

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <http://www.researchgate.net/publication/259997753>

Application des techniques de forage slimhole pour la prospection des aquifères profonds

ARTICLE in ECLOGAE GEOLOGICAE HELVETIAE · JANUARY 1997

Impact Factor: 0.62

DOWNLOADS

53

VIEWS

36

1 AUTHOR:



[François-D Vuataz](#)

Université de Neuchâtel

86 PUBLICATIONS 403 CITATIONS

SEE PROFILE

Application des techniques de forage slimhole pour la prospection des aquifères profonds

FRANÇOIS-D. VUATAZ¹

Key words: Slimhole, corehole, microdrilling, penetration rate, exploration cost, drilling cost, flow test, geothermal exploration

Mots-clés: Slimhole, forage carotté, micro-forage, vitesse de pénétration, coût d'exploration, coût de forage, test de production, prospection géothermique

*«A slimhole becomes a smart hole»
Murray et al. 1993*

RESUME

Le but de cette étude est de présenter la technique de forage de type slimhole, et d'évaluer sa faisabilité pour la prospection des ressources géothermiques. Le terme de forage slimhole n'a pas de définition univoque, mais il s'agit d'un forage dont le diamètre dans la zone de production est sensiblement inférieur à celui d'un forage conventionnel de production. L'étude est basée sur une recherche bibliographique au cours de laquelle six bases de données informatisées ont été interrogées.

Les différentes techniques slimhole à disposition sont les suivantes: carottage continu, rotary, forage au moteur à boue avec tubage enroulé, marteau fond-de-trou et circulation inverse (marteau et tricône). Dans les domaines de la prospection minière et pétrolière, toutes les méthodes de forage slimhole ont été utilisées. En géothermie, c'est essentiellement au Japon et aux USA que la technique slimhole est la plus pratiquée. Tous les types d'environnements géologiques et toutes les roches ont été traversés par des forages slimhole, quant à la profondeur, il n'y a pas de limite dans le domaine qui intéresse la géothermie, puisque le carottage continu peut atteindre 3000 à 4000 m, et même 6000 m dans des cas extrêmes.

L'intérêt du forage slimhole est tout d'abord économique: toutes les comparaisons effectuées entre le forage conventionnel et la technique slimhole montrent un net avantage pour cette dernière. De manière générale, l'abaissement du prix d'un forage slimhole vient d'une réduction globale sur tous les postes. L'impact sur l'environnement est aussi fortement réduit. Chacune des techniques slimhole est caractérisée par une série d'avantages et d'inconvénients, mais les défauts majeurs du forage slimhole ont été progressivement éliminés, notamment la vitesse moyenne d'approfondissement, qui peut atteindre actuellement celle obtenue par un forage rotary de grand diamètre.

La question essentielle est la capacité du forage slimhole à devenir un forage de production, dans le cas où un réservoir est atteint. Des études expérimentales ont montré que pour un débit de l'ordre de 60 m³/h, il suffisait d'avoir un diamètre dans la zone de production entre 89 et 127 mm (3½" et 5"). Une analyse comparative des coûts de forage montre que la technique slimhole permet des économies de 25 à 50%, parfois davantage, selon le site, le type, le nombre et la profondeur des forages.

ABSTRACT

The aim of this study is to present the slimhole drilling technology and to evaluate its feasibility for the exploration of geothermal resources. There is no uni-

vocal definition of the term slimhole, but it concerns any borehole whose diameter of the production zone is notably smaller than the one in a conventional production well. This study is based on a bibliographical review, during which six data bases were interrogated.

The following slimhole techniques can be used: continuous coring, rotary, mud motors with coiled tubing, downhole hammer and reverse circulation (hammer and rotary bit). In the fields of ore and oil exploration, all the slimhole methods have been used so far. For geothermal prospection, Japan and the USA are the countries where the slimhole technique has been mostly practiced. All geological environments and rock types have been drilled by slimholes, while there is no depth limit for geothermal slimholes: coreholes can indeed reach 3000 to 4000 m, or even 6000 m in extreme cases.

The first and main interest of the slimhole drilling is economic: all the comparisons carried out between the conventional borehole and the slimhole favour the latter one. Usually, the lower cost of a slimhole results from a global reduction on all the drilling activities. Moreover, the environmental impact of a slimhole is also strongly reduced. Each of the slimhole techniques is characterized by a series of advantages and drawbacks, but the major problems have been progressively solved, in particular the average penetration rate, which can presently reach the one obtained by large diameter conventional rotary boreholes.

The main question to be answered is how the exploration slimhole may be changed into a production well, in case an aquifer has been discovered. Experiments have shown that for a discharge of 60 m³/h, a diameter in the production zone between 89 and 127 mm (3½" and 5") is adequate. A cost analysis indicates that the slimhole technique allows savings of 25 to 50%, sometimes more, according to the drilling site and method, the number and depth of the wells.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieser Studie ist es, die Slimhole-Bohrtechnik vorzustellen und ihre Anwendungsmöglichkeiten bei der Prospektion geothermischer Ressourcen zu beurteilen. Für die Bezeichnung Slimhole-Bohrung gibt es keine strikte Definition. Es handelt sich jedoch in jedem Fall um eine Bohrung, deren Durchmesser in der Produktionszone deutlich geringer ist als derjenige eines konventionellen Förderbrunnens. Für die vorliegende Literaturstudie wurden sechs bibliographische Datenbanken abgefragt.

Die verschiedenen verfügbaren Slimhole-Bohrtechniken sind: vollständige Kernbohrung, Rotary, Bohrlochsohlenmotor mit aufgerollter Verrohrung,

¹ Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées, 45 rue de l'Industrie, CH-1951 Sion
Adresse actuelle de l'auteur: Centre d'Hydrogéologie, 11 rue E.-Argand, CH-2007 Neuchâtel

Imloch-Hammerbohren und inverse Spühlstromrichtung (Schlagbohr- und Drehbohrmeissel). Im Bereich der Erz- und Erdölprospektion wurden alle Slimhole-Bohrtechniken bereits eingesetzt. Im Bereich der Geothermie werden diese Techniken vor allem in Japan und in der USA angewandt. Die verschiedensten Gesteine in unterschiedlichen geologischen Umgebungen wurden bereits mittels Slimhole-Bohrungen durchfahren. Im Bereich Bohrtiefe gibt es für die Geothermie-Nutzung keine Einschränkungen, kann die vollständige Kernbohrung doch Tiefen von 3000 bis 4000 m, in extremen Fällen sogar 6000 m erreichen.

Das Interesse an der Slimhole-Technik ist in erster Linie wirtschaftlicher Art. Alle Vergleiche zwischen konventioneller und Slimhole-Bohrtechnik zeigen einen deutlichen Vorteil für letztere. Im allgemeinen resultiert der niedrigere Preis einer Slimhole-Bohrung aus einer generellen Kostensenkung bei

allen Posten. Auch die Auswirkungen auf die Umwelt werden stark vermindert. Jede der verschiedenen Slimhole-Techniken hat ihre eigenen Vor- und Nachteile, die hauptsächlich Nachteile konnten aber nach und nach eliminiert werden. So kann heute zum Beispiel die mittlere Bohrgeschwindigkeit die gleichen Werte wie bei einer Rotary-Bohrung grossen Durchmessers erreichen.

Die wichtigste Frage betrifft die Möglichkeit, eine Slimhole-Bohrung als Förderbrunnen nutzen zu können, falls ein Reservoir angetroffen wird. Experimentelle Studien haben gezeigt, dass für eine Fördermenge von rund 60 m³/h ein Durchmesser zwischen 89 und 127 mm (3¹/₂" und 5") in der Produktionszone ausreicht. Eine Vergleichsanalyse der Bohrkosten zeigt, dass die Slimhole-Technik je nach Standort, Art, Anzahl und Tiefe der Bohrungen, Einsparungen von 25–50% und teilweise sogar noch mehr ermöglicht.

1. Introduction

Buts de l'étude

Entre 1988 et 1996, 11 forages profonds ont été forés en Suisse dans des environnements géologiques variés, à des fins de prospection géothermique. Tous ces projets ont été partiellement financés ou tout au moins au bénéfice de la couverture du risque en cas d'échec par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Sept des 11 puits étaient de réels forages d'exploration, et six d'entre eux n'ont pas atteint le débit de production minimum attendu. Cependant le budget de chacun de ces projets approchait ou dépassait le million de francs suisses, et les puits ont tous été forés de manière traditionnelle avec la méthode rotary de grand diamètre.

En 1994, l'OFEN a financé une étude pour évaluer la possibilité d'utiliser la technique de forage slimhole pour prospector les aquifères profonds. Une recherche bibliographique étendue a été menée par le Centre de recherches scientifiques fondamentales et appliquées de Sion (CRSFA), permettant la rédaction d'un rapport sur le sujet (Vuataz 1995), qui est résumé et mis à jour dans cet article.

Le but principal de cette étude était de synthétiser les travaux de recherche et développement dans le domaine du forage slimhole qui ont été publiés dans la littérature internationale lors de ces dix dernières années. Une telle étude n'a jamais été entreprise en Suisse jusqu'à aujourd'hui, à l'exception d'un petit document inédit de l'entreprise de forage Foralith AG (1992). De plus, aucun rapport de synthèse complet sur la technique du forage slimhole n'a été trouvé dans le domaine public à l'étranger.

Les autres buts de cette étude consistent d'une part à vérifier la faisabilité des techniques de forage slimhole pour la prospection des ressources géothermiques en Suisse, et d'autre part à discuter des conséquences financières qui en résultent lors du montage des opérations de géothermie.

Définitions

Le terme «slimhole», littéralement «forage mince», n'a pas de définition univoque parmi les nombreux auteurs qui l'utilisent dans leurs rapports et publications. La définition la plus générale est celle d'un forage dont le diamètre est inférieur à celui des forages conventionnels. De nombreuses autres définitions plus précises, mais pas plus officielles ont été trouvées et sont reportées ci-après.

- Forage dont le diamètre final est inférieur à 124 mm (4⁷/₈") et dont 90% de la longueur possède un diamètre inférieur à 216 mm (8¹/₂") (Rederon et al. 1990).
- Forage dont 90% ou plus de la longueur possède un diamètre inférieur à 178 mm (7") (Howes 1991; Walker & Millheim 1990).
- Forage dont le diamètre final est inférieur ou égal à 102 mm (4") (Combs & Dunn 1992).
- Forage dont l'espace annulaire entre le train de tiges et les parois est fortement réduit, généralement inférieur ou égal à 25.4 mm (1") (Littleton 1992).
- Forage dont les diamètres de trou sont réduits de moitié par rapport aux diamètres des forages conventionnels (Murray et al. 1993).
- Forage de production ou d'exploration, dont le trou est réduit d'une taille de diamètre, respectivement deux, par rapport à un forage conventionnel (Berli & Pingel 1994).

