre prévoyaient la traversée des formations de l'Albien et du Néocomien en phase stabilisée, avec des inclinaisons de 48°.

Le premier forage a été réalisé en diamètre 18"1/2 jusqu'à 1249 m de profondeur avec une inclinaison atteignant un maximum de 47,3° au droit des formations clastiques de l'Albien et du

Néocomien. A la fin de cette phase, pendant les opérations de contrôle du forage, la trajectoire a été perdue, avec d'abord un coincement puis une rupture de la garniture de forage. Les tentatives d'instrumentation qui ont suivi ont conduit à abandonner le train de tiges, à reboucher le trou foré et à reprendre la phase à partir de 304 m sur la base d'un nouveau programme de déviation (side-track). Ce side-track a été exécuté de 304 m à 1117 m de profondeur, avec une inclinaison maximale limitée à $35,5^\circ$ au droit des formations de l'Albien et du Néocomien. La colonne 16" a alors pu être mise en place et cimentée entre la surface et 1113,8 m de profondeur.

Le programme de déviation du deuxième forage a alors été aménagé pour ne pas dépasser 38° d'inclinaison dans la zone concernée. En dépit de cette modification, la stabilisation au droit des formations de l'Albien et du Néocomien a été difficile avec, dans cette zone, un DLS moyen atteignant la valeur élevée de $0,53^\circ/10\text{m}$, démontrant la forte instabilité de la trajectoire.

Le troisième forage du projet a également été modifié afin de ne pas dépasser 38° d'inclinaison dans les formations clastiques. Il a montré néanmoins les mêmes difficultés avec un DLS moyen de $0,48^\circ/10\text{m}$. Sur ce forage, les valeurs de DLS atteintes au cours des travaux dépassent largement la moyenne recommandée dans les zones stabilisées, valeurs qui devraient autant que possible rester inférieures à $0,30^\circ/10\text{m}$.

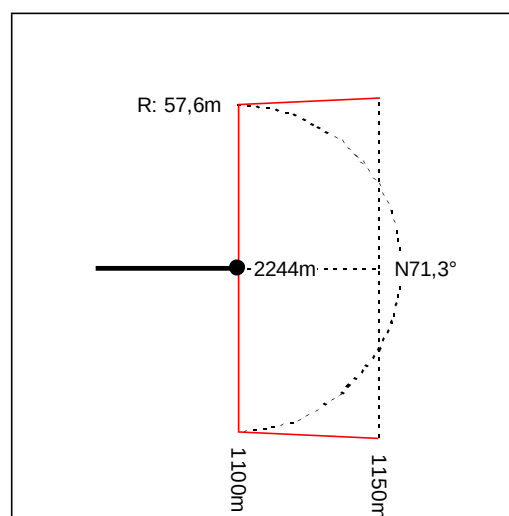
2.3 Détermination des cibles

La description des cibles n'apparaît malheureusement que très rarement dans les documents préparatoires à la réalisation des travaux.

En géothermie, une cible va être définie par :

- le déplacement horizontal souhaité au toit du réservoir capté.
- l'azimut du point d'impact par rapport à l'axe vertical du forage.
- les tolérances d'accès en déplacement et en azimut.

Les tolérances généralement admises dans les opérations géothermiques au Dogger sont de $0/+50\text{ m}$ en déplacement et de $\pm 3^\circ$ en azimut. La tolérance verticale (une dizaine de mètres) est le plus souvent négligée.



A partir du point ciblé, en appliquant les tolérances admises, on obtient au choix soit une surface de forme trapézoïdale, soit une surface de forme semi-circulaire. Le point d'impact de la trajectoire au toit du réservoir devra se situer à l'intérieur de cette surface.

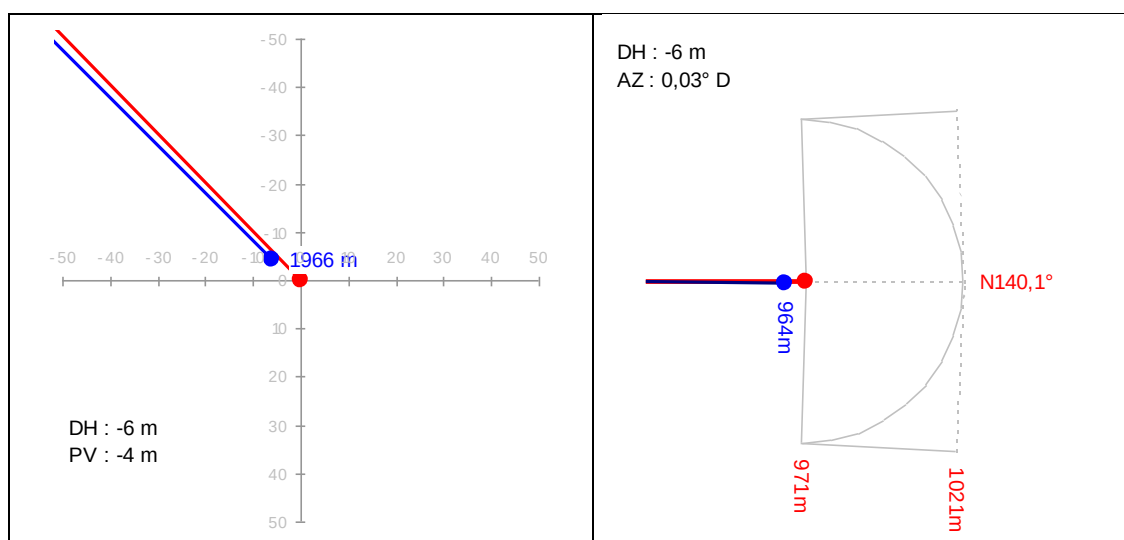
La tendance des opérateurs de déviation est de suivre au plus près la trajectoire théorique sans tenir compte des tolérances disponibles. Il en résulte :

