

## 2000-2010 : Principales évolutions et avancées technologiques en forage

Auteur : Stéphane MENAND, MINES ParisTech

Face à la complexité des puits forés aujourd'hui, les techniques de forage dites conventionnelles ne suffisent plus pour aller exploiter des réserves de plus en plus profondes et/ou dans des environnements très agressifs. Les nombreux challenges que l'industrie pétrolière rencontre aujourd'hui sont propices à l'innovation technique et technologique. Nous nous proposons ici de parcourir et décrire les principales évolutions et avancées technologiques en forage ces 10 dernières années, depuis le fond du trou jusqu'à la surface.

### Outils de forage

Les outils PDC (Polycrystalline Diamond Compact) ont dépassé durant cette décennie les outils tricône en termes de métrage foré. En effet, si en 2000, 25 % du métrage était réalisé par un outil PDC, ce chiffre atteint aujourd'hui plus de 65 %. Cette forte augmentation est due à plusieurs améliorations tant du point de vue de la qualité des taillants que de la conception même de l'outil. En effet, de nombreux progrès ont été réalisés dans le domaine de la composition des substrats et des liants (répartition carbure de tungstène / cobalt, micro-structure du diamant), de l'interface entre la plaquette diamantée et le substrat de manière à développer des taillants très résistants à l'abrasion et/ou aux impacts, ou encore de nouveau procédé chimique (traitement de la surface, etc...) permettant de réduire le frottement entre la face d'attaque du taillant et la roche.

Dans le domaine de la conception des outils de forage, que ce soit pour les outils PDC, imprégnés ou pour les tricônes, des améliorations ont été nécessaires pour s'adapter aux nouveaux systèmes de forage (Rotary Steerable System, RSS) ou à des formations dures et abrasives et/ou hétérogènes. Un grand intérêt a été apporté par exemple au design de la garde (zone de stabilisation) de l'outil de manière à ce que l'outil de forage initie une déviation telle que demandé par le système directionnel. Des outils aussi performants dans des roches dures et abrasives que dans des argiles (shales) ont ainsi vu le jour. Signalons également quelques belles innovations, comme des outils capables de remonter des micro-carottes de roche, d'autres capables de forer sans poids ou presque, ou encore le développement d'outils marteau (*hammer bits*) promis à de belles performances en roches dures.

Enfin, terminons par l'apparition très récente d'un outil dit hybride (à mi-chemin entre l'outil tricône et l'outil PDC), même si l'idée initiale date des années 50.



Outil Hybride (Baker Hughes)

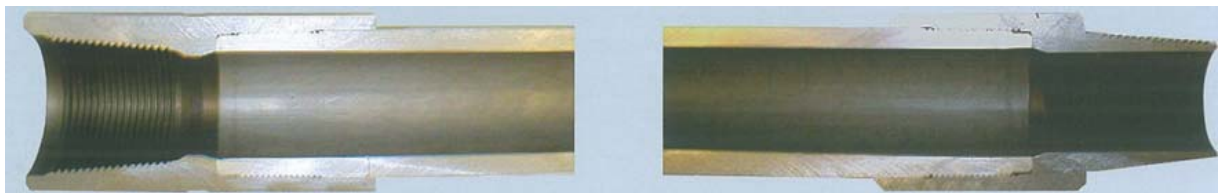
## Equipements de fond

C'est un domaine dans lequel le rythme d'innovation est très soutenu. Cette décennie a vu l'avènement et la maturité des systèmes RSS, avec des systèmes dits Push-the-bit (mécanisme de déviation basée sur une force latérale à l'outil) et des systèmes dits Point-the-bit (mécanisme de déviation basée sur un pivotement de l'outil). Outre la fiabilité qui en l'espace de 10 ans s'est considérablement améliorée, les systèmes RSS offrent désormais un grand nombre de mesures embarquées permettant entre autres une reconnaissance des formations pendant le forage, ou encore un contrôle automatisé de la direction de forage. Cette maturité s'est d'ailleurs concrétisée par des systèmes RSS petit diamètre, aussi petits que 3 1/8 inch. Face à ce marché de systèmes RSS dits haut-de-gamme et coûteux, signalons enfin ces dernières années l'apparition de systèmes RSS moins sophistiqués et moins onéreux.

Plus récemment, face à des zones plus difficiles à forer (les dômes de sel par exemple), l'usage des élargisseurs pendant l'opération de forage (*Reaming While Drilling*) est de plus en plus fréquent. Les derniers développements se sont portés vers des élargisseurs dits concentriques à lames rétractables. Un grand effort est aujourd'hui concentré sur le fonctionnement de ces systèmes qui modifient la répartition de la poussée à l'outil et les phénomènes vibratoires.