D'autres termes sont utilisés dans la littérature, tels que Micro-drill, microforage, ultra-slimhole et forage de petit diamètre. Dans l'intention de simplifier la terminologie, c'est le terme de *slimhole* qui sera utilisé dans cet article pour désigner tout forage de diamètre réduit. Par comparaison, les forages de grand diamètre sont généralement appelés, dans la littérature, forages conventionnels ou forages de production.

Tab. 1. Exemples de quelques systèmes de carottage continu: diamètres et profondeur des forages carottés (Berli & Pingel 1994; Gunn 1991; Müller-Ruhe 1996, communic. pers.; Rüfenacht 1996, communic. pers.; Sheridan 1993; Walker & Millheim 1990)

Système de carottier	Diamètre de trou		Diamètre de carotte		Profondeur maximum (m)
	(mm)	(inch)	(mm)	(inch)	
Ancienne norme Longyear					
SQ	146	5 ³ / ₄ "	102	4"	≈ 500
PQ	121	4 ³ / ₄ "	85	3 ³ / ₈ "	≈ 800
HQ	96	3 ³ / ₄ "	63	2 ¹ / ₂ "	≈1000
NQ	76	3"	48	1 ⁷ / ₈ "	≈2000
BQ	60	2 ³ / ₈ "	36	1 ⁷ / ₁₆ "	≈2500
AQ	48	1 ⁷ / ₈ "	27	1 ¹ / ₁₆ "	≈3000
Nouvelle norme Longyear CHD(1)					
CHD146	146	5 ³ / ₄ "	102	4"	≈ 800
CHD134	134	5 ¹ / ₄ "	85	3 ³ / ₈ "	≈2000
CHD125	125	5"	85	3 ³ / ₈ "	≈2500
CHD101	102	4"	63	2 ¹ / ₂ "	≈3500
CHD 76	76	3"	44	1 ³ / ₄ "	≈4500
Système GWSK(2)					
5 ¹ / ₂ "	159	6 ¹ / ₄ "	101	4"	≈3000
4 ¹ / ₂ "	123	4 ⁷ / ₈ "	79	3 ¹ / ₈ "	≈3000
3 ¹ / ₂ "	94	3 ³ / ₄ "	57	2 ¹ / ₄ "	≈3000

(1) CHD: Coring Heavy Duty

(2) GWSK: Gewerkschaft Walter AG Seilkernsysteme.

Recherche bibliographique

La majorité des documents consultés proviennent d'une recherche bibliographique réalisée simultanément sur six bases de données internationales informatisées pour la période 1985-1994: COMPENDEX, ENERGYLINE, GEOARCHIVES, GEOBASE, NTIS et PASCAL. L'essentiel des références obtenues lors de cette recherche sont publiées dans des revues spécialisées sur la prospection pétrolière, le forage et l'ingénierie de réservoir. Cette recherche bibliographique ne prétend en aucun cas être exhaustive, car de nombreux documents et rapports non publiés doivent certainement exister auprès des compagnies privées. Par conséquent, certaines valeurs données dans cet article concernent un nombre limité de forages et ne peuvent être considérées comme des valeurs statistiques.

2. Techniques de forage slimhole

Dans les années 1950 déjà, les compagnies minières ont mis au point et amélioré des techniques de forage, dans le but d'obtenir de meilleures informations géologiques et de diminuer les coûts de la prospection: il s'agissait des techniques dites de circulation inverse et de carottage continu. L'industrie pétrolière s'est également intéressée progressivement à la technique slimhole, à partir des années 1960. Une société de forage sué-

doise, MICRODRILL, a développé dans les années 1970 une technique et un matériel spécifique de forage slimhole, mais pour des raisons économiques cette compagnie a cessé ses activités. C'est à partir des années 1980 que la technique slimhole a vraiment pris son essor dans de nombreux pays et pour des environnements géologiques très variés. Durant cette période en effet, un certain nombre de problèmes spécifiques aux forages de prospection des hydrocarbures ont dû être résolus (Worrall et al. 1992). Plusieurs variantes techniques existent pour réaliser un forage slimhole, et chaque puits foré peut être une combinaison de plusieurs de ces techniques.

Carottage continu

La prospection minière a tellement développé la technique du carottage continu, qu'elle soutient une industrie du forage totalement séparée de celle de la prospection pétrolière (Walker & Millheim 1990). Le système de forage par carottage continu pour la prospection minière utilise un appareil de forage nettement plus petit et léger en comparaison avec une machine rotary conventionnelle de même capacité de profondeur utilisée pour la prospection des hydrocarbures. La couronne de carottage est fixée à l'extrémité du train de tiges, et le carottier contenant la carotte est remonté à l'intérieur des tiges au moyen d'un câble. Le taux de récupération des carottes peut atteindre

Forage slimhole pétrolier profond

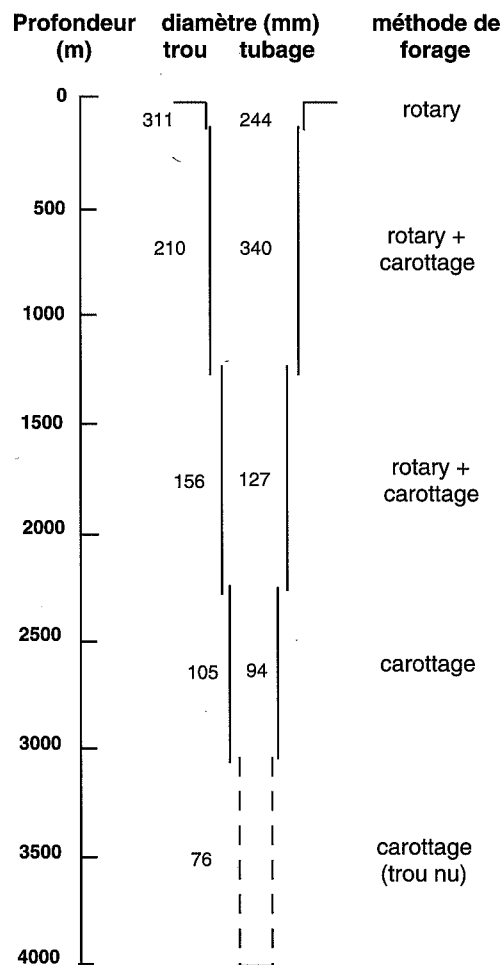


Fig. 1. Coupe technique typique d'un forage slimhole pétrolier profond (Gunn 1991; Littleton 1992, Sheridan 1993).

95 à 98% pour certains types de formations géologiques. Les diamètres de forage et de carotte varient selon les systèmes utilisés et proviennent de la technologie minière (tab. 1).

Plusieurs compagnies pétrolières et de forage en collaboration avec des sociétés de services spécialisés ont lancé des programmes de recherche, dans le but construire des systèmes complets de forage slimhole par carottage continu adaptés à la prospection des hydrocarbures (Littleton 1992; Sheridan 1993; Walker & Millheim 1990; Worall et al. 1992). Des progrès importants ont été accomplis dans les domaines suivants: automatisation des appareils de forage, augmentation de la durée de vie des couronnes, nouveaux outils de diagraphie, outils de mesure en cours de forage, détection et contrôle des éruptions de gaz. Des appareils de forage par carottage peuvent atteindre des profondeurs de 4000 à 6000 m (figs. 1 et 2; tab. 2).

Rotary conventionnel: hydrocarbures (1, 2) Rotary slimhole: hydrocarbures (2, 3) Carottage slimhole: géothermie (4) Circulation inverse: thermalisme (5)

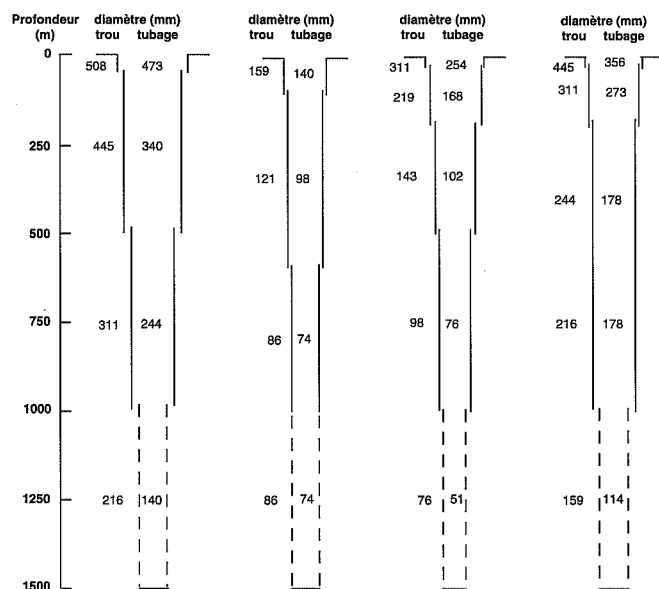


Fig. 2. Coupe technique et diamètres caractéristiques de quatre types de forages de 1500 m de profondeur. (1) Murray et al. 1993; (2) Floyd 1987; (3) Littleton 1992; (4) Kato & Kizaki 1993; (5) Boniface SA 1987.

Forage rotary

Les forages slimhole réalisés avec la méthode rotary peuvent être exécutés avec des appareils de forage conventionnels modifiés et allégés pour des dimensions et des diamètres réduits.

Dans plusieurs champs pétroliers peu profonds, le besoin s'est fait sentir d'avoir à disposition un système de forage économique et de taille réduite, permettant toutes les opérations liées à la prospection. Au milieu des années 1970, la compagnie de forage suédoise MICRODRILL a mis au point un système complet de forage slimhole rotary pouvant atteindre avec de très petits diamètres de forage (86 mm, 3³/₈"') la profondeur de 1500 m: forage vertical, incliné ou dévié, carottage, diagraphies (Micro log), tests de production et complétion (Microdrill 1985a; Microdrill 1985b). Dans le cadre du développement de champs pétroliers dans le Bassin parisien et en Grande Bretagne, 40 forages de type MICRODRILL ont été réalisés en 1985-1986 à des profondeurs allant de 600 à 1500 m (Margueritat 1985; Floyd 1987; fig. 2). Actuellement, ce système n'est plus commercialisé.

Les forages déviés ainsi que les forages horizontaux sont réalisés à l'aide d'un moteur à boue (moteur Moineau, moteur à déplacement positif) situé juste au-dessus du tricône, entraîné par la pression de boue injectée dans le train de tiges (Cooper 1994; Culver 1989).