- des corrections fréquentes de trajectoire, souvent préjudiciables à leur qualité ;
- un impact parfois anticipé par rapport au déplacement recherché. La cible est alors plutôt considérée comme circulaire que semi-circulaire, ce qui n'est pas une bonne réponse aux contraintes d'écartement de la géothermie.

Un tel scénario est bien visible sur un des forage réalisés en 2015 (voir graphiques ci-après).

- La précision du suivi de la trajectoire se montre excellente : en fin de déviation, l'écart entre la trajectoire prévisionnelle et la trajectoire réalisée est de 1,5 m et l'écart maximum observé sur l'ensemble du forage est de 16,8 m.
- L'impact du forage au toit du réservoir est situé hors de la cible, mais pratiquement au point visé : le déplacement horizontal n'est en effet inférieur que de 6 m au déplacement attendu.

La trajectoire s'avère par contre très fortement perturbée avec un indice TI de $0,40^\circ/10\text{ m}$ et un DLS moyen de la phase stabilisée qui atteint $0,51^\circ/10\text{ m}$ (recommandation : $< 0,30^\circ/10\text{ m}$).



Projection verticale (à gauche) et horizontale (à droite) de l'impact au toit du réservoir
Rouge : cible prévisionnel, *Bleu* : impact réel du forage

3. TUBAGES DE SOUTÈNEMENT ET COLONNES D'EXPLOITATION

Les tubages de soutènement et les colonnes d'exploitations font très rarement l'objet d'anomalie ou de défaut de conformité. Les seules observations fréquentes, mais dont l'impact est modeste, sont l'usage de la soudure afin de sécuriser le vissage des équipements de cimentation.

3.1 Les tubages

Du fait de leur contact direct avec le fluide géothermal, l'épaisseur des colonnes d'exploitation des ouvrages géothermiques est, la plupart du temps, arbitrairement surdimensionnée dans le but obtenir une meilleure résistance aux pertes de matière liée à la corrosion. La plupart du temps, ce sur-épaississement détermine de facto une résistance mécanique supérieure au niveau requis.

Les colonnes techniques, qui ne sont pas en contact direct avec le fluide géothermal, ne profitent pas d'un tel choix. Leurs caractéristiques mécaniques sont seulement calculées pour répondre aux contraintes rencontrées en cours de travaux (perte totale, éruption, cimentation) en considérant que ces contraintes deviennent négligeables lorsque la structure finale du puits est achevée.

Un seul cas de tubage inadapté a été enregistré depuis 2015 : il s'agit d'un forage de production novateur utilisant une colonne de soutènement de diamètre 13"3/8 placée au toit du Dogger, afin de maintenir en suspension libre une colonne de production en matériaux composites :

- dans le programme prévisionnel initial, la spécification de cette colonne était annoncée avec un poids nominal de 61 lbs/ft (épaisseur : 10,92 mm) ;
- lors des travaux, il a finalement été utilisé un tubage de poids nominal 54,5 lbs/ft (épaisseur : 9,65 mm) dont le diamètre intérieur plus important autorisait une plus grande tolérance de diamètre pour le passage de la colonne en composite.

Les spécifications mécaniques d'un tubage 13"3/8 de 54,5 lbs/ft sont nettement inférieures à celles recommandées en regard de la profondeur de l'ouvrage (1630 m en vertical) et des contraintes attendues au cours des opérations de cimentation. Dans un tel contexte, les risques d'incident sont élevés. A l'issue de la pose de cette colonne - dont la cimentation a d'ailleurs été laborieuse - diverses observations ont pu être faites :

- la DV inférieure positionnée à 1125,9 m n'a pas pu être refermée, ce qui pourrait indiquer qu'elle a subi des contraintes mécaniques élevées ;
- la diagraphie RCBL-VDL a dû être réalisée en deux passes. L'outil initialement descendu dans sa pleine configuration de centrage n'a pas pu passer à l'intérieur du tubage au-delà de 1124 m, ce qui indique une réduction probable du diamètre ;
- le multicaliper de contrôle du tubage 13"3/8 a montré la présence d'une ovalisation marquée (5% à 6%) du diamètre sur plus de 50 cm entre 1123,55 m et 1124,01 m ;
- les données géométriques du log ultrasonique IBC enregistré par Schlumberger ont confirmé la présence de cette anomalie.