Afin de réduire les vibrations, notamment celles proches de l'outil, de nombreux systèmes mécaniques permettant d'amortir les chocs et/ou de limiter les trop grandes variations de poids ou de couple ont été développés. Le but final étant bien évidemment de réduire les dysfonctionnements et ainsi d'augmenter les performances globales de forage. Si ces derniers systèmes ont été conçus pour réduire les vibrations, d'autres systèmes au contraire ont été développés pour faire osciller le train de tige de manière à vaincre les frottements, notamment dans le cadre des puits à long déport, où le frottement est important.

Les fabricants d'équipement de forage/complétion et les contractants de forage doivent répondre à la demande de plus en plus exigeante des opérateurs en fournissant un équipement dont la tenue mécanique en service est garantie dans ces conditions extrêmes (températures de l'ordre de 250 deg. et pression dépassant 2500 bars). L'acier a été et reste encore le matériau utilisé dans la quasi-totalité des forages à travers le monde. Mais face à la complexité des forages, l'acier malgré sa résistance sans cesse améliorée (des grades à 165 ksi ont été développés récemment) pourrait devenir le facteur limitant pour aller explorer les puits très profonds (*Deep Reservoir*) ou de grande longueur (*Extended Reach Drilling*). Ainsi, une alternative à l'acier existe et a fait l'objet de nombreux développements comme l'aluminium, le titane, ou encore les matériaux composites. L'aluminium par exemple, malgré une utilisation très ancienne par les russes, commence à faire son apparition dans les programmes de conception de train de tige pour les puits ERD des compagnies opératrices internationales.



Tige aluminium (Source : WeatherFord – Aquatic company)

Les fabricants de tiges de forage ont également repoussé les limites de conception des connexions (*tool-joint*). En effet, les puits ERD à cause des frottements importants entraînent

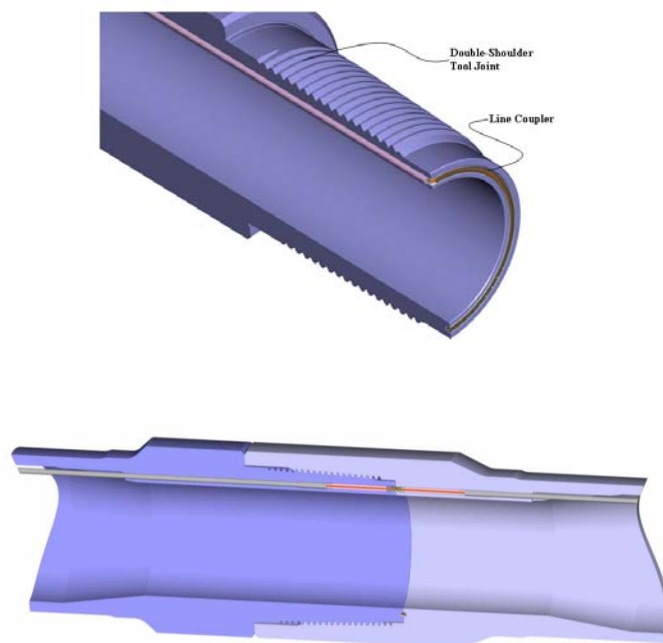
des couples de rotation importants exigeant alors des connexions dont le couple de serrage est élevé. En moins de dix ans le couple de serrage a encore gagné près de 20 % atteignant aujourd'hui plus de 80 % d'amélioration par rapport aux standards API, grâce notamment au double épaulement (*double-shoulder*). Toujours dans la problématique des puits fortement déviés, des équipements spéciaux ont été développés pour permettre un meilleur nettoyage des copeaux de roche qui ont tendance à s'accumuler sur la paroi basse du trou, pouvant entraîner un coincement des tiges.

De la même manière que pour les matériaux, de nombreuses avancées ont été réalisées dans le domaine des fluides de forage pour les puits HP/HT (tout en préservant l'environnement), tant d'un point de vue de la formulation (stabilité des propriétés rhéologiques) que de la compréhension des effets combinés de la température et de la pression sur les calculs hydrauliques.