Tab. 2. Caractéristiques techniques et économies potentielles d'un forage slimhole mixte (rotary + carotté) profond comparé à un forage rotary conventionnel de même profondeur (Gunn 1991; Littleton 1992; Margueritat 1985; Sheridan 1993; Walker & Millheim 1990; Worall et al. 1992)

Caractéristiques	Forage slimhole rotary/carotté (%)		Forage rotary conventionnel (%)	
Profondeur (m)	4300	100	4300	100
Diamètre final forage (mm)	102	47	216	100
Poids de la foreuse (t)	60	20	300	100
Poids du train de tiges (t)	37	25	150	100
Poids total de l'équipement (t)	700	14	5000	100
Volume total de l'équipement	-	33	-	100
Puissance installée (kw)	1300	33	4000	100
Consommation de fuel	-	25	-	100
Volume circulation boue (m ³)	10	4	240	100
Coût de la boue	-	20	-	100
Superficie chantier (m ²)	1000-2000	25	4000-8000	100
Equipe de forage (nb. pers.)	3-4	50-67	6	100
Economie globale du forage	-	50	-	100

Forage avec tubage enroulé

Depuis quelques années, certaines compagnies pétrolières ont choisi d'utiliser pour la réalisation des forages slimhole (approfondissement, reconditionnement, nouveaux puits) la technologie du tubage enroulé (coiled tubing), dans le but de diminuer le temps destiné aux manoeuvres du train de tiges et par conséquent la durée globale de forage. Ce système convient particulièrement bien pour les forages fortement déviés et horizontaux.

Un tubage de diamètre 60 mm (2³/₈"') est enroulé sur un tambour à côté de l'appareil de forage et sert de train de tiges. Un injecteur descend progressivement le tubage au fur et à mesure de l'avancement du moteur à boue. Toutes les opérations de diagraphies et de tests sont ensuite possibles à travers le tubage enroulé (Jantschik & Riepe 1994). Cette technique a pour avantage essentiel de supprimer quasiment le temps d'assemblage des tiges, qui dans le système traditionnel prend 25% du temps réel de forage dans des formations tendres (Traonmilin et al. 1992).

Marteau fond-de-trou

Cette méthode de forage utilise la percussion assortie d'une poussée sur l'outil qui se trouve lui-même en rotation. L'énergie utilisée pour actionner cet outillage est l'air comprimé à haute pression (25 bars). Un marteau pneumatique équipé de taillants est fixé à la base du train de tiges et animé par envoi d'air comprimé dans celles-ci. Les diamètres de foration au marteau varient généralement de 102 mm (4") à 760 mm (30"). Ce procédé est utilisé principalement en terrains durs: il a pour avantages une vitesse de pénétration rapide, ainsi qu'une bonne observation en cours de forage des cuttings et des fluides des zones productrices (Detay 1993; Plote 1985).

La profondeur atteinte par cette méthode dépend de la pression d'air comprimé, donc du compresseur associé à l'appareil de forage et de la hauteur d'eau dans le puits. A titre d'exemple, un compresseur standard de 25 bars limitera la profondeur de forage à 250 m au maximum, si ce dernier est rempli par le fluide de formation. Une profondeur de 800 m peut être atteinte avec un surpresseur de 90 bars dans le cas d'un forage rempli d'eau et d'un diamètre de trou de 152 mm (6") (Coreis 1995, communic. pers.).

Circulation inverse

Le système de foration par circulation inverse a été développé au Canada dans les années 1950 pour la prospection minière. Actuellement, il est aussi utilisé pour la prospection d'eau souterraine et d'hydrocarbures dans de nombreux pays. En Europe, cette méthode de forage est encore peu répandue, à l'exception de la France. Son succès est dû à plusieurs caractéristiques essentielles (Drill systems inc. 1985; Strauss et al. 1989): bonne pénétration dans des formations fracturées ou avec des vides; faible volume d'eau utilisé comme fluide de forage; possibilité de passer du marteau fond-de-trou au tricône rotary tout en gardant le système de la circulation inverse; augmentation de la vitesse de pénétration; échantillonnage continu et de qualité des roches et des fluides de la formation.

Le système de forage par circulation inverse n'a pas été développé spécifiquement comme une méthode de forage slimhole, mais la gamme des diamètres des outils disponibles, marteaux et tricônes, permettent de réaliser des forages slimhole d'un diamètre final de 130 mm (5¹/₈"') à 159 mm (6¹/₄"') (Entec Industries Ltd. 1988; fig. 2).

Plusieurs variantes de la technique de circulation inverse existent, mais les principes de base sont les suivants (Boniface SA 1987; Thurston & Eckels 1982).

- Les tiges de forage d'un diamètre de 140 mm (5 1/2") sont constituées de doubles parois coaxiales.
- L'air comprimé est injecté à l'intérieur de l'espace annulaire des tiges.
- Un bloc distributeur stabilisateur, situé entre les tiges et le marteau, fait passer l'air à travers celui-ci.
- Après avoir actionné le marteau, l'air repasse dans le bloc distributeur qui évacue immédiatement vers le haut les cuttings par le tube intérieur des tiges à double paroi.
- La vitesse de remontée des cuttings est de l'ordre de 15–20 m/s dans un forage sec et de 3–4 m/s dans un forage rempli d'eau.
- Le marteau peut être remplacé par un tricône sans modifier fondamentalement la méthode.

A plusieurs points de vue, cette technique de forage peut être comparée au carottage continu. En effet, les appareils de forage en circulation inverse sont de même taille que ceux destinés au carottage continu, et la superficie du chantier est très réduite, en raison de l'absence de boue de circulation, donc de bournier et d'unité de traitement de la boue. La qualité de l'information géologique et hydrogéologique est élevée, car on récupère presque instantanément la quasi-totalité des cuttings, et ceux-ci sont beaucoup plus gros («chips» d'une taille centimétrique) que les cuttings du rotary. La vitesse de pénétration de la méthode de circulation inverse est nettement supérieure à celle du carottage: selon les terrains, la vitesse d'approfondissement peut passer de 3 à 30 m/h, avec des valeurs moyennes de 6 à 12 m/h (Shirley & Hay 1988).

3. Utilisation des forages slimhole

Prospection minière

Historiquement, les techniques de forages slimhole ont été développées pour la prospection minière: tout d'abord le carottage continu et ensuite le système de circulation inverse. Les buts principaux étaient d'obtenir une excellente information géologique et tectonique par les carottes, et par la suite de diminuer les coûts tout en conservant une bonne qualité de l'information géologique.

Prospection d'hydrocarbures

A partir des années 1970, les compagnies pétrolières ont souhaité avoir à disposition des techniques de forage moins coûteuses que les grandes plates-formes rotary. Leurs buts étaient notamment de forer des réservoirs peu profonds, de reconditionner des puits existants, de reprendre l'exploration de champs marginaux, et finalement de prospecter des zones difficiles d'accès ou sensibles sur le plan de l'environnement. Trois systèmes de forage slimhole ont été utilisés: le rotary conventionnel avec des appareils de forage pétroliers modifiés, le carottage continu avec des appareils de forage automatisés,

ainsi que le système MICRODRILL pour les faibles profondeurs avec son équipement totalement spécifique.

En Europe, un certain nombre de compagnies incluant Agip, BP, Elf, Shell et Total travaillent sur l'amélioration de la technologie de forage slimhole et l'utilisent régulièrement. En 1984, un groupe d'opérateurs de forage et l'Institut français du pétrole (IFP) ont élaboré un projet ambitieux visant à diviser le coût du forage par deux de 1985 à 1995. Cet effort de recherche technologique comprenait huit programmes, dont un concernait le forage slimhole (Rederon et al. 1990). Plusieurs grandes compagnies pétrolières ont conclu entre les années 1985 et 1990 des accords avec des sociétés de services, pour mettre au point ou améliorer des techniques liées au forage slimhole. Des recherches ont donc été entreprises sur la composition des boues, les appareils de surveillance, l'automatisation de certaines opérations de forage et les outils de diagraphie.

Jusqu'en 1992, plus de 20 000 m ont été forés selon ce concept pour 46 forages dans cinq pays. Avec les années, le diamètre final de trou a progressivement diminué de 156 mm (6 1/8") à 105 mm (4 1/8"). BEB a également foré 15 puits de 3838 à 5382 m avec ce système slimhole entre 1989 et 1992. On estime qu'aux USA, plus de 1000 forages slimhole ont été exécutés rien qu'en 1990 (Howes 1991).

Sur la base de nombreuses expériences réalisées en Allemagne dès 1973 pour la prospection de charbon, la compagnie américaine Amoco a développé depuis 1987 le concept de forage slimhole SHADS (Stratigraphic Highspeed Advanced Drilling), au moyen duquel 18 000 m ont été forés (Walker & Millheim 1990; Sheridan 1993). Il s'agit d'un système intégré basé sur le carottage continu, qui a bénéficié d'une recherche et d'un développement dans les domaines suivants.

- Construction d'un nouvel appareil de forage (carottage et rotary)
- Circulation des fluides de forage
- Fluides de forage
- Système expert pour le contrôle du puits (venues de gaz)
- Tests de couronnes de carottage
- Récupération des carottes
- Analyse des carottes.

Prospection géothermique

C'est essentiellement au Japon et aux USA que des forages slimhole ont été réalisés pour la prospection des ressources géothermiques.

Au Japon, les puits de production et de réinjection sont forés avec des appareils rotary, alors que les forages de prospection slimhole sont généralement exécutés par carottage continu. De 1980 à 1996, plus de 300 forages slimhole ont été carottés sur l'ensemble du territoire japonais sous l'égide du NEDO (New energy and industrial technology development organization). Il s'agit d'un programme de promotion et de développement des ressources géothermiques financé par le

gouvernement, qui a concerné 38 zones de prospection d'une superficie de 50 à 70 km² chacune (Kato & Kizaki 1993). Ces forages carottés ont une profondeur de 400 à 1800 m et un diamètre final du trou de type NQ 76 mm (3"), équipés si nécessaire d'une crépine de 51 mm (2").

Aux USA, des forages slimhole ont été réalisés dans des régions diverses, mais il s'agissait généralement d'un à trois forages, mais pas de campagnes de prospection systématique. Notamment, un forage slimhole carotté a été exécuté sur le champ géothermique de Steamboat Hills au Nevada, dans le but d'effectuer des tests de production et d'injection, et de comparer les résultats avec des puits de production existants (Flynn et al. 1994). La profondeur totale du sondage carotté atteint 1220 m et le diamètre final du trou est de type HQ 98 mm (3⁷/₈"). A Hawaï, dans la zone du rift oriental du volcan Kilauea, trois forages slimhole carottés ont été réalisés dans le but d'évaluer la perméabilité du réservoir potentiel et de la comparer à celle des forages de production existants (Olson & Deymonaz 1993). Leur profondeur va de 1684 à 2073 m et le diamètre final du trou est de type NQ 76 mm (3").