Faute d'investigations complémentaires, il est difficile de déterminer la nature exacte et l'origine de l'ovalisation observée. On peut toutefois s'interroger sur la coïncidence que présente la constatation d'une telle anomalie en présence d'un tubage sous-dimensionné

3.2 Les filetages

Les filetages les plus fréquemment utilisés sont de type Buttress. Dans quelques opérations, on peut observer le choix de filetages de type GEOCON plus performants. En effet, comme dans le cas des filetages VAM, le jointage intérieur continu spécifique à ce type de raccord réduit les pertes de charges et empêche la formation de "niches à bactéries" entre les joints.

Il n'a jamais été observé d'anomalie significative impliquant les filetages au cours des opérations géothermiques du Bassin Parisien. Un seul cas de dévissage de tubage est enregistré en 2017 sur une colonne 18"5/8, mais il est impossible d'en déterminer les causes.

3.3 La soudure

Une pratique très fréquemment observée sur les chantiers est celle de sécuriser le vissage du matériel de cimentation (sabot, anneau, DV) par quelques points ou cordons de soudure. Cette méthode est efficace mais présente l'inconvénient de modifier localement les caractéristiques métallurgiques de l'acier. Celui-ci peut alors devenir ponctuellement plus sensible aux effets de la corrosion et mécaniquement plus fragile.

Sauf obligation incontournable, il est recommandé de proscrire les soudures de chantier effectuées sur des éléments de colonne descendus en fond de puits. Des solutions alternatives existent, comme le "BakerLok thread locking compound" qui est une résine pour filetage totalement adaptée aux conditions rencontrées dans les forages géothermiques profonds.

4. LE CENTRAGE DES COLONNES

Le centrage insuffisant des colonnes (note technique n°034) est un des défauts les plus fréquemment observés sur les forages géothermiques profonds. Il concerne chacune des colonnes constituant un puits, que cette colonne soit purement technique ou servant à la production. Ce défaut se montre bien entendu beaucoup plus marqué sur les puits fortement inclinés et sur les tubages en gros diamètre.

De nombreux facteurs sont en causes :

- le premier, et peut-être le plus important, est l'absence quasiment systématique d'une étude préalable des contraintes de centrage dans les programmes prévisionnels de forage ;
- le niveau d'inclinaison des ouvrages et la qualité des déviations joue bien évidemment un rôle majeur. Les défauts de centrage ne pourront qu'être accentués par le degré d'inclinaison et par de fortes variations de trajectoire ;
- les tubages en gros diamètre sont nécessairement plus difficiles à centrer en raison de leur poids et de leur rigidité. Dans les faits, on constate par exemple qu'il s'avère impossible de centrer avec efficacité un tubage 13"3/8 en n'utilisant que des centreurs standards. La tendance actuelle à vouloir réaliser des architectures en très gros diamètre (tubage de diamètre supérieur à 9"5/8 au toit du Dogger) entraîne des contraintes de centrage qui deviennent difficiles à maîtriser en utilisant uniquement des moyens conventionnels. L'usage de centreurs renforcés ou spéciaux (comme par exemple les centreurs rigides pour open-hole de type "SpiraGlider") devient dans un tel cas obligatoire ;
- enfin le choix du matériel de centrage est décisif : le type des centreurs et leurs spécifications mécaniques et métallurgiques vont déterminer la qualité du centrage et, dans certains cas, la réelle faisabilité du concept architectural retenu.

4.1 Plans de centrage

Les programmes prévisionnels de forage font très rarement mention des objectifs, conditions et matériel de centrage à mettre en œuvre au cours des travaux. Il est encore plus rare d'y trouver un plan de centrage documenté, calculé sur la base de l'architecture proposée.

L'analyse préalable des contraintes de centrage attendues est pourtant fondamentale pour déterminer le type des centreurs à mettre en œuvre et leurs spécifications. Cette analyse permet également d'estimer la quantité de centreurs à installer sur chacun des tubages.

On peut à la rigueur comprendre cette absence d'information dans le cas d'une architecture standard (colonne 9"5/8 au Dogger, inclinaisons inférieures à 40°) dans lesquelles les contraintes de centrage sont suffisamment connues pour permettre une estimation acceptable de l'approvisionnement du matériel (type et quantité). Ce n'est pas le cas des architectures "alternatives" ou "novatrices" comportant des tubages en très gros diamètre ou des phases plus fortement inclinées ou sub-horizontales.

Les exemples récents sont les architectures alternatives en gros diamètre (tubage 10"3/4 au Dogger) dont les plans de centrage n'ont pas été suffisamment étudiés. Dès le début des travaux, le matériel de centrage proposé est apparu inadapté aux conditions observées. Ce défaut a été aggravé par :

- des trajectoires en gros diamètre qui se sont montrées particulièrement difficiles à contrôler ;
- l'impossibilité par la suite de modifier le matériel de centrage au cours du projet compte tenu des conditions contractuelles du chantier.