### **Mesures / Instrumentations / Electronique / Automatisme**

Ce domaine a vu une petite révolution ces 10 dernières années. De nombreux progrès ont été enregistrés au niveau de la mesure fond-de-trou (*Logging While Drilling* et *Measurement While Drilling*) et surface (*mud-logging* jusqu'à 50 Hz), de la transmission de l'information depuis l'outil jusqu'à la surface, ou encore de l'électronique capable de résister à de très hautes pressions et températures (jusqu'à 2000 bars et 175 deg. aujourd'hui). Afin de mieux comprendre les mécanismes et connaître l'énergie transmise au fond du trou depuis la surface, de nombreux *subs* instrumentés permettant d'enregistrer, dans la plupart des cas sur carte-mémoire, un certain nombre de paramètres physiques (poids, couple, moments de flexion, accélérations) ont été développés et commercialisés. Cette instrumentation fond-de-trou permet alors de mieux quantifier l'efficacité de forage et de détecter d'éventuels dysfonctionnements. A titre d'exemple, signalons que de nombreuses études se sont concentrées sur la détermination de l'efficacité de coupe pendant le forage (calcul de l'énergie spécifique à l'outil) de manière à estimer les dysfonctionnements liés à l'outil ou optimiser les paramètres opératoires. Même si cette technologie n'est pas encore totalement acceptée dans l'industrie, la technique de sismique pendant le forage (*Seismic While Drilling*) est sans doute promise à un avenir prometteur. Rappelons que cette technique permet de faire une reconnaissance à l'avance (bientôt jusqu'à 30 m ?) des formations qui vont être forées (très utile pour le *geosteering*).

Les tiges câblées sont certainement l'une des innovations phares de ces dernières années. Ces tiges permettent de transmettre à haut débit (aujourd'hui théoriquement jusqu'à 1 Méga bits par seconde, mais 57 000 bits par seconde en pratique aujourd'hui) jusqu'à la surface des mesures faites au fond du trou, mais aussi de contrôler des systèmes fond de trou grâce au mode bi-directionnel (envoi de commande pour activer un système fond de trou). C'est ainsi un débit très supérieur à celui utilisé avec la boue (jusqu'à 20 bits par seconde) ou avec un système électromagnétique (jusqu'à 100 bits par seconde). Cette technologie utilise un câble dans les tiges couplé à des bobines d'induction au niveau des connexions pour transmettre l'information de tige en tige, et quelques répéteurs disposés à des endroits discrets le long du train de tige de manière à garder un signal acceptable. Cette technologie se montre alors très prometteuse pour le contrôle du forage en temps réel qui nécessitera de remonter et d'analyser à la surface une grande quantité de données.



Tige câblée (source : NOV)

Les avancées réalisées dans le domaine de l'instrumentation et de l'informatique ont ouvert des portes au domaine de l'automatisation et/ou contrôle automatique. Le but est d'automatiser certaines tâches humaines pouvant être dangereuses, comme les connexions et la manipulation des tiges (sécurité augmentée), mais aussi de contrôler plus finement et rapidement l'opération de forage, de manière à gérer en temps-réel (ou presque) les éventuelles dysfonctionnements (efficacité de forage améliorée). Enfin, avec l'avènement d'internet et/ou de la communication par satellite, les centres opérationnels à distance (*Remote Drilling Operations Center*) ont été créés. Ces centres décisionnels permettent de suivre les opérations de forage (en mer par exemple) depuis un site situé à terre où toute une équipe collaborative constituée de plusieurs experts contrôle et ajuste le processus de forage en quasi temps-réel.

### Techniques & Méthodes de forage / complétion

Les puits forés aujourd'hui étant plus longs, plus profonds et plus complexes, avec parfois des anomalies de pression et de température, les marges de sécurité se réduisent comme peau de chagrin et nécessite un contrôle précis des paramètres mécaniques et hydrauliques dans le puits. De nombreux développements ont concerné le contrôle de la pression hydraulique pendant le forage (*Managed Pressure Drilling*), rendu nécessaire par la fenêtre de boue très étroite (différence entre la pression de fracturation et la pression de pores des formations). Divers systèmes ont été développés permettant par exemple de contrôler le débit de boue injecté dans le puits ou de jouer sur la contre-pression (*back-pressure*) de manière à bien contrôler la pression au fond du trou pendant la circulation du fluide (contrôle de l'*Equivalent Circulating Density*, *ECD*) et/ou les temps de connexion des tiges. Il est intéressant également de signaler que les puits à long déport sont également concernés par le contrôle de l'*ECD* à cause des pertes de charges qui augmentent avec la longueur toujours croissante des puits.

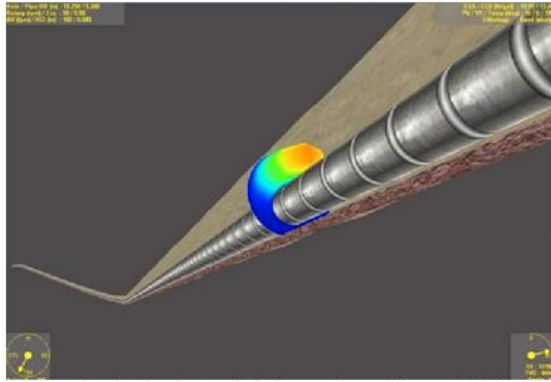
Même si la technique du *Casing While Drilling* a été conçue sur papier et breveté il y a plusieurs dizaines d'années, le concept a vu le jour dans l'industrie juste avant ce nouveau

millénaire. Depuis, cette technique a été utilisée sur plusieurs centaines de puits dont certains en forage dirigé avec un RSS. Outre l'avantage économique de simultanément forer et tuber le puits, cette technique permet entre autres de forer des puits concernés par des problèmes de stabilité des parois et/ou de pertes de boue excessives. Sur le même concept, signalons également le *Liner While Drilling* qui peut également être couplé avec un système RSS.