Dans le cadre de programmes de prospection géothermique en Amérique centrale, trois forages slimhole ont été carottés au Honduras et un au Guatemala (Goff et al. 1991; Goff et al. 1992). Leur profondeur varie entre 428 et 808 m, et tous possèdent un diamètre final du trou de type NQ 76 mm (3"). D'autres forages géothermiques slimhole ont été exécutés dans plusieurs pays utilisant cette ressource énergétique, notamment en Indonésie (Furry & Dobson 1996), en Papouasie Nouvelle-Guinée et au Costa Rica, mais la recherche bibliographique n'a que rarement permis d'en trouver les références.

Forages scientifiques

Des forages slimhole généralement carottés ont été exécutés en France et aux USA au cours des années 1980 dans le cadre de programmes nationaux de forages scientifiques.

Le programme scientifique Géologie Profonde de la France a notamment permis de réaliser plusieurs sondages slimhole dans le Massif Central. Dans le Cézallier, trois sondages ont été exécutés sur le même site: deux au marteau fond-de-trou (188 et 500 m) et un par carottage continu (1400 m) (Feuga 1987). Il faut noter que l'un des sondages a été foré au marteau jusqu'à la profondeur de 400 m, et terminé au tricône à la profondeur finale de 500 m, avec un diamètre de 159 mm (6¹/₄"). Le sondage carotté s'est achevé à la profondeur de 1400 m avec un diamètre de trou de type BQ 60 mm (2³/₈").

Le projet américain Continental Scientific Drilling Program a réalisé neuf forages slimhole carottés profonds dans quatre systèmes hydrothermaux différents de l'ouest des USA. Au total, 6 km de sondages carottés ont été forés avec un taux moyen de récupération des carottes supérieur à 90% (Wollenberg et al. 1989). A titre d'exemple, le forage VC-2B dans le système volcanique de Valles Caldera au Nouveau-Mexique a atteint la profondeur de 1762 m avec un diamètre final de type NQ 76 mm (3") (Lysne & Jacobson 1990).

Forages pour les eaux thermales et minérales

Les forages réalisés pour la production d'eau thermale et/ou minérale sont généralement moins profonds et se satisfont de débits inférieurs à ceux exécutés dans le cadre d'une opération de géothermie. Pour cette raison, il s'agirait des premiers candidats à l'utilisation de la technique slimhole. Dans la réalité, on observe parfois une réduction globale des diamètres, mais on ne peut parler vraiment d'usage systématique du slimhole.

En Suisse, on peut citer quelques cas de puits à diamètre réduit dans la zone de production. Par exemple, le forage qui alimente en eau l'usine d'embouteillage d'Arkina à Yverdon (Geologisches Institut Dr Schmassmann AG 1991). Celui-ci a été réalisé avec la méthode rotary à la profondeur de 666 m, et seuls les derniers 100 m ont un diamètre de 159 mm (6¹/₄"). Un autre cas est celui du puits de Malleray-Pontenet dans la vallée de Court-Tavannes. Forage rotary, il atteint la profondeur de 445 m, et ses diamètres de production sont respectivement de 123 mm (4⁷/₈") entre 175 et 275 m, et de 76 mm (3") entre 275 et 445 m.

En France, depuis une dizaine d'années de très nombreux puits ont été réalisés pour la prospection et la production d'eau thermale. De 1987 à 1994, pas moins de 33 forages ont été exécutés avec la méthode de la circulation inverse, dont 12 à une profondeur de 400 à 1500 m avec un diamètre final du trou de 159 mm (6¹/₄").

Contrairement aux forages d'eau potable, et dans une moindre mesure aux forages géothermiques, qui nécessitent des débits de 60 à plus de 300 m³/h, la production des puits d'eau thermale peut se satisfaire de débits plus modestes (20 à 50 m³/h), et par conséquent de diamètres inférieurs.

Forages géotechniques

Dans de nombreux cas de grands travaux de génie civil, tels que tunnels, barrages, centrales souterraines, et sites de stockage souterrain de déchets radioactifs, la prospection géologique et l'évaluation des caractéristiques géotechniques du milieu passe par la réalisation de sondages profonds. En raison des buts à atteindre le forage slimhole carotté en continu convient parfaitement.

En Suisse de nombreux sondages géotechniques profonds ont été exécutés ces dix dernières années dans le cadre des travaux de la CEDRA (stockage), des CFF et de BLS-Alptransit (tunnels ferroviaires), pour ne mentionner que les principaux. Ces ouvrages géotechniques profonds, considérés comme des sondages slimhole, ont presque tous été réalisés par carottage continu. Leur profondeur varie de 400 à 1500 m environ, et leur diamètre final se situe généralement entre 76 mm (3") et 134 mm (5¹/₄").

Types de roches forées

En considérant la variété des applications du sondage slimhole, il est évident que tous les types de roches ont été forés. Les

roches meubles, notamment les remplissages quaternaires de vallées alluviales ou glaciaires sont toujours difficiles à forer, et doivent être tubés rapidement. En général, c'est la méthode rotary qui est utilisée avec des outils de grande taille pour avoir une réserve de diamètre en cas de problèmes et de pose d'un tubage.

Une technique intéressante existe cependant pour traverser ces zones difficiles sur 150 m au maximum. Il s'agit du système ODEX-TUBEX. Le forage s'effectue au marteau, avec un taillant excentré et un tubage de diamètre plus petit que le taillant, qui suit l'avancement (Berli & Pingel 1994). Lorsque l'on veut changer le taillant, celui-ci peut se replier et être retiré à travers le tubage TUBEX, qui lui reste en place. Une gamme étendue de diamètres télescopiques de tubage TUBEX est disponible, de 365 mm (14³/₈"') à 90 mm (3¹/₂"'), ce qui permet de réaliser des sondages de types très variés. Si un tel forage se poursuit au-delà de 150 m dans des sédiments meubles ou mal consolidés, on passe généralement à la méthode du tricône rotary. De même, la méthode de la circulation inverse donne de bons résultats, même en présence de blocs ou de galets non consolidés (Boniface SA 1994, communic. pers.).

L'intérêt manifesté par les compagnies pétrolières vis-à-vis du concept slimhole indique de toute évidence sa capacité à résoudre les problèmes rencontrés dans les épais bassins sédimentaires, avec des séquences de roches comportant toutes les variétés de calcaires, de grès, de marnes et d'évaporites. Toutes les techniques autorisant le forage slimhole ont été développées ou modifiées en vue de forer des terrains sédimentaires: le carottage continu, le rotary, le marteau fond-de-trou, et la circulation inverse (marteau et tricône). Cependant toutes ne s'utilisent pas de la même manière et dans les mêmes conditions, et le choix du fluide de forage adéquat est capital pour la réussite du sondage, qu'il s'agisse de boue à la bentonite ou aux polymères, d'eau claire, d'air ou encore d'une émulsion eau-air.

Les roches fissurées sont en général des roches compactes et dures, soit sédimentaires (calcaire karstifié), soit cristallines (granites, gneiss, schistes). Le carottage continu de type minier convient particulièrement bien à la foration des roches dures. Le marteau fond-de-trou est également adapté à un avancement rapide en roches fissurées dures, mais fortement limité par la profondeur. La technique de la circulation inverse permet de résoudre le passage de cavités, de zones fracturées importantes. En effet, là où les forages conventionnels à la boue subissent des pertes partielles ou totales du fluide de circulation, la remontée des cuttings par le train de tiges élimine les pertes de fluide et également les risques de colmatage des zones de production.

4. Avantages de la technique slimhole

La raison principale pour laquelle la technique de forage slimhole s'est fortement développée ces dix dernières années est bien évidemment une question économique. Les compagnies pétrolières ont souhaité voir leurs coûts de prospection dimi-

nuer de façon globale, ce qui nécessitait une analyse détaillée des différents postes de dépense que l'exploration comporte. Les coûts d'un forage de type conventionnel (creusement, complétion, chantier, impact), sont conséquents lors de la campagne d'exploration ou de développement d'un champ, et devaient subir une réduction. C'est dans ce sens que des programmes de recherche & développement sur les techniques slimhole ont été lancés, essentiellement par l'industrie pétrolière, mais également pour la prospection géothermique de haute énergie. En ce qui concerne la géothermie de basse énergie, elle peut profiter des progrès des techniques slimhole mises au point pour d'autres ressources, comme d'ailleurs elle l'a pratiqué depuis plus de 20 ans avec les techniques de forage pétrolier conventionnelles.

Avantages par rapport au forage rotary conventionnel

- Réduction globale des coûts de forage.
- Report d'une partie des coûts de l'exploration à une période ultérieure, lorsque l'existence du réservoir est prouvée et que ses caractéristiques sont établies.
- Augmentation du nombre de forages exécutables avec un budget fixe.
- Réduction du temps total de réalisation d'un projet.
- Réduction de la taille des machines de forage.
- Diminution de la quantité et du volume de l'équipement et du matériel consommable.
- Diminution du nombre de véhicules pour le transport du matériel.
- Diminution du volume des déchets (boue, cuttings, eau).
- Diminution de l'énergie consommée (fuel, électricité).
- Diminution du nombre de personnes nécessaires sur le chantier.
- Forage possible dans des zones éloignées ou d'accès difficile (routes plus étroites, moins de voies d'accès à créer ou à modifier).
- Diminution de la superficie et de la durée du chantier de forage (zones urbaines, zones sensibles sur le plan de la protection de l'environnement).
- Au cas où le débit de fluide demandé est $\leq 60 \text{ m}^3/\text{h}$, le forage slimhole d'exploration peut servir de forage de production lors de la phase d'exploitation de l'aquifère.
- Au cas où le débit demandé est nettement $> 60 \text{ m}^3/\text{h}$, le forage slimhole d'exploration peut jouer le rôle de puits de surveillance lors de la phase d'exploitation du réservoir.

Avantages spécifiques du carottage continu

- Qualité maximale des informations géologiques, stratigraphiques et tectoniques obtenues avec les carottes.
- Diminution du nombre de diagraphies nécessaires dans les puits.
- Réduction significative des campagnes de prospection par sismique profonde (intérêt surtout dans les zones à haute densité de population).

- Pas de risque de colmatage de la formation productrice, puisque le fluide de forage utilisé n'est que de l'eau, éventuellement additionnée de polymères.
- Bonne information hydrogéologique obtenue en cours de forage, notamment si la zone de production est artésienne (suivi hydrochimique du fluide de circulation).
- Profondeur importante atteinte par les appareils de forage les plus performants (5000–6000 m).
- Un nouveau système automatisé d'analyses en continu des carottes sur le chantier a été mis au point par une compagnie pétrolière (Walker & Millheim 1990).