La qualité de la cimentation des colonnes de l'ensemble des forages a été in fine sérieusement impactée par ce défaut initial de programmation.

Les architectures "novatrices" sont un autre exemple montrant l'absence de prise en compte des contraintes de centrage. Dans l'une de ces architectures, il s'agit d'installer un tubage 13"3/8 au toit du Dogger avec une inclinaison moyenne de 38,5°. Le plan de centrage initial proposé dans le PER-DOTEX - assez peu réaliste et mal documenté - indiquait deux centreurs souples tous les 3 tubes (espacement de 18 m). Celui qui a finalement été appliqué (un centreur souple par tube, soit un espacement de 12 m) n'a lui-même pas permis d'éviter d'importants phénomènes de chenalisation. Le calcul théorique montre effectivement que la seule utilisation d'un matériel de centrage standard ne permet pas de centrer correctement une colonne 13"3/8 dans de telles conditions tout en conservant sa manœuvrabilité. Pour pouvoir être valide, il est clair que ce concept architectural nécessiterait la mise en œuvre d'un matériel de centrage non conventionnel.

4.2 Qualité des trajectoires

La qualité finale des trajectoires et la géométrie du trou foré sont des paramètres qui vont fortement influencer l'efficacité du centrage. C'est pourquoi il convient d'actualiser et de valider systématiquement les plans de centrage avant leur mise en œuvre en y intégrant la trajectométrie réelle des puits et les données géométriques de diamétrage (log Caliper XY).

Il est extrêmement rare de constater l'application de cette pratique. Cela ne veut pas dire qu'elle n'est jamais mise en œuvre, mais seulement qu'il n'y a quasiment aucun document de chantier faisant mention de cette actualisation. Il faut bien malheureusement préjuger que cette absence d'information reflète une carence fréquente dans ce domaine.

4.3 Diamètre des tubages

La mise en œuvre de tubages en gros diamètre augmente les contraintes de centrage. La tendance actuelle à vouloir réaliser des architectures en gros diamètre (supérieur à 9"5/8 au toit du Dogger) impose des contraintes de centrage qui deviennent difficiles à maîtriser en utilisant uniquement des moyens conventionnels.

L'espacement des centreurs, ainsi que leur nombre, est limité par la capacité à pouvoir manœuvrer librement la colonne. Avec des centreurs souples standard, la limite est approximativement de 1 centreur par tube (soit un espacement moyen de 12 m) pour un tubage 9"5/8 incliné à 40°. Pour pouvoir dépasser cette limite, il faut utiliser du matériel spécifique.

Les tubages plus lourds et plus rigides que les tubages de diamètre 9"5/8 nécessitent des capacités de centrage plus performantes que celles proposées par le matériel standard. Avec ce type de colonne il convient donc, le plus généralement, de prévoir des centreurs non conventionnels.

Sur un forage réalisé en 2019, le plan de centrage initial de la colonne 10"3/4 (centreurs souples standards) a été sérieusement amélioré par l'introduction de 46 centreurs de type SpiraGlider provenant d'un stock résiduel disponible sur une autre opération. L'avantage décisif des centreurs SpiraGlider est leur structure rigide. Ils ne subissent pas en effet le phénomène de compression - décompression provoqué par les changements de flottabilité du tubage au cours du processus de cimentation. Lorsque la géométrie du trou foré est suffisamment constante, ils permettent d'éviter les chenalisations et pollutions du laitier qui résultent de la déformation des centreurs souples.

Sur le puits suivant, le plan de centrage de la colonne 10"3/4 a également pu être modifié, en introduisant cette fois-ci 18 centreurs souples renforcés de type Bow-L-Double. Ce type de centreur permet un gain de 20% sur la résistance à la compression. Cette modification a malheureusement été insuffisante pour assurer un centrage efficace de la colonne.

4.4 Spécifications du matériel de centrage

Les spécifications du matériel de centrage n'apparaissent généralement pas dans les différents documents techniques disponibles, ce qui interdit toute vérification préalable des plans de centrage et de la faisabilité de l'architecture proposée. Les informations suivantes devraient a minima être systématiquement fournies :

- le type des centreurs, leur référence et leur métallurgie ;
- le diamètre maximum (ouverture totale) et minimum (compressé) ;
- la résistance à la compression (restoring force RF) pour un standoff de 67% (norme des tests API) ou pour le standoff correspondant au diamètre nominal du trou foré ;
- les forces de frottement induites (starting force et running force).

Ce défaut d'information est observé de façon quasi-systématique.

