

17 mars 2015

FICHE TECHNIQUE 021

STRUCTURE DES FORAGES

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. Éléments 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, 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 DRIEE ;
- 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 particulièrement 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.**

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

- l'intégrité mécanique et hydraulique des tubages de production, par exemple, doit être préservée : il n'est pas 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, approvisionnement en eau, environnement, 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 puits afin d'obtenir un temps de percée thermique adéquat entre les puits de production et les puits de réinjection. 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.

Plusieurs cas 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 généralement effectuée dans la partie verticale du puits, quelques mètres au-dessus d'une DV :
 - le recouvrement doit être au minimum de 100 m lorsque la coupe a lieu à plus de 300 m de profondeur,
 - avec une coupe à moins de 300 m de profondeur, le recouvrement doit être au minimum de 80 m si aucune cimentation complémentaire ne peut être facilement envisagée,
 - toujours à moins de 300 m de profondeur, le recouvrement doit être d'au moins 50 m si une cimentation complémentaire peut être facilement envisagée.

Récapitulatif :

Type de colonne	Recouvrement minimal
Colonne suspendue par liner-hanger	100 m
Colonne coupée à plus de 300 m	100 m
Colonne coupée à moins de 300 m, cimentation complémentaire difficilement envisageable	80 m
Colonne coupée à moins de 300 m, avec cimentation complémentaire possible	50 m

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 sera 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 m3/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 m3/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.

En retenant la valeur maximale des deux approches, il est possible de proposer les débits limites 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 475 m3/h
- Tubage 13"3/8 : jusqu'à 870 m3/h

Il est bien évident que ces débits peuvent 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").

6. 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 des diamètres, le positionnement des tubages, le recouvrement entre colonnes, le positionnement des DV doivent être choisis 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.

Programmer un forage avec une structure adaptée et optimisée apparaît comme un préalable nécessaire si l'on souhaite assurer la qualité des ouvrages. Même si ce préalable est insuffisant en lui-même. Il est bien entendu que réaliser par la suite des travaux de qualité sera 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.