Avantages spécifiques de la circulation inverse

- Seule méthode de forage permettant d'obtenir l'information géologique (cuttings) de manière extrêmement rapide et continue.
- Très bonne qualité des informations géologiques, stratigraphiques et parfois tectoniques obtenues par des cuttings de taille centimétrique.
- Excellente information hydrogéologique obtenue en cours de forage, notamment si la zone de production est forée à l'air comprimé uniquement.
- Pas de risque de colmatage de la formation productrice, puisque les fluides de forage utilisés sont l'air comprimé et l'eau de la formation.
- Méthode idéale pour forer à travers des cavités (karst, zones de failles, porosité excessive), où la technique de rotary à la boue subit des pertes totales de circulation et se trouve dans l'obligation de tuber, donc de réduire le diamètre de l'outil suivant.

5. Inconvénients de la technique slimhole

Dans le cadre de la prospection des hydrocarbures au cours de la première moitié des années 1980, de nombreux défauts, plus ou moins importants, étaient attribués à la technique de forage slimhole.

- Réduction des coûts modeste, voire nulle.
- Limitation de la profondeur atteinte.
- Vitesse de pénétration nettement inférieure à la méthode rotary conventionnelle.
- Faible durée de vie des trépan de petit diamètre.
- Difficulté de tenue des parois du trou dans des formations tendres, gonflantes ou friables.
- Adaptation difficile du fluide de forage, la boue traditionnelle ne convenant pas.
- Prévision et contrôle des venues et éruptions de gaz difficiles.
- Déviation et contrôle de la direction de forage délicats.
- Difficultés d'exécution et de contrôle de la cimentation en raison du faible espace annulaire.
- Nombre limité d'outils de diagraphie.
- Forage difficile dans un réservoir haute pression et haute température.

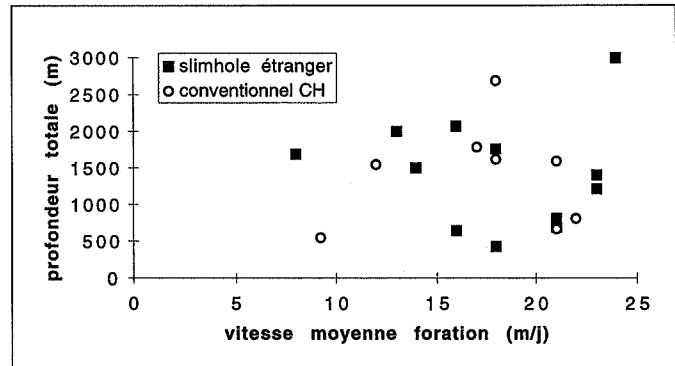


Fig. 3. Vitesse moyenne d'approfondissement de forages géothermiques: comparaison entre des forages slimhole carottés, réalisés dans divers pays, et huit forages rotary conventionnels en Suisse (Flynn et al. 1994; Goff S. (ed.) 1992; Goff S. et al. 1988; Gunn 1991; Kato & Kizaki 1993; Lysne & Jacobson 1990; Office fédéral de l'énergie 1995; Olson & Deymonaz 1993; Vuataz F.D. 1987).

- Limitation du débit de production potentielle, en raison des faibles diamètres et des pertes de charge qu'ils imposent.
- Impossibilité d'extrapoler les caractéristiques des tests de production ou d'injection à des forages de grand diamètre.
- Tests de formation difficiles à opérer.
- Equipements de production plus chers (colonne de production, packers, etc.).
- Réalisation délicate de l'instrumentation et du reconditionnement d'un forage slimhole (déviation, approfondissement).

Depuis lors, plus de dix ans ont passé, de nombreuses tentatives ont été menées pour évaluer les avantages et les inconvénients de la technique slimhole, et des programmes de recherche dotés de budgets importants ont été engagés, surtout par l'industrie pétrolière, mais aussi en géothermie. La plupart des inconvénients mentionnés ci-dessus ont été considérablement réduits, voire totalement supprimés, alors que les avantages ont augmenté en nombre et en qualité, notamment sur le plan de la rentabilité économique.

Si l'on considère le critère de la vitesse moyenne d'approfondissement, les forages slimhole, étaient au début du développement de cette technique généralement moins rapidement exécutés que les forages conventionnels. En prenant une série de forages slimhole réalisés depuis la moitié des années 1980 dans des conditions géologiques variées, à des profondeurs allant de 400 à 3000 m et des températures toujours élevées (env. 150–250°C), on constate que la vitesse moyenne d'approfondissement est de 18 m/j \pm 50%. Cette valeur peut être comparée à la vitesse moyenne d'approfondissement de 17 m/j \pm 25% des forages conventionnels réalisés pour la géothermie de basse température en Suisse au cours de la même période (fig. 3).

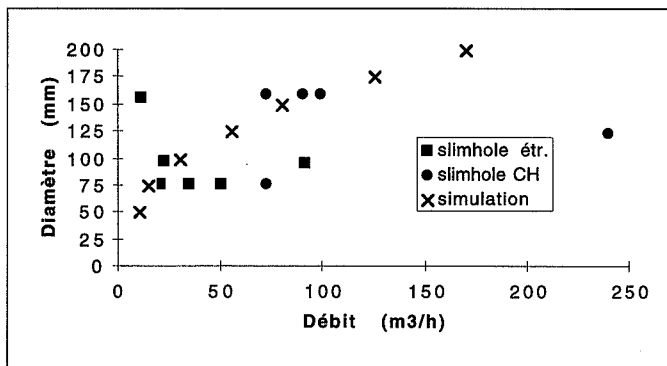


Fig. 4. Débit de production des forages en fonction du diamètre du trou dans le réservoir (Commission des Services Industriels 1983; Edmiston 1993; Finger et al. 1994; Garg & Combs 1994; Géologisches Institut Dr Schmassmann AG 1991; Goff S. (ed.) 1992; Kato & Kizaki 1993; Mornod & Bertrand 1975; Office fédéral de l'énergie 1995; Ziegler 1992). Les caractéristiques de six forages géothermiques slimhole réalisés dans divers pays et de cinq forages en Suisse sont comparés aux résultats d'une simulation (Pritchett 1993).

Si dans le cas d'un forage carotté en continu le maître d'oeuvre n'exige pas un taux de récupération maximum des carottes, mais privilégie plutôt la vitesse de pénétration, celle-ci peut être nettement augmentée, en abaissant le temps passé aux soins de la récupération optimale des carottes (Martinotti 1995, communic. pers.; Roche 1995, communic. pers.).

Inconvénients spécifiques du carottage continu

- Changement parfois délicat du fluide de forage, lorsqu'il faut passer de l'eau à la boue pour le carottage en roches tendres, et en présence d'argile.
- La vitesse de rotation des tiges de forage par carottage est élevée, et si l'utilisation d'une boue est nécessaire, un effet de centrifugation des particules peut être observé. Dans ce cas, les particules se collent sur la paroi interne des tiges de forage et en diminuent le diamètre (Howes 1991).

Inconvénients spécifiques de la circulation inverse

- Profondeur maximale limitée à 2000 m en France (Boniface 1996, communic. pers.).

6. Tests de production des aquifères profonds par forage slimhole

Un forage de prospection slimhole peut-il produire assez de fluide pour ensuite, dans le meilleur des cas, devenir un puits de production ou au moins servir à extrapoler les caractéristiques d'un puits de production de grand diamètre? C'est l'une des interrogations essentielles que l'on doit se poser lors d'un projet de prospection géothermique, quelque soit la température attendue ou la profondeur du réservoir potentiel. Dans ce

domaine également des progrès ont été accomplis grâce aux expériences conduites principalement au Japon et aux USA des années 1980 à aujourd'hui. Ces tests concernent des réservoirs géothermiques de haute température, et par conséquent les forages slimhole testés produisent un fluide diphasique (eau + vapeur) sous pression qui ne possède pas les mêmes propriétés que l'eau à moins de 100°C.

Expériences au Japon

Dans le cadre du programme d'exploration géothermique opéré par le NEDO dans tout le Japon, près de 300 forages slimhole ont été réalisés (cf. 3). Seuls une trentaine d'entre eux ont été mis en production, mais la plupart ont subi des tests d'injection, soit parce qu'ils n'étaient pas productifs, soit parce qu'ils étaient situés dans une zone à environnement protégé, interdisant tout rejet de fluide en surface. Ces forages ont une profondeur variant entre 1000 et 1800 m. Ils ont été exécutés avec des machines de type minier traditionnelles (fig. 2).

Lors des tests de production sans pompage, les débits de fluide diphasique ont été évidemment très variables, selon la transmissivité du puits, avec des valeurs maximales de 30 t/h, voire dans certains cas jusqu'à 50 t/h. Afin de comparer ces valeurs de débit avec de futurs forages de production de grand diamètre, des modèles de calculs ont été élaborés. Il en résulte, pour cette série d'expériences, que si l'on double le diamètre du forage slimhole typique (76 mm) dans la zone productrice, le débit augmentera d'un facteur 4 à 6 (fig. 4). Par contre, il est encore difficile d'extrapoler les résultats des tests d'injection dans les forages slimhole, pour connaître la productivité de futurs forages conventionnels.

Dans le cas où aucun test n'était effectué, un programme minimum de mesures était accompli, permettant d'obtenir les informations suivantes: température du réservoir, pression du réservoir, niveau statique, délimitation des zones de production et coupe stratigraphique (Garg & Combs 1994).

Dans la zone géothermique de Hoho (200 km² sur l'île de Kyushu), 17 forages slimhole ont été carottés. La transmissivité a été estimée au moyen de la pression du réservoir et du débit des sources avoisinantes. Les cinq forages de production conventionnels réalisés par la suite ont confirmé le modèle conceptuel basé sur les résultats des forages slimhole. En conclusion, la prospection de ce champ géothermique montre qu'un minimum de données de forage (débit d'un seul puits), jointes aux investigations de surface peuvent suffire pour estimer le potentiel énergétique d'un réservoir (Garg & Combs 1993).

Les paramètres déterminant les caractéristiques de production des forages géothermiques sont les suivants: la friction dans les tubages, les pertes de chaleur (surtout pour les ressources de haute température), et les pertes de charge associées à l'écoulement dans le réservoir. Des études théoriques menées notamment d'après les résultats des expériences japonaises, conduisent à définir le débit d'un forage de production conventionnel en fonction du débit d'un forage d'exploration

Tab. 3. Débit de production de quelques forages d'eau en Suisse exécutés en rotary avec un diamètre réduit. Références: (1) Office fédéral de l'énergie 1995; (2) Geologisches Institut Dr Schmassmann AG 1991; (3) Ziegler 1992; (4) Mornod & Bertrand 1975; (5) Commission des Services industriels 1983.