Dans les complétions des forages captant des réservoirs clastiques (Albien, Néocomien), il a également été constaté l'usage fréquent de centreurs en acier inoxydable. L'usage de ce type de centreurs est très clairement une aberration qu'il convient d'éviter, que ce soit dans les puits déviés ou dans les puits verticaux (qui sont en général plutôt sub-verticaux). L'acier inoxydable ne dispose pas en effet d'une élasticité suffisante pour répondre à de fortes contraintes. Fortement sollicité, un centreur en acier inoxydable se déformera de façon définitive (destruction

de forme), ou sera arraché et détruit. Ce fut en particulier le cas sur un forage du bassin aquitain dont la réalisation du captage a été fortement perturbée par ce choix inadéquat.

5. LES CIMENTATIONS

La conformité, la pérennité et la sécurité des ouvrages dépendent principalement du succès des opérations de cimentation. Un tubage bien cimenté assure l'étanchéité de l'annulaire, interdit toute migration verticale des fluides dans cet espace et contribue à éviter la contamination entre nappes. Une gaine de ciment de bonne qualité assure également la protection du tubage lui-même, en renforçant sa résistance mécanique et en protégeant son extrados des effets de la corrosion.

La qualité des cimentations dépend de très nombreux facteurs. On peut même considérer que chacune des activités nécessaires à la construction d'un forage a un effet direct ou indirect sur les opérations de cimentation. Ainsi les diamètres de forage, la géométrie du trou, la trajectométrie, le centrage des colonnes ont un grand rôle, mais aussi l'hydraulique de pompage, les fluides de forage et la rhéologie des laitiers de ciment.

Le bon fonctionnement du matériel de cimentation utilisé (tête de cimentation, bouchons, sabot, anneau, DV) joue également un rôle important dans le succès d'une opération.

Enfin, lorsque le laitier de ciment a été pompé et mis en place dans l'annulaire, il convient d'attendre le temps nécessaire pour qu'il fasse prise sans perturber ce processus par d'autres opérations.

5.1 Les opérations de cimentation

Les opérations de cimentation consistent à déplacer de façon efficace la totalité (autant que possible) de la boue de forage présente dans un annulaire pour la remplacer par du laitier de ciment. Pour obtenir ce résultat, il s'agit autant que possible de ne pas laisser à la boue la possibilité de résister à ce déplacement ni de laisser celle-ci se mélanger au laitier en le polluant. Pour ce faire, il s'agit :

- de disposer d'un annulaire géométriquement aussi régulier que possible ;
- de choisir la rhéologie des différents fluides concernés et une hydraulique de pompage adaptées aux conditions du forage ;
- de séparer suffisamment les fluides (spacer) pour limiter les mélanges.

Il est assez rare d'observer d'importantes anomalies au cours des opérations de pompage du laitier. Celles-ci sont en effet planifiées et généralement scrupuleusement organisées par les opérateurs de cimentation. Les principaux défauts constatés sont :

- des difficultés liées à l'obtention de la densité requise au cours de la fabrication du laitier, provenant de variations inhabituelles dans le gâchage continu du ciment ;
- des pannes affectant le circuit de pompage ;
- la qualité (détérioration) du ciment stocké dans les silos ;
- une formulation du laitier pouvait s'avérer inappropriée ou comportant une part trop importante d'eau libre (cas de certains laitiers allégés).

Ce dernier point, par exemple, a été observé en 2020 sur les tubages 20" et 16" d'un forage de production. Au lieu de mettre en place un laitier allégé à la pouzzolane (type PozzMix) l'opérateur

Schlumberger a injecté un laitier standard suffisamment additionné de bentonite pour lui conférer la densité attendue de 1,61.

Dans cette formulation particulièrement "aqueuse", outre une perte significative de la résistance mécanique du ciment, la proportion importante d'eau de gâchage favorise le relargage de liquide au cours du processus de prise du ciment et sa rétention par la bentonite elle-même. Lorsque du liquide reste ainsi piégé dans la matrice de ciment, il influe notablement sur la qualité observée au moyen des logs de cimentation. Sur les deux tubages, les logs de contrôle ont clairement confirmé d'importants défauts qualitatifs.

Les raisons ayant conduit Schlumberger à utiliser de la bentonite à la place de la pouzzolane n'ont pas été communiquées. Les quelques informations disponibles semblent toutefois indiquer que ce choix a tout simplement été dicté par son incapacité à fournir de la pouzzolane au moment des travaux.

Une anomalie fréquemment observée en gros diamètre, pouvant perturber la qualité des cimentations, est la constatation d'une pollution par gravité entre deux laitiers de densité différente. C'est le cas habituel des cimentations débutant par le pompage d'un laitier allégé de densité 1,20, suivi par un laitier lourd de densité 1,90. Le plus souvent, aucune séparation entre les deux laitiers n'est généralement prévue (mécanique ou spacer). Le laitier lourd va pouvoir "plomber" par simple gravité dans le laitier allégé, ce qui entraîne la pollution d'un volume plus ou moins important des deux laitiers et une dégradation de la densité des matériaux observée dans l'annulaire. L'importance de cette pollution va dépendre :

- du diamètre intérieur du tubage : plus le diamètre sera important, plus le mélange sera facile et rapide ;
- de la rhéologie des deux laitiers en présence ;
- de la durée de l'opération de déplacement (pompage).