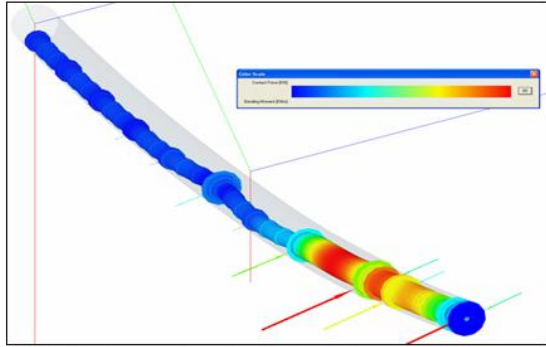
En restant dans la famille des tubages, les tubages expansés (*Solid Expandable Tubulars*) ont réellement commencé à être utilisés au début des années 2000. L'idée première de ce concept est de concevoir des puits dits mono-diamètre, de manière à augmenter des diamètres de production, et ainsi éviter l'effet télescopique des puits. Même si son utilisation aujourd'hui est à peine programmée en planification pour réaliser ce type de puits mono-diamètre, il a été utilisé à de nombreuses reprises dans d'autres applications, comme la réparation de tubages existants, l'isolation de formations difficiles, ou encore la prévention de pertes de fluide.

### **Modélisation**

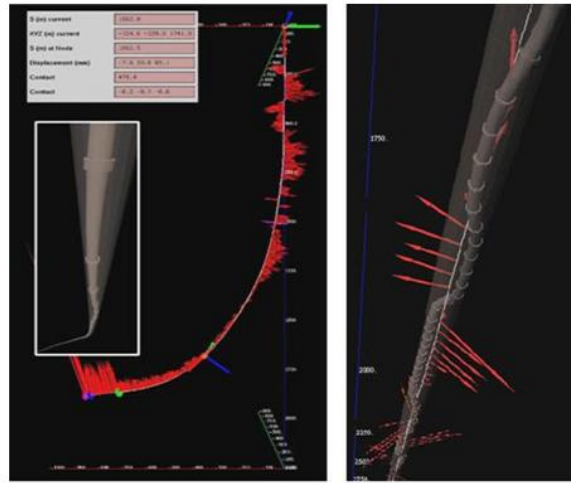
Pour accompagner ces avancées, les logiciels ou codes de calcul permettant de simuler le processus de forage ont subi de nombreux progrès qui sont : une meilleure compréhension des phénomènes et leur mise en équations (modèles plus réalistes), des temps de calcul réduits (augmentation de la puissance de calcul) et enfin de meilleurs outils d'aide à la décision et l'interprétation (visualisation 3D). Si les phénomènes quasi-statiques sont relativement bien compris et modélisés aujourd'hui, il reste de nombreux axes d'amélioration possible pour les phénomènes dynamiques (thermique, hydraulique et mécanique), aussi bien dans la compréhension des phénomènes que pour les temps de calcul qui ne sont pas encore compatibles avec un contrôle en temps réel des opérations de forage. Notons toutefois qu'avec l'amélioration récente des moyens d'acquisition et de transmission des mesures, ces modèles auront l'opportunité de se confronter aux mesures réelles. De nombreux efforts ont été réalisés dans le domaine de la visualisation 3D des phénomènes de forage. En effet, il existe aujourd'hui des logiciels permettant de visualiser avec un grand réalisme le comportement mécanique des tiges ou hydraulique de la boue de forage dans le puits, de manière à mieux interpréter les phénomènes parfois complexes et inattendus.



Modélisation de l'écoulement de la boue en forage (Source: SPE92338)



Modélisation du comportement mécanique de la garniture de forage (source: SPE112647)



Modélisation du comportement mécanique et du flambage des tiges dans les puits complexes (source: Mines ParisTech)

## Conclusion

Grâce à ces 10 ans d'innovation technique et technologique, l'industrie pétrolière a repoussé les limites du forage pour aller exploiter des réserves devenues difficiles d'accès. Ainsi, de nombreux records aussi impressionnants les uns que les autres ont été battus lors de cette dernière décennie. Citons par l'exemple le plus long ERD (puits en offshore au large du Qatar de 12 289 m) avec le plus grand rapport déport-horizontal sur profondeur (10.4), la plus grande profondeur d'eau jamais atteinte en forage 3051 m dans le Golfe du Mexique, ou encore la plus puissante *Top-Drive* jamais construite (1250 tonnes) !