Site (Canton)	Nom du forage	But du forage	Profondeur (m)	Débit maximum (m ³ /h)	Diamètre de production (mm) (inch)		Référ.
Riehen (BS)	Riehen-1	géothermie	1547	>72	159	6 ¹ / ₄ "	(1)
Arkina (VD)	La Grève-1-	eau minérale	666	90	159	6 ¹ / ₄ "	(2)
Tavannes (BE)	L'Arsenal	alimentation en eau	468	99	159	6 ¹ / ₄ "	(3)
Malleray (BE)	Les Rosiers	alimentation en eau	445	>72	76	3"	(4)
Bevaix (NE)	Treytel	alimentation en eau	300	120-240	124	4 ⁷ / ₈ "	(5)
					76	3"	

slimhole (Garg & Combs 1993). Un logiciel de calcul (WEL-BOR) permet de simuler les débits potentiels de forages de production (Pritchett 1993, fig. 4). Une formule simplifiée, basée sur les résultats de sept forages slimhole autorise une première approximation:

$$M = M_o \left(\frac{D}{D_o} \right)^n$$

- M (t/h): débit prévisionnel du forage de production
M_o (t/h): débit du forage slimhole
D (mm): diamètre de trou du forage de production
D_o (mm): diamètre de trou du forage slimhole
n: exposant d'une valeur de 2 (débit min.) à 2.56 (débit max.)

Expériences aux Etats-Unis

La prospection géothermique par forage slimhole aux USA a été beaucoup moins systématique qu'au Japon. Cependant, un certain nombre de tests de comparaison entre des forages slimhole et des puits de production conventionnels ont été accomplis par l'industrie privée et par des laboratoires nationaux de recherche (fig. 4).

A Salt Wells Basin, Nevada, un forage slimhole de 162 m a été testé et mis en production, permettant de connaître la température et la pression au toit du réservoir, ainsi que le type de fluide. La production artésienne s'est limitée à 11 m³/h en raison de la faible épaisseur traversée dans le réservoir. A 32 m de distance un forage de production conventionnel a été foré à la profondeur de 213 m et son débit pompé a atteint 397 m³/h (Edmiston 1993).

A Pueblo Valley, Oregon, un forage carotté de 451 m avec 116 m en trou nu de diamètre HQ 96 mm (3³/₄") a permis d'obtenir un débit de production artésien de 91 m³/h. Les tests et les mesures ont été menées avec succès sur ce forage slimhole, avec les mêmes procédures standard utilisées pour des forages de grand diamètre.

Dans le cadre d'un programme de recherche sur la technique slimhole, un sondage carotté de 1220 m a été foré, puis testé à Steamboat Hills, Nevada. Les buts de cette opération étaient de maintenir le diamètre de trou de HQ 98 mm (3⁷/₈") aussi profondément que possible afin pouvoir installer des packers, et de procéder à des tests de qualité. Le débit de production du fluide diphasique était de 26 t/h (eau + vapeur) et de 22 t/h pour la phase liquide seule. Un suivi géologique, des diagraphies, le calcul des paramètres hydrauliques et une simulation des écoulements ont complété cette expérience (Finger et al. 1994).

Expériences au Honduras

Des investigations géothermiques à Platanares au Honduras ont permis de forer trois sondages carottés de 428 à 679 m, avec un diamètre final de type NQ 76 mm (3"). Deux forages ont été mis en production, et des débits de 21 et 33 m³/h ont été atteints (Goff et al. 1991; fig. 4). Ces tests de production ont permis d'estimer et de calculer un certain nombre de caractéristiques du réservoir: l'enthalpie du fluide, la puissance thermique, la pression, le volume et le temps de résidence du fluide, ainsi que la composition du fluide.

Quelques cas en Suisse

De nombreux forages carottés avec un diamètre final réduit ont été réalisés en Suisse, principalement dans le but d'une reconnaissance géotechnique, mais rarement pour exploiter un fluide. C'est pourquoi, on ne dispose que d'un nombre restreint de données sur les débits maximum. Cependant, certains puits pour la production d'eau (eau potable, eau minérale, géothermie) ont été forés avec un diamètre plus ou moins restreint. Dans certains cas, ces forages ont touché une zone très productive dans des calcaires karstifiés, et les débits peuvent atteindre 70 à 240 m³/h pour un diamètre dans la zone de production entre 76 mm (3") et 159 mm (6¹/₄") (fig. 4, tab. 3).

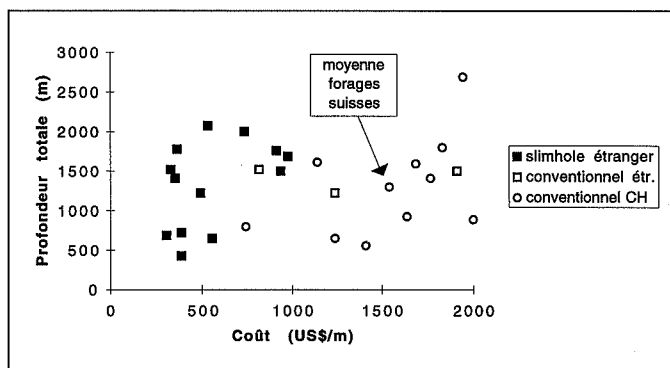


Fig. 5. Coût du mètre-linéaire en fonction de la profondeur totale pour une sélection de forages géothermiques slimhole et conventionnels de divers pays, ainsi que de dix forages géothermiques de Suisse (cf. tab. 5) (CRSFA 1997; Dachary & Vighetto 1992; Edmiston 1993; Finger et al. 1994; Garg & Combs 1994; Goff S. et al 1988; Gorhan 1997, communic. pers.; Gunn 1991; Häring 1997; Howes 1991; Kato & Kizaki 1993; Lysne & Jacobson 1990; Marguerit 1985; Office fédéral de l'énergie 1995; Olson & Deymonaz 1993; Sheridan 1993; Teplow 1996; Vuataz F.D. 1987; Wollenberg et al. 1989; Worrall et al. 1992).

7. Analyse des coûts du forage slimhole

Réduction des coûts par poste

Si les informations sur les aspects techniques des forages slimhole abondent, les questions financières sont traitées avec beaucoup plus de discrétion dans la littérature. De nombreuses données économiques sont transcrites en pourcentage et pas en valeurs absolues, ce qui rend difficile la comparaison entre les techniques utilisées, les puits forés et les régions prospectées. Une comparaison a été effectuée entre les caractéristiques techniques et économiques du forage slimhole mixte rotary/carotté et du forage rotary conventionnel: elle met en évidence les postes particuliers où des réductions importantes peuvent être réalisées (tab. 2).

Pour la technique du carottage intégral, les économies se portent sur les mêmes postes, avec des pourcentages qui peuvent varier quelque peu selon l'appareil de forage utilisé, la profondeur du puits et le type de prospection.

Une étude comparative des coûts de forage slimhole accomplie par une entreprise de forage en Suisse, a permis de mettre en évidence, au sein d'une même entreprise, les différences de prix des activités liées au forage (Foralith AG 1992). Les économies les plus importantes se portent sur les postes suivants: installation de la plate-forme de forage, frais de mobilisation et de démobilitation de l'appareil de forage, coût horaire de la foreuse et prix des tubages en fonction de leur diamètre.

Prix du mètre-linéaire

La comparaison du coût des forages slimhole et des puits conventionnels de grand diamètre est difficile à réaliser, car les

données sont assez disparates, proviennent de pays et de régions très différents, de puits d'une profondeur entre 400 et 3000 m, et de conditions géologiques très variées. Cependant, la diversité et le nombre des valeurs analysées permettent de se faire une idée globale suffisamment précise des économies potentielles qui peuvent être effectuées.

Les coûts totaux et surtout le prix du mètre linéaire sont présentés pour une série de forages de prospection géothermique slimhole carottés (fig. 5, tab. 4). Le prix moyen du mètre linéaire calculé à partir de 21 forages slimhole carottés est de 660 US\$/m, quant aux économies réalisées par rapport à des puits conventionnels de grand diamètre elles se situent entre 39 et 60%. Un autre rapprochement peut être tenté avec les coûts des forages slimhole de prospection pétrolière. Le prix par mètre de forage subit une variation extrême, en fonction directe de la profondeur et surtout de l'accessibilité des sites. Les économies possibles de la technique slimhole par rapport au forage pétrolier conventionnel de grand diamètre varient elles aussi fortement, entre 20 et 80%.

La même évaluation peut être effectuée avec l'ensemble des puits géothermiques profonds forés en Suisse. Une analyse des coûts a déjà été réalisée par Roux & Hauber (1993), complétée par cette étude (tab. 5). Le prix moyen du mètre linéaire est de 1540 US\$, avec des variations importantes dépendant de plusieurs facteurs, tels que la profondeur totale et la complexité du forage, mais pas la variation du diamètre de forage. Ce prix moyen (1540 US\$) peut être comparé à la valeur de 660 US\$, correspondant à des forages géothermiques slimhole carottés de divers pays. La différence atteint 57%, ce qui correspond aussi aux estimations faites entre les forages slimhole et les puits conventionnels aux USA et au Japon (tab. 4).

Ces extrapolations et comparaisons entre forages de divers pays peuvent difficilement être généralisées, en raison surtout du petit nombre de forages géothermiques à disposition en Suisse. Toutefois, il faut rappeler que sur le plan de la technique de forage proprement dite, les forages slimhole de prospection géothermique considérés dans les autres pays n'ont pas été plus faciles à réaliser, tant sur le plan des formations à traverser (structures, roches, fluides) que celui des températures rencontrées (> 150°C), et de l'attention accordée vis-à-vis de la protection de l'environnement. Quelques soient les restrictions que l'on peut apporter à ces comparaisons, le prix d'un forage slimhole reste nettement plus bas que celui d'un puits équivalent de grand diamètre.

Se basant sur l'ensemble des données économiques existant pour les forages slimhole de prospection géothermique haute température, Combs (1996) donne des valeurs moyennes et les compare aux forages conventionnels de grand diamètre. Les coûts de forage slimhole carottés pour des profondeurs de 1200 à 1800 m se situent entre 0.5 et 1.0 million US\$, alors que des forages rotary conventionnels coûtent de 2.5 à 5.5 millions US\$ pour des profondeurs similaires.