5.2 Le matériel de cimentation

Le déroulement nominal des opérations de cimentation est nécessairement soumis au bon fonctionnement du matériel de cimentation. La fiabilité de ce matériel est généralement proportionnelle à son diamètre et fonction de son origine (réputation du fabricant).

Les principaux problèmes rencontrés concernent :

- des anomalies dans le largage des bouchons séparateurs ;
- des clapets anti-retour inopérants ;
- le dysfonctionnement de certaines DV.

Les fortes contraintes mécaniques (torsion, vrillage) subies au cours de la descente du tubage dans les puits fortement déviés peuvent en effet endommager les meilleures DV au point de les rendre partiellement ou totalement inopérantes. Les DV en gros diamètre sont particulièrement sensibles à ces contraintes. Il a été constaté toutefois au fil des ans que les DV à fonctionnement hydraulique choisies dans les marques les plus réputées, bien que beaucoup plus coûteuses, apportaient un net gain de fiabilité.

On a déjà mentionné plus haut dans ce rapport, le dysfonctionnement d'une DV de diamètre 13"3/8 dans un forage de production. Cette DV, une fois ouverte, n'a pas pu être refermée. Il s'agit pourtant d'une DV hydraulique d'excellente qualité, mais qui a probablement subi des contraintes mécaniques élevées au cours de sa descente dans le puits.

5.3 La durée des attentes de prise du ciment

Une durée insuffisante de l'attente de prise du ciment (WOC, Wait On Cement to dry) est certainement le défaut le plus fréquemment observé au cours des opérations de cimentation. Ce défaut n'influe pas directement sur la cimentation elle-même, mais sur la qualité apparente de celle-ci lors des mesures de contrôle (fracturation, microannulaire).

La durée des attentes a fait l'objet d'une note technique (N° 042) dans le guide des bonnes pratiques détaillant les conditions à respecter pour que cette durée soit efficace. Il est toutefois assez rare de constater l'application intégrale de cette note.

La durée minimale de l'attente de prise du ciment (WOC efficace) peut être très largement atteinte et dépassée lorsqu'une méthode de skidding phase par phase est utilisée. Dans un tel contexte, la conformité de l'attente est généralement totale. Mais, même dans un tel cas, il arrive parfois que certaines opérations viennent perturber les conditions de prise.

Ce fut le cas à la fin de la cimentation d'une colonne de production au Dogger en 2020. Un test d'intégrité du casing à 140 bars pendant 30 minutes a en effet été effectué juste après la fermeture de la DV. Réaliser un test d'intégrité à ce stade des opérations - alors que le ciment est en cours de prise - n'est pas judicieux : le gonflement-dégonflement du tubage sous pression peut favoriser le décollement de la gaine de ciment et la formation d'un micro-annulaire. Ce test aurait pu être reporté sans inconvénient à la reprise de la phase suivante.

6. LES COMPLETIONS

Contrairement aux formations indurées cohérentes comme le Dogger, le captage des formations clastiques tendres (principalement Albien, Néocomien) ou gréseuses (Trias) nécessite la mise en place de complétions crépinées. Dans la construction d'un forage, le choix du matériel de complétion et sa mise en œuvre sont souvent considérés comme faisant partie des opérations les plus délicates à réaliser.

Le choix des crépines et du massif de gravier est primordial. Il doit être strictement adapté à la granulométrie du réservoir capté. Mais cette granulométrie peut être localement mal connue au moment des travaux ou présenter localement de fortes hétérogénéités. Il s'agit d'un handicap majeur lors de l'établissement du plan de captage. Dans la plupart des cas, les délais de fabrication ne permettent pas en effet d'attendre la livraison de crépines exactement adaptées aux observations effectuées sur le puits.

Une autre difficulté tient au matériel de complétion lui-même qui est relativement fragile et dont la mise en œuvre est toujours délicate.

6.1 Choix du matériel

En ce qui concerne le choix du matériel, les principales anomalies observées concernent :

- des dysfonctionnements du système d'ancrage (liner-hanger). Le faible poids de la complétion, plus faible encore en puits déviés, ne fournit parfois pas les conditions requises pour un ancrage mécanique fiable. Trois cas de ce type ont pu être observés

ces dernières années. Sur ces trois forages, les outils d'ancrage (des liner-hanger single grip J slot) n'ont pas fonctionné et les complétions ont dû être posées en compression au fond du puits ;

- le choix du joint diélectrique permettant de raccorder le matériel en acier noir (matériel de suspension, tubes d'extension) à la colonne crépinée en acier inoxydable (crépines, tubes pleins). On peut considérer que ce matériel est sous-dimensionné *sur la totalité des ouvrages*, en ne proposant qu'un espacement de quelques millimètres entre les deux aciers. L'usage de joints diélectriques plus efficaces ou de tubes d'extension en matériaux composites n'est malheureusement pas encore une pratique reconnue par les opérateurs ;
- le choix des centreurs permettant de maintenir la complétion afin d'obtenir un remplissage régulier de gravier dans l'annulaire. On a déjà vu plus haut dans ce document que les centreurs en acier inoxydable sont à proscrire. Il existe des solutions alternatives : centreurs à lames en carbone, centreurs "sacrifiés" en acier. Il convient néanmoins de souligner la difficulté qu'il y a à centrer convenablement une colonne de complétion, tout particulièrement lorsque le réservoir fait l'objet d'un important élargissement (par exemple 16" pour une crépine 8"5/8), et plus encore lorsque le puits est dévié. Un centrage rigoureux est pourtant primordial pour assurer un massif filtrant homogène et efficace.