Tab. 4. Coût total, coût par mètre, et économie d'une sélection de forages géothermiques slimhole carottés dans le monde, en fonction de la profondeur et du diamètre de la zone de production. Références: (1) Edmiston 1993; (2) Lysne & Jacobson 1990; (3) Wollenberg et al. 1989; (4) Finger et al. 1994; (5) Teplow 1996; (6) Olson & Deymonaz 1993; (7) Kato & Kizaki 1993; (8) S. Goff et al. 1988; (9) Vuataz 1987

PAYS Site (Référence)	Nom forage ou type	Méthode de forage	Profondeur totale (m)	Diamètre de production (mm) (inch)		Coût total (milliers US\$)	Coût par mètre (US\$/m)	Economie du forage slimhole
USA								
Basin & Range (1)								
• moy. qqes puits	slimhole	carottés	1520	<178	<7'	500	328	≈ 50%
• moyenne 53 puits	convent.	rotary	1520	>178	>7'	≤1250	≤820	
Valles Caldera (2)	VC-2B	carotté	1762	76	3"	1610	914	
Long Valley (3)	RDO-8	carotté	715			184	389	
Steamboat Hills (4)	SNLG 87-89	carotté	1220	98	3 ⁷ / ₈ "	600	492	60%
	HA-4	rotary		310	12 ¹ / ₄ "		1237	
Vale (5)	TGC 61-10	rot.carot.	1775	98	3 ⁷ / ₈ "		361	39%
	A-Alt	rotary	1755	159	6 ¹ / ₄ "		501	
HAWAII								
Kilauea (6)	SOH-4	carotté	2000	76	3"	1467	734	
	SOH-1	carotté	1684	76	3"	1644	976	
	SOH-2	carotté	2073	76	3"	1107	534	
JAPON (7)								
moyenne ≈10	slimhole	carottés	1500	76	3"	1410	940	≈ 51%
moyenne ≈5	convent.	rotary	1500	216	8 ¹ / ₂ '	2870	1913	
moyenne ≈20	slimhole	carottés	de 1000 à 1800	76	3'	de 700 à 1600		
HONDURAS								
Platanares (8)	PLTG-1	carotté	650	76	3"	365	562	
	PLTG-2	carotté	428	76	3"	167	389	
	PLTG-3	carotté	679	76	3"	211	311	
FRANCE								
Cézallier (9)	S-2	carotté	1400	60	2 ³ / ₈ "	500	357	
Coût moyen par mètre du forage géothermique slimhole carotté							660	

Conséquences techniques et financières pour un projet géothermique

L'évaluation de la technologie des forages slimhole amène un certain nombre de remarques générales sur le coût de la prospection d'un réservoir aquifère profond, et trois cas différents peuvent être commentés.

- Reconnaissance d'un réservoir

Le ou les forages slimhole sont exécutés pour mettre en évidence des structures géologiques mal connues et la présence éventuelle d'un réservoir aquifère profond. Les fluides doivent pouvoir être échantillonnés, mais on ne cherche pas à obtenir un débit de production élevé. Les diamètres les plus petits sont utilisés dès le début, l'équipement du puits est réduit au minimum et l'installation d'une pompe de 4" est jugée suffisante. La zone du réservoir potentiel est forée en diamètre ≤ 89 mm (≤ 3¹/₂"). C'est dans cette configuration que l'économie maxi-

mum est réalisée (40 à > 60%), par rapport à un forage conventionnel de grand diamètre.

- Prospection d'un réservoir et production à débit modéré

En cas de succès, le forage slimhole doit également pouvoir être mis en production à débit modéré (20-50 m³/h). La section haute du puits doit alors avoir un diamètre suffisant pour prévoir l'installation d'une pompe 6", et l'équipement du forage, bien que simplifié et de diamètre réduit, correspond à celui d'un puits de production normal. La zone de production est forée avec un diamètre entre 89 mm (3¹/₂") et 114 mm (4¹/₂"), et l'économie réalisée par rapport à un puits conventionnel reste importante (20 à > 50%).

- Prospection d'un réservoir et production à débit élevé

Dans ce dernier cas, si le forage slimhole est un succès, une production élevée est alors souhaitée (50-100 m³/h), et la chambre de pompage doit accueillir une pompe de 8" ou 10".

Tab. 5 Coût total et coût par mètre des forages géothermiques rotary en Suisse, en fonction de leur profondeur et du diamètre de la zone de production (CRSFA 1997; Häring 1997; Office fédéral de l'énergie 1995; Gorhan 1997, communic. pers.)

Forage	Année forage	Profondeur (m)	Diamètre de production		Coût total (milliers CHF) (milliers US\$)**	Coût par mètre (CHF/m) (US\$/m)**
			(mm)	(inch)		
KREUZLINGEN	1988	655	216	8 ¹ / ₂ "	1013 810	1547 1238
RIEHEN 1	1988	1547	152	6"		
RIEHEN 2	1988	1247	159	6 ¹ / ₄ "		
Total RIEHEN 1 + 2					6165 4932	2207 1766
REINACH	1989	1793	152	6"	4091 3273	2282 1826
ST MORITZ	1991	1600	213	8 ³ / ₈ "	3374 2699	2109 1687
BULLE	1992	800	216	8 ¹ / ₂ "	741 593	926 741
BASSERSDORF	1992-93	553	311	12 ¹ / ₄ "	974 779	1761 1409
WEISSBAD	1993	1618	200	7 ⁷ / ₈ "	2311 1849	1428 1142
THONEX	1993	2690	216	8 ¹ / ₂ "	6548 5238	2434 1947
SCHINZNACH	1996	891	216	8 ¹ / ₂ "	2235 1788	2508 2007
SAILLON	1996	929	200	7 ⁷ / ₈ "	1900 1520	2045 1636
Moyenne		1302				1925 1540

** US\$ calculé avec un taux moyen de 1 US\$ = 1.25 CHF correspondant à la période de forage

La zone de production est forée avec un diamètre entre 114 mm (4¹/₂") et 159 mm (6¹/₄"). Une économie encore significative peut être réalisée par rapport au forage conventionnel (10 à 30%).

8. Discussion

En raison de la récession économique et des prix très bas du baril de pétrole et du kilowattheure électrique, les énergies renouvelables en général et la géothermie en particulier ne sont pas des éléments prioritaires de la politique énergétique en Europe. Aux USA, la situation est similaire, et seuls quelques projets de prospection et de développement de champs géothermiques voient le jour (Combs & Dunn 1992). Sur ces deux

continents, ces projets subissent de plus en plus de retard en raison notamment de fréquentes oppositions, qui ont pour conséquence d'augmenter les coûts globaux, ou simplement de stopper les projets. Dans cet ordre d'idées, l'utilisation de la technique de forage slimhole permet non seulement de diminuer fortement le coût d'une opération, mais également l'impact spatial et temporel d'une prospection par forage. Son influence sur le financement des forages se traduit d'abord de manière directe (plate-forme, sondeuse, équipement, matériel consommable, personnel), mais également de manière indirecte. En effet, les coûts de l'exploration profonde peuvent être fortement minimisés lors de la phase de reconnaissance, alors que les investissements nécessaires pour des forages de production de plus grand diamètre peuvent être repoussés à une

phase ultérieure, lorsque la preuve d'un réservoir aquifère productif sera établie.

Il faut aussi rappeler que l'habitude de forer la zone de production avec un diamètre ≥ 203 mm ($\geq 8''$) n'est pas une obligation technique, ni une nécessité pour obtenir un débit ≤ 100 m³/h et un potentiel de quelques mégawatts thermiques. En Suisse, les forages géothermiques réalisés dans des aquifères profonds (400 à 2500 m), en milieu poreux ou fissuré, n'ont pas révélé jusqu'à aujourd'hui des productivités très importantes, et des débits extraits de 50 à 100 m³/h semblent représenter le domaine de productivité habituellement rencontré en cas de succès. Pour obtenir ces valeurs de débit, un diamètre de foration de la zone de production situé entre 102 mm (4'') et 127 mm (5'') est suffisant.

Le potentiel d'économies d'un forage slimhole peut atteindre 30 à > 50%, ce qui signifie que pour un budget constant, 1.5 à 2 forages slimhole sont réalisables pour le prix d'un puits conventionnel. Dans le cas où un réservoir productif est mis en évidence par un forage slimhole, il est possible d'améliorer sa productivité par l'exécution d'un réalésage partiel ou complet, ou d'une déviation à partir du même puits.

Dans le cas d'une géologie peu complexe, de forages verticaux et de réservoirs aquifères situés à une profondeur modérée (≤ 1500 m), il est important de considérer les méthodes de forages les plus rapides, qui ne privilégient pas forcément l'emploi de très petits diamètres, telles que le marteau fond-de-trou et la circulation inverse. Si pour un forage donné, la technique du carottage continu se révèle favorable sur le plan financier, on peut tenter d'infléchir encore les coûts en renonçant à un taux élevé de récupération des carottes ($> 90\%$), tel que cela se pratique pour les forages scientifiques ou géotechniques, et de se satisfaire d'un taux de récupération de 50 à 70%. Il peut aussi être avantageux sur le plan financier de prévoir plusieurs techniques de forage pour un seul ouvrage (marteau fond-de-trou, rotary, circulation inverse, carottage continu), en fonction de la géologie bien sûr, mais également de l'utilisation future du puits et des limites de chaque méthode.

9. Conclusions

Dans le but de prospecter et d'exploiter des aquifères profonds, on peut affirmer aujourd'hui que l'utilisation des techniques de forage slimhole apporte un certain nombre d'avantages essentiels.

- Baisse conséquente sur l'ensemble des coûts d'une opération de forage.
- Réduction très importante de l'impact du chantier en zone urbaine ou écologiquement sensible.
- Applicabilité à tous les types de forages (géothermie, thermalisme, eau minérale, eau potable ou industrielle).
- Adaptation sans limite à tous les environnements géologiques et à tous les domaines de profondeur.
- Accès à toutes les diagraphies, aux tests de stimulation et aux essais de production.

- Possibilité, à partir de la production d'un forage slimhole, de simuler numériquement le débit d'un puits de grand diamètre.
- Capacité de combiner plusieurs techniques de forage pour un même ouvrage.
- Etablissement d'une stratégie multi-objectifs, avec des sondages de reconnaissance pure, des forages mixtes d'exploration et de production, ainsi que des puits de production.

Actuellement, les techniques de forage slimhole sont pratiquées dans de nombreux pays, avec un degré de complexité variable selon les besoins et les budgets disponibles. En Suisse, l'application de ces techniques pourraient représenter un argument important pour établir une future stratégie de prospection des ressources géothermiques.

Remerciements

L'Office fédéral de l'énergie et H.L. Gorhan, responsable des programmes de recherche en géothermie, sont remerciés pour leur soutien et le financement de cette publication. Des remerciements s'adressent également à X. Poul (Boniface SA) et H. D. Rüfenacht (STUMP Sondages SA) pour leur disponibilité et les nombreuses informations qu'ils nous ont transmises. Finalement, l'auteur remercie vivement les deux relecteurs du manuscrit, S. Berli (Foralith AG) et W. Müller-Ruhe (Bohrgesell. Rhein-Ruhr mbH), pour leurs commentaires judicieux.

BIBLIOGRAPHIE

- BERLI, S. & PINGEL, R. 1994: Anwendung der modernen Tiefbohrtechnik in der Schweiz. Bull. schweiz. Ver. Petroleum-Geol. u. -Ing. 61, 138, 45-66.
- BONIFACE SA 1987: Forage à l'air en circulation inverse au marteau fond-de-trou. Le Moniteur/Supplément «Matériels», 30 avril 1987.
- CRSFA 1997: Forage géothermique JAFE à Saillon, VS. Géothermie CH, Bulletin de la Société suisse pour la géothermie 2/97, 4-5.
- COMBS, J. 1996: Slim holes and geothermal project financing - Overview. Sandia/GRC Geothermal slimhole technology workshop, July 1996, Reno, Nevada.
- COMBS, J. & DUNN, J.C. 1992: Geothermal exploration and reservoir assessment: the need for a U.S. Department of Energy slim-hole R & D program in the 1990s. Geothermal Resources Council Bulletin 21, 10, 329-337.
- COMMISSION DES SERVICES INDUSTRIELS 1983: Rapport concernant la construction d'un puits profond à Treytel, Commune de Bevaix, inédit.
- COOPER, G. A. 1994: Directional drilling. Scientific American, May 1994, 56-61.
- CULVER, G. 1989: Drilling and well construction. In: LIENAU, P. J. & LUNIS, B. C. (eds.). Geothermal direct use engineering and design guidebook. Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, 95-130.
- DACHARY, J. & VIGHETTO, R. 1992: Slim hole drilling proven in remote exploration project. Oil & Gas Journal 90, 25, 62-67.
- DETAY, M. 1993: Le forage d'eau. Réalisation, entretien, réhabilitation. Masson, Paris.
- DRILL SYSTEMS INC. 1985: Reverse circulation drilling. Gold and silver exploration. Note technique inédite.
- EDMISTON, R.C. 1993: Using flow tests in slimholes to reduce geothermal exploration costs in the Basin and Range geologic province of the USA. Geothermal Resources Council Transactions 17, 417-424.
- ENTEC INDUSTRIES LTD. 1988: Product: Simplex 500. Case histories for USA and Canada. Entec Industries Ltd., Calgary, Canada. Note technique inédite.

- FEUGA, B. 1987: Le système géothermal du Cézallier: cadre géologique général et reconnaissance par sondages. *Géologie de la France* 4, 3-16.
- FINGER, J.T., HICKOX, C.E., EATON, R.R. & JACOBSON, R.D. 1994: Slim-hole exploration at Steamboat Hills geothermal field. *Geothermal Resources Council Bulletin* 23, 3, 97-104.
- FLOYD, K. 1987: Slim holes haul in savings. *Drilling* 48, 4, 24-26.
- FLYNN, T., BUCHANAN, P.K. & MILLER, J.D. 1994: Summary of geology and core lithology slim hole SNLG 87-29. Steamboat Hills, Nevada. *Geothermal Resources Council Bulletin* 23, 3, 105-110.
- FORALITH AG 1992: Slimhole-Dokumentation zur geothermischen Prospektion. Rapport inédit.
- FURRY, S. & DOBSON, P. 1996: Slim-hole exploration in north Sumatra. Sandia/GRC Geothermal slimhole technology workshop, July 1996, Reno, Nevada.
- GARG, S.K. & COMBS, J. 1993: Use of slim holes for geothermal exploration and reservoir assessment: a preliminary report on Japanese experience. Sandia National Laboratories, USA, SAND93-7029 Report.
- 1994: Slim holes for geothermal exploration and reservoir assessment in Japan. *Geothermal Resources Council Bulletin* 23, 3, 89-96.
- GEOLGISCHES INSTITUT DR SCHMASSMANN AG 1991: Schlussdokumentation über die Mineralwassererschliessung der Arkina SA, Yverdon-Les-Bains, von 1973 bis 1987. Rapport inédit.
- GOFF, F., GOFF, S.J., KELKAR, S., SHEVENELL, L., TRUESDELL, A.H., MUSGRAVE, J., RÜFENACHT, H. & FLORES, W. 1991: Exploration drilling and reservoir model of the Platanares geothermal system, Honduras, Central America. *J. Volcanology and Geothermal Research* 45, 101-123.
- GOFF, S. (Ed.) 1992: Results of geothermal gradient core hole TCB-1, Tecuamburro volcano geothermal site, Guatemala, Central America. Los Alamos National Laboratory, USA. LA-12185-MS Report.
- GOFF, S., LAUGHLIN, A.W., RÜFENACHT, H.D., GOFF, F., HEIKEN, G., ADAMS, A.I., MUSGRAVE, J., PLANNER, H. & RAMOS, N. 1988: Exploration geothermal gradient drilling, Platanares, Honduras, Central America. Los Alamos National Laboratory, USA. LA-11349-MS Report.
- GOFF, S.J., GOFF, F. & JANIK, C.J. 1992: Tecuamburro volcano, Guatemala: exploration geothermal gradient drilling and results. *Geothermics* 21, 4, 483-502.
- GUNN, K.B. 1991: Well cored to 9,800 ft in Paraguay. *Oil & Gas Journal* 89, 19, 51-55.
- HÄRING, M. O. 1997: Geothermiebohrung Schinznach Bad S3. *Géothermie CH, Bulletin de la Société suisse pour la géothermie* 2/97, 1-3.
- HOWES, J. 1991: Advances in slimhole drilling. *Petroleum Review* 45, 426-428.
- JANTSCHIK, R. & RIEPE, L. 1994: BEB's experience with BPS'S slimhole logging tools in their first coiled tubing drilled horizontal well Barenburg 39a. *Production Newsletter July-August 1994*, 54-56.
- KATO, H. & KIZAKI, Y. 1993: Utilization of slim holes in geothermal resource exploration in Japan: experience of the NEDO geothermal development promotion survey project. *Geothermal Resources Council Transactions* 17, 431-435.
- LITTLETON, J. 1992: Refined slimhole drilling technology renews operator interest. *Petroleum Engineer International* 64, 6, 19-26.
- LYSNE, P. & JACOBSON, R. 1990: Scientific drilling in hydrothermal terrains. *Scientific Drilling* 1, 184-192.
- MARGUERITAT, G. 1985: Expérience de forage en très petit diamètre chez Elf Aquitaine. *Pétrole et Techniques* 320, 62-70.
- MICRODRILL 1985a: Mini rig shows its paces. *The Oilman*, July 1985, 37-38.
- 1985b: A complete drilling system for wells up to 1500 m. *Oil Gas - European Magazine* 11, 2, 2-6.
- MORNOD, L. & BERTRAND, J. 1975: Rapport sur la mise en évidence par forage profond d'un aquifère productif dans la zone noyée des calcaires du Malm de la Vallée de Court-Tavannes. Rapport Centre d'hydrologie souterraine, Bulle, inédit.
- MURRAY, P.J., SPICER, P.J., JANTZEN, R.E., SYRSTAD, S.O. & TAYLOR, M.R. 1993: Slimhole exploration: a case for partnership in the nineties. SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, February 1993, SPE/IADC 25724, 439-448.
- OFFICE FEDERAL DE L'ENERGIE 1995: Rapport d'activités annuel 1994 de la Commission fédérale de géothermie et du stockage souterrain de chaleur. Berne, inédit.
- OLSON, H.J. & DEYMONAZ, J.E. 1993: The Hawaiian scientific observation hole (SOH) program. Costs and history of a successful slim hole drilling program. *Geothermal Resources Council Transactions* 17, 443-450.
- PLOTE, H. 1985: Sondage de reconnaissance hydrogéologique. Méthode du marteau fond-de-trou. Exécution et surveillance. *Manuels & Méthodes*, 12, BRGM, Orléans.
- PRITCHETT, J.W. 1993: Preliminary study of discharge characteristics of slim holes compared to production wells in liquid-dominated geothermal reservoirs. Sandia National Laboratories, USA. SAND93-7028 Report.
- REDERON, C., BERNARDET, G., CAHUZAC, J., GODDE, G. & GRIENDZINSKI, R. 1990: Réduire le coût du poste forage: coût unitaire des puits et nombre de puits. Table Ronde CEP & M-COPREP du 7 novembre 1990, TOTAL CFP, Paris, 211-236.
- ROUX, D. & HAUBER, L. 1993: Etat actuel de la géothermie profonde en Suisse. *Ingénieurs et Architectes Suisses* 23, 458-464.
- SHERIDAN, E.H. 1993: Amoco, Nabors pioneer deep slim-hole rig. *Drilling contractor* 49, 1, 23-24.
- SHIRLEY, D.H. & HAY, M. 1988: Using the percussion hammer drill to install groundwater monitor wells in coarse alluvial deposits. Salt River project, Water quality & geohydrology Dept., Phoenix, Arizona. Rapport inédit.
- STRAUSS, M.F., STORY, S.L. & MEHLHORN, N.E. 1989: Applications of dual-wall reverse-circulation drilling in ground water exploration and monitoring. *Ground Water Monitoring Review*, Spring 1989 Issue.
- TEPLOW, B. 1996: Comparison of two geothermal exploration drilling strategies. Sandia/GRC Geothermal slimhole technology workshop, July 1996, Reno, Nevada.
- THURSTON, J.A. & ECKELS, M.T. 1982: An introduction to reverse circulation drilling for geothermal exploration. *Geothermal Resources Council, Transactions* 6, 231-233.
- TRAONMILIN, E.M., COURTEILLE, J.M., BERGEROT, J.L., REYSSET, J.L. & LAFICHE, J.M.Y. 1992: First field trial of a coiled tubing for exploration drilling. IADC/SPE Drilling conference, New Orleans, February 1992, IADC/SPE 23876, 301-308.
- VUATAZ, F.D. 1987: Notes techniques sur les forages slimholes. *Inst. mixte rech. géothermiques, Bur. rech. Géol. Min., Orléans*, inédit.
- 1995: Application des techniques de forage slimhole pour diminuer les coûts de prospection des réservoirs profonds, Recherche bibliographique. Rapport pour l'OFEN, CRSFA/95.23, Sion, inédit.
- WALKER, S.H. & MILLHEIM, K.K. 1990: An innovative approach to exploration and exploitation drilling: the slim-hole high-speed drilling system. *J.P.T.* 42, 9, 1184-1191.
- WOLLENBERG, H., EICHELBERGER, J., ELDERS, W., GOFF, F. & YOUNKER, L. 1989: DOE Thermal regimes drilling program through 1988. *EOS* 70, 28, 706-707.
- WORRALL, R.N., VAN LUIJK, J.M., HOUGH, R.B., RETTBERG, A.W. & Mπ, F. 1992: An evolutionary approach to slim-hole drilling, evaluation, and completion. *European Petroleum Conference*, Cannes, France, November 1992, SPE 24965, 47-54.
- ZIEGLER, H.J. 1992: Entwicklung einer Trinkwasserbohrung mit Salzsäure. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 59, 135, 39-48.

Manuscrit reçu le 5 août 1996
Révision acceptée le 30 juillet 1997