On peut considérer que le sinistre survenu sur l'un des trois forages cités plus haut est - du moins pour une part importante - le résultat de la présence de centreurs en acier inoxydable dans la complétion.

6.2 Réserve de gravier

Un défaut assez couramment observé dans les complétions concerne la disponibilité d'une réserve de gravier suffisante dans le but de compenser :

- dans un premier temps, l'inévitable tassement du massif de gravier au cours des opérations de développement des ouvrages ;
- par la suite, le réarrangement de la filtration et les pertes de matière souvent observées en cours d'exploitation en réponse à des variations de débit et à des à-coups de fonctionnement (arrêt / redémarrage des pompes).

La réserve de gravier est définie par le volume annulaire disponible au-dessus du premier tube crépiné. Elle doit correspondre à au moins 10% du volume total de gravier mis en place. D'autre part, en complément de ce volume minimum, une hauteur d'au moins de 24 m doit être assurée entre la crépine témoin et la première crépine servant au captage.

Le volume correspondant à la réserve de gravier est limité :

- avant le développement : par le niveau qu'atteint le gravier à la fin de l'opération de gravillonnage. Ce niveau correspond généralement à celui de la crépine témoin ;
- après le développement : le niveau initial du gravier est abaissé par le tassement du massif filtrant. Ce niveau peut être évalué au moyen d'un log de densité gamma-gamma. En fonction des résultats, un complément de gravier peut permettre de réajuster la réserve à son volume initial, ce qui permet de garantir la complétion contre les tassements ultérieurs au cours de l'exploitation.

Autant la réserve initiale de gravier avant développement est généralement respectée, autant la vérification du niveau après développement fait rarement l'objet d'un contrôle. Il est encore plus

rare de voir un opérateur réaliser un complément du volume de gravier avant la mise en production de l'ouvrage.

On peut considérer que *tous les ouvrages* faisant l'objet d'un gravillonnage présentent ce défaut. Ce qui laisse augurer, à long terme, de potentiels problèmes d'exploitation, bien que ceux-ci soient aujourd'hui occultés par des difficultés différentes.

6.3 Vitesse de passage de l'eau

Les effets induits par la vitesse d'entrée (ou de sortie dans le cas des forages d'injection) de l'eau dans le massif filtrant et les crépines apparaît comme un des problèmes majeurs affectant les captages crépinés. Les sur-vitesses pourraient également jouer un rôle central dans les désordres régulièrement observés sur les puits d'injection en milieu clastique.

La société Johnson, particulièrement experte et réputée dans le domaine des complétions, recommande que la vitesse d'entrée de l'eau dans les crépines soit la plus faible possible pour :

- se rapprocher du régime laminaire en pompage ;
- limiter les pertes de charge quadratiques dans le forage ;
- limiter la vitesse de colmatage des crépines ;
- empêcher l'entraînement des fines ;
- réduire les coûts de production et de maintenance.

Johnson préconise une vitesse d'entrée inférieure à 3 cm/s en tout point de la complétion. D'autres spécialistes recommandent de limiter - autant que possible - cette vitesse maximale à 1 cm/s (Solages, 1979; Ungemach, 2003).

La difficulté majeure pour appliquer ces recommandations provient des réservoirs qui présentent souvent de très fortes hétérogénéités de production. Dans un tel cas, afin d'éviter de dépasser la vitesse critique de 3 cm/s en tout point de la complétion, il convient de choisir comme référence le niveau le plus producteur. On constate alors assez souvent que le débit maximum disponible pour ces conditions chute à des niveaux incompatibles avec une exploitation rentable de l'ouvrage.

Ce cas a été en particulier observé en 2018 sur quatre forages à l'Albien dont la productivité du réservoir apparaît fortement hétérogène. Comme on peut le voir dans le tableau ci-après, le bilan des débits disponibles pour une vitesse maximale de 3 cm/s est particulièrement pénalisant :

- en mode de production (coefficient d'ouverture CO de 21,9%), seul le troisième forage permet d'atteindre le débit souhaité de 200 m³/h sans survitesse excessive.
- en mode d'injection (coefficient d'ouverture CO de 12,6%), aucun forage n'autorise ce débit.

	Niveau le plus producteur	% du débit total	Production (CO 21,9%)	Injection (CO 12,6%)
Forage1	0,5 m	11%	86 m ³ /h	50 m ³ /h
Forage 2	0,3 m	4,29%	133 m ³ /h	76 m ³ /h
Forage 3	0,8 m	7,4%	205 m ³ /h	118 m ³ /h
Forage 4	0,4 m	5,36%	141 m ³ /h	81 m ³ /h

Il s'agit probablement d'une des causes qui pénalisent le plus l'exploitation à débit élevé des réservoirs clastiques.

7. LES OPERATIONS DE DEVELOPPEMENT

Le développement du réservoir est une opération préalable indispensable à sa mise en exploitation d'un forage.

Dans le cas du Dogger, cette opération est particulièrement réduite : il s'agit simplement de nettoyer le réservoir des débris et produits résiduels de forage. L'opération de développement consiste à injecter sous pression un ou plusieurs bouchons d'acide successifs suivi par des dégorgements qui vont nettoyer et stimuler le réservoir. A ce stade, le développement est généralement considéré comme suffisant. Il se finalise par lui-même, sans intervention spécifique, lors de la mise en production de l'ouvrage à son débit nominal d'exploitation. Il est rare de constater des anomalies lors de telles opérations. Quelques cas ont toutefois imposé des acidifications complémentaires spécifiques.

Dans le cas des formations clastiques (Albien et Néocomien), les opérations de développement deviennent beaucoup plus complexes et délicates : il s'agit de permettre très progressivement au massif de gravier et aux terrains aquifères les plus proches de déterminer une interface de filtration efficace afin d'assurer le débit d'exploitation souhaité. A la fin des opérations le forage doit débiter une eau claire et se montrer conforme aux recommandations de la fiche technique n°081.

D'autre part, dans le cas des formations hétérogènes, le développement doit parallèlement avoir pour but d'améliorer la productivité des niveaux les moins producteurs. L'objectif est de mieux répartir les écoulements sur toute la hauteur du captage afin de réduire les vitesses d'entrée de l'eau dans les crépines.

Pour être efficace, le développement doit être progressif. Il est généralement suggéré de pratiquer le développement par étape de 30 m³/h, en s'assurant d'obtenir à chacune des étapes la turbidité requise (4 NTU au maximum) avant de passer au débit suivant.

Les développements des formations clastiques sont rarement effectués en respectant ces règles de base. Ce qui entraîne très souvent des désordres lors de la mise en production des ouvrages. Un tel défaut a pu être observé sur certains forages à l'Albien, interdisant - du moins provisoirement - leur mise en exploitation.

Les opérations de développement initiales des ouvrages se montrent en effet souvent notablement insuffisantes malgré leur bonne productivité. Du fait notamment :

- une durée trop courte des opérations de développement effectuées avec les moyens de la machine de forage, le plus souvent largement inférieures à 72 heures. Cela implique que des développements complémentaires ne pourront se faire que par pompage ou nécessiteront l'intervention d'une machine de servicing ;
- une progressivité insuffisante des débits, ce qui est peu favorable à l'obtention d'un grano-classement efficace du massif filtrant ;
- pas de mesures de la turbidité mais uniquement de la teneur en sable par élutriomètre et la mesure de la quantité de particules sédimentées par cône Imhoff, ce qui est nettement insuffisant ;
- le constat de pertes de charge quadratiques élevées au cours des essais. Ces pertes de charge sont probablement le fait d'écoulements fortement turbulents à l'entrée des crépines ;
- pas de développement ciblé permettant d'améliorer les zones les moins productrices.

8. CONCLUSION

Les pistes conduisant à une amélioration qualitative de la construction des forages se montrent nombreuses. Certaines sont faciles à mettre en œuvre et ne demandent finalement que de solliciter l'attention des opérateurs concernés afin qu'ils portent une plus grande attention à utiliser des modes opératoires adaptés à la géothermie et aux spécificités du projet (diamètre de forage, inclinaison, etc...). D'autres nécessitent que soit réalisée une analyse préalable plus fine des opérations sensibles. D'autres enfin sont beaucoup plus complexes et peuvent impliquer des surcoûts de réalisation qui vont paraître inquiétants aux Maîtres d'Ouvrage. Le plus souvent pourtant, ces surcoûts seront négligeables par rapport aux dépenses induites ultérieurement par les conséquences d'un éventuel défaut dans la construction des ouvrages.

Les architectures nouvelles ou novatrices sont particulièrement sensibles - ce qui est bien normal - à des anomalies de conception et à des défauts de construction. Il convient donc de vérifier avec encore plus d'attention que ces projets sont valides et mettent en œuvre tous les moyens nécessaires pour garantir des ouvrages de qualité.

Les formations clastiques posent actuellement un véritable problème d'exploitation, problème qui peut encore être compliqué par des défauts de réalisation. La recherche de la qualité s'impose donc tout particulièrement quand il s'agit de réaliser des ouvrages de ce type, particulièrement complexes.

Enfin de nouveaux matériaux s'invitent - bien heureusement - dans certaines architectures. Il convient de ne pas risquer de disqualifier ces innovations par des défauts de construction ou des anomalies qui pénaliseraient leur usage.



**Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr