



HAL
open science

Modélisation du comportement mécanique d'une structure élancée rigide à l'intérieur d'un trou de forage à trajectoire complexe : application au dimensionnement du forage pétrolier

Abdel Belaïd, Hedi Sellami, Stéphane Menand, Michel Tijani

► To cite this version:

Abdel Belaïd, Hedi Sellami, Stéphane Menand, Michel Tijani. Modélisation du comportement mécanique d'une structure élancée rigide à l'intérieur d'un trou de forage à trajectoire complexe : application au dimensionnement du forage pétrolier. 17e Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes, France. hal-04276588

HAL Id: hal-04276588

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-04276588>

Submitted on 9 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation du comportement mécanique d'une structure élastique rigide à l'intérieur d'un trou à trajectoire complexe : application au dimensionnement du forage pétrolier

Abdessalem BELAID, Hedi SELLAMI, Stéphane MENAND, Michel TIJANI

Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol (CGES)
ENSMP, 35 Rue Saint-Honoré
77305 FONTAINEBLEAU

Résumé :

Un nouveau modèle de calcul des frottements dans les puits de forage à trajectoires complexes a été développé et validé. Le modèle, basé sur une méthode d'intégration originale couplée à un algorithme de contact, prend en compte la rigidité de la garniture et calcule sa déformée à l'intérieur du puits. La confrontation avec des mesures de chantier valide bien ce nouveau modèle.

Abstract :

A new model for friction calculations inside complex trajectory wells was developed and validated. The model, based on an original method of integration coupled with a contact algorithm, take into account the rigidity of the drilling assembly and search for its deformation state inside the bore. Confrontation with in situ measurements validate well the new model.

Mots clefs :

Structures élastiques ; garniture de forage ; puits ; frottement ; modélisation ; algorithme de contact ; déformée ; trajectoires complexes ; “Torque & Drag”

1 Introduction

Réussir le forage d'un puits pétrolier le plus rapidement possible et à moindre coût est devenu un défi continu pour les professionnels du secteur. Pour relever ce défi, un bon dimensionnement des installations de forage s'impose. La meilleure prédiction des pertes liées aux frottements entre la garniture de forage et les parois de puits, notamment pour les puits à trajectoires fortement déviées, est donc un atout majeur pour ce dimensionnement. Le but de prédiction est de savoir le couple de rotation à fournir en surface (sur la table de rotation) et les tensions, de remontée et de descente de la garniture, en surface (au crochet du rig de forage) pendant l'opération de forage du puits ou pendant les manœuvres (remplacement d'outil de forage, ajout ou retrait d'éléments à la garniture, etc...).

Les modèles usuels de prédiction de frottement [1,3,5,6] montrent certaines insuffisances lorsque la trajectoire de puits se complexifie, d'où la nécessité d'élaborer un modèle plus sûr et plus robuste. En effet, la plupart de ces modèles, négligent la rigidité des tiges composant la garniture (modèles lisses) et supposent simplement que la garniture repose par gravité de manière continue sur la paroi basse du trou de forage écartant ainsi toute déformation de la structure à l'intérieur du puits. Dans notre modèle, nous avons tenu compte de la rigidité des tiges et nous n'avons supposé aucune hypothèse limitatrice sur le contact garniture-parois du puits.

Dans cet article, nous allons exposer la méthodologie adoptée pour l'élaboration du nouveau modèle de calcul de frottements entre garniture de forage et parois du puits [2,8]. La première partie est consacrée à la mise en équations du problème. Nous explicitons les hypothèses adoptées ainsi que la démarche de la formulation théorique. Dans la seconde et dernière partie, nous nous intéressons à la manière de résolution du problème. Nous donnons à la fin de cette partie quelques simulations numériques en utilisant le nouveau modèle et en comparant les résultats obtenus avec ceux d'un modèle classique ainsi qu'avec les mesures réelles du terrain.

2 Formulation du Problème

2.1 Hypothèses de travail

Dans notre modélisation, nous adoptons les hypothèses suivantes sur la structure de forage et sur le puits :

- La structure de forage (la garniture) est assimilée à une poutre constituée d'un matériau élastique (réversibilité) linéaire de module de Young E et de coefficient de Poisson ν .
- En l'absence de toute action externe, la structure prend la forme d'un segment de droite où chaque point (centre de la section droite) est repéré par une abscisse curviligne s variant entre 0 et L la longueur de la poutre.
- La section droite de la poutre est circulaire caractérisée par un rayon externe R_e et un rayon interne R_i qui sont constants par morceaux en fonction de s (en effet, la garniture de forage est généralement constituée de plusieurs tronçons ayant des diamètres extérieurs différents).
- La paroi du trou de forage est supposée rigide et sa section est circulaire caractérisée par un rayon R_t constant par morceau (le puits comporte généralement pendant son forage au moins deux sections, l'une tubée et l'autre à trou découvert) et supérieur au rayon externe de la poutre R_e ; le jeu entre les deux est $J = R_t - R_e$.
- Lorsque la garniture est dans le trou, elle est soumise à des actions aux extrémités ($s=0$: surface; $s=L$: l'outil de forage), à son propre poids par gravité et à des efforts de contact avec la paroi du trou (conditions de liaison unilatérale avec frottement) sachant que les coefficients de frottement sont constants par morceau (contact garniture-tubage en section tubée et contact garniture-roche en section trou découvert). En outre, tout en tenant compte de l'existence de la rotation (couple de frottement), nous négligeons les forces d'inertie (travail en statique).
- La garniture étant dans le trou, la partie avale (s^+) exerce sur la partie amont (s^-), à travers la section droite, des "contraintes" dont la résultante est \vec{T} et dont le moment est \vec{M} sachant que le nombre $\frac{\|\vec{T}\|}{EA_s}$ est petit devant l'unité (A_s étant la section droite de la garniture à l'abscisse s), c'est à dire que la longueur totale varie peu et la section droite reste droite.
- Le trou de forage a une trajectoire définie dans l'espace par le vecteur $\vec{x}(s)$; et la garniture est l'ensemble des points $\vec{x}(s) + \vec{u}(s)$ où le vecteur déplacement \vec{u} de la garniture, au point s , est tel que $\|\vec{u} - (\vec{u} \cdot \vec{t})\vec{t}\| \leq J$ et que $(\frac{J}{L} \ll 1)$ (\vec{t} le vecteur tangent à la structure en s et J le jeu entre la garniture et la paroi du puits en s). Ceci veut dire que la garniture est astreinte à rester dans le trou et que $\vec{x}(s)$ est une approximation de premier ordre de sa déformée à l'intérieur du trou.

2.2 Mise en équation du modèle

2.2.1 Equations d'équilibre

Dans la structure, l'effort intérieur, qui s'écrit dans le repère de Frénet $(\vec{t}, \vec{n}, \vec{b})$ comme $\vec{T} = T_t \vec{t} + T_n \vec{n} + T_b \vec{b}$ et le moment intérieur, qui s'écrit $\vec{M} = M_t \vec{t} + M_n \vec{n} + M_b \vec{b}$, dans le même repère, vérifient les équations, d'équilibre local, suivantes :

$$\frac{d\vec{T}}{ds} + \vec{f} = \vec{0} \quad (\text{Eq.1}) \quad \text{et} \quad \frac{d\vec{M}}{ds} + \vec{t} \wedge \vec{T} + \vec{m} = \vec{0} \quad (\text{Eq.2})$$

avec \vec{f} la force linéique extérieure et \vec{m} le moment linéique extérieur. En notant $\vec{f}_c = f_{cn} \vec{n} + f_{cb} \vec{b}$ le vecteur force linéique normal de contact latéral (figure 1) et $\vec{w}_b = w_{bt} \vec{t} + w_{bn} \vec{n} + w_{bb} \vec{b}$ le poids linéique déjaugé (corrigé par la poussée d'Archimède due à la présence de la boue à l'intérieur du trou), la force \vec{f} et le moment \vec{m} s'écrivent : $\vec{f} = (w_{bt} + \mu_a f_c) \vec{t} + (w_{bn} + f_{cn} + \mu_r f_{cb}) \vec{n} + (w_{bb} + f_{cb} - \mu_r f_{cn}) \vec{b}$ (Eq.3) et $\vec{m} = \mu_r R_c f_c \vec{t}$ (Eq.4) avec $f_c = \sqrt{f_{cn}^2 + f_{cb}^2}$ et μ_a (resp. μ_r) sont les coefficients de frottement axial (resp. radial) entre la garniture et la paroi du puits.

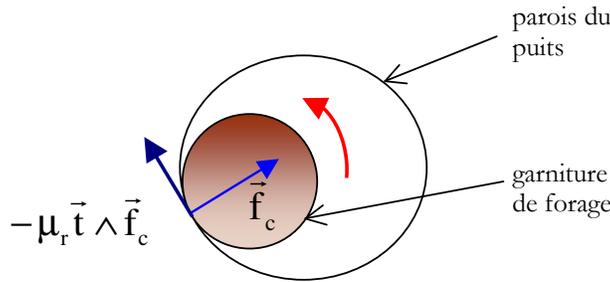


FIG. 1 – Frottement radial de la garniture contre la paroi du puits

Les lois d'élasticité [2,6] reliant les contraintes aux déformations généralisées donnent: $M_n = 0$ (Eq.5) et $M_b = EI\beta$ (Eq.6) (β étant la courbure). En utilisant ces deux dernières équations et à l'aide des formules connues de Serret-Frénet sur le trièdre $(\vec{t}, \vec{n}, \vec{b})$, les deux équations vectorielles (Eq.1) et (Eq.2), nous donnent un système inversible de six équations à six inconnues qui sont $(M_t, T_t, T_n, T_b, f_{cn}, f_{cb})$. En éliminant les équations algébriques simples, ce système peut être ramené à un système de quatre équations différentielles de premier ordre à quatre inconnues qui sont la tension T_t , le couple de torsion M_t et les forces linéiques de contact latéral f_{cn} et f_{cb} . Notons que le modèle obtenu de cette mise en équations est rigide (tient compte de la rigidité de garniture) comme le montre l'équation (Eq.6) sur le moment de flexion.

2.2.2 Equations de raccordement

Les équations établies dans le paragraphe précédent, concernent un tronçon ayant une rigidité EI constante. Nous devons penser aux conditions de raccordements lors de la transition entre deux tronçons à deux sections différentes, donc à deux rigidités différentes, comme au point P (figure 2) ainsi qu'à l'éventuel présence d'actions ponctuels (\vec{F}, \vec{C}) type Dirac. Compte tenu du problème physique, nous ne rencontrons d'actions ponctuels qu'aux deux extrémités $s=0$ et $s=L$ (conditions aux limites) et en d'éventuels points de contacts ponctuels avec la paroi du puits de forage. Pour ces derniers points nous avons :

$$\vec{F} = \mu_a F_c \vec{t} + (F_{cn} + \mu_r F_{cb}) \vec{n} + (F_{cb} - \mu_r F_{cn}) \vec{b} \quad (\text{Eq.7}) \quad \text{et} \quad \vec{C} = \mu_r R_c F_c \vec{t} \quad (\text{Eq.8})$$

avec $F_c = \sqrt{F_{cn}^2 + F_{cb}^2}$

Les conditions de raccordement sont obtenues en utilisant le théorème de la résultante et du moment au point de singularité P.

La formulation complète est obtenue en combinant les quatre équations d'équilibre avec les équations de raccordement aux points de singularité. Notons au passage que le problème de singularité ne se pose pas chez les modèles usuels [1,3,5-6] de calcul de frottements, car la structure est supposée simplement reposer de manière continue sur la paroi basse du trou (exclusion de contacts ponctuels et de transitions).

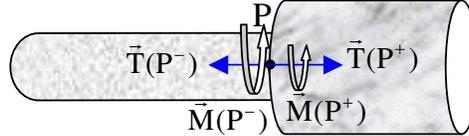


FIG. 2 – Point de discontinuité entre deux tronçons de la garniture ayant deux sections différentes

3 Résolution du Problème

3.1 Incertitude sur la géométrie de la garniture

Comme nous l'avons vu, la structure étudiée, initialement droite, est introduite dans un trou à paroi rigide dont nous connaissons la trajectoire $\bar{\mathbf{x}}(s)$. Or, la vraie géométrie finale de la structure est $\bar{\mathbf{x}}(s) + \bar{\mathbf{u}}(s)$ où le vecteur déplacement $\bar{\mathbf{u}}$ de la garniture, au point s , est tel que $\|\bar{\mathbf{u}} - (\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{t}})\bar{\mathbf{t}}\| \leq \mathbf{J}$; \mathbf{J} étant le jeu entre la

garniture et la paroi. En posant $\bar{\mathbf{t}} = \frac{d\bar{\mathbf{x}}}{ds}$ le vecteur tangent à la trajectoire de puits; le vrai vecteur tangent à structure est donc $(\bar{\mathbf{t}} + \frac{d\bar{\mathbf{u}}}{ds})$. Une fois le vecteur déplacement obtenu, nous devons remplacer, dans la

formulation établie plus haut, le vecteur tangent $\bar{\mathbf{t}}$ par sa nouvelle valeur.

3.2 L'approche de résolution

Pour déterminer les actions internes ($\bar{\mathbf{T}}$ et $\bar{\mathbf{M}}$) ainsi que les déplacements et les rotations ($\bar{\mathbf{u}}$ et $\bar{\boldsymbol{\omega}}$), nous devons connaître en plus de toutes les actions extérieures (y compris les efforts de contact), les conditions aux limites et aussi l'état de référence ($\bar{\mathbf{T}}^0$ et $\bar{\mathbf{M}}^0$) de la structure quand ($\bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{0}}$ et $\bar{\boldsymbol{\omega}} = \bar{\mathbf{0}}$). Ensuite, nous aboutissons à un problème classique d'élasticité linéaire avec contraintes initiales qui peut être transformé en une formulation variationnelle et abordé par une méthode numérique classique telle que la méthode des éléments finis. Mais, profitant du caractère isostatique du problème, (arc simple sans points double), nous avons opté pour une intégration directe des équations d'élasticité et d'équilibre, gagnant ainsi en temps de calcul CPU. Cette intégration est encore facilitée par les conditions aux limites d'encastrement que nous avons adopté en surface ($\bar{\mathbf{u}}(0) = \bar{\mathbf{0}}$ et $\bar{\boldsymbol{\omega}}(0) = \bar{\mathbf{0}}$), point où nous devons, par objectif, déterminer les tensions et le couple de torsion.

3.3 Algorithme de contact

Dans notre approche de résolution, nous avons supposé que les efforts de contact \mathbf{f}_{cn} et \mathbf{f}_{cb} sont connus pour pouvoir intégrer les équations différentielles. Mais en réalité, ces efforts sont à rechercher par un procédé itératif qui consiste à introduire les points de contact l'un après l'autre (en prenant à chaque fois le point qui a un déplacement latéral $\bar{\mathbf{u}}^\perp = \bar{\mathbf{u}} - (\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{t}})\bar{\mathbf{t}}$ le plus important en dehors du jeu \mathbf{J}). L'ensemble des points de contact (à un moment donné du processus itératif) étant donné, on cherche les directions des vecteurs $\bar{\mathbf{f}}_c$ le plus parallèles possible et de même sens que $\bar{\mathbf{u}}^\perp$.

3.4 Simulations numériques

Le modèle développé a été implanté dans un code de calcul qui s'appelle ABIS. Nous avons utilisé ce code pour prédire les tensions en surface, lors de la remontée ou la descente de la garniture, et aussi le couple de torsion en surface, pendant la rotation de la garniture dans le puits, en fonction de la profondeur du point bas de la structure, qui est l'outil de forage.

Les simulations sur des puits réels ont montré que l'hypothèse de contact continu sur la paroi basse du trou adoptée par les modèles usuels n'est pas toujours vraie. La figure ci-dessous (figure 3) montre un exemple de sortie graphique du code ABIS permettant de visualiser dans le trou de forage, la position du contact de la garniture par rapport à la circonférence du trou, ainsi que l'effort de contact associé. En glissant le long de la tige de forage, le code de calcul nous permet de remarquer que le contact peut se localiser quasiment sur n'importe quelle zone autour de la circonférence du puits (surtout lorsque la trajectoire est assez complexe), en contradiction forte avec l'hypothèse de base des modèles conventionnels. Cette localisation affinée des contacts en 3D conduit à des forces de contacts plus réalistes entre la structure de forage et la paroi du puits, et donc à une perte en frottement plus réaliste. En outre, la bonne connaissance des zones de contact et des efforts associés permet d'améliorer les prédictions sur le phénomène bien connu d'usure des tubages ("*casing wear*").

Pour établir des simulations numériques sur des puits réels afin de les comparer aux mesures *in situ*, nous disposons de la description détaillée des tout les composants de la garniture utilisée pour chaque phase de forage (diamètre extérieur, diamètre intérieur, longueur, caractéristiques mécaniques, etc...). Nous disposons aussi de la densité de la boue utilisée, de la description du puits (section tubée, section trou découvert) ainsi que de l'évolution de sa trajectoire en fonction de la profondeur. Quand aux coefficients de frottement mécanique dans la section tubée et la section trou découvert, ils sont difficilement quantifiables expérimentalement avec précision car ils dépendent de plusieurs paramètres (nature et densité de la boue, nature de la formation rencontrée, utilisation ou non de lubrifiants ou d'accessoires mécaniques anti-frottement, conditions opératoires, etc...) et ils sont souvent déterminés par calage des modèles de prédiction des efforts avec les mesures réelles pour plusieurs puits dans un même champ pétrolier (les mêmes valeurs doivent être utilisées pour les différentes simulations, car se sont des valeurs intrinsèques propres au puits foré). Pour le puits simulé dans cet article (figure 4), nous avons utilisé un coefficient de frottement de **0.25** pour le contact garniture-tubage et de **0.34** pour le contact garniture-roche. Ces mêmes valeurs ont été utilisées pour des simulations sur d'autres puits forés dans le même champ pétrolier. Des tests effectués en laboratoire [7], ont montré que des tels valeurs peuvent être enregistrées avec une boue à base d'eau. En outre, dans ses travaux sur les frottements, Fraser et al. [4] donnent des valeurs similaires pour des puits forés en mer du Nord.

La confrontation de notre modèle avec les mesures du terrain sur le puits simulé valide bien notre modèle (figure 4). Cette dernière figure, montre une confrontation entre notre modèle (modèle ABIS) et un modèle habituel utilisé sur chantier (modèle LISSE) avec les mesures enregistrées par la cabine de forage. La confrontation montre que, pour le cas des tensions en surface (en cas de remonté, descente ou simple suspension dans le trou de forage), les deux modèles donnent pratiquement le même résultat et coïncident bien avec les mesures réelles. Par contre, pour le couple de torsion, la comparaison montre que notre modèle coïncide mieux avec les mesures notamment en fin de la trajectoire (l'écart avec le modèle classique LISSE avoisine le 12% lorsque l'outil de forage est à la profondeur de 3000m).

Ceci dit, d'autres simulations tests ont montré que lorsque la trajectoire du puits devienne trop tortueuse et présente des gauchissements (caractère tridimensionnel) trop prononcés, l'écart entre les deux modèles en terme de couple de torsion, de tensions et de forces de contact latéral devient important (dépasse parfois le 30 %). D'où l'intérêt de ce nouveau modèle pour la prédiction des frottements dans les puits pétroliers à trajectoires complexes.

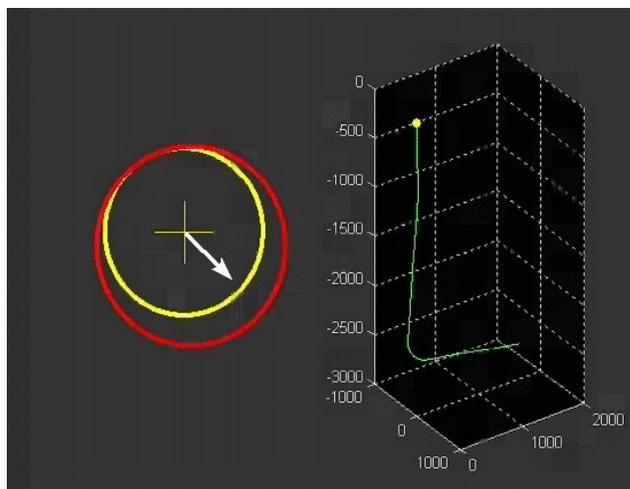


FIG. 3 – Visualisation 3D par ABIS de la position et de la force de contact latéral entre la garniture et la paroi du puits de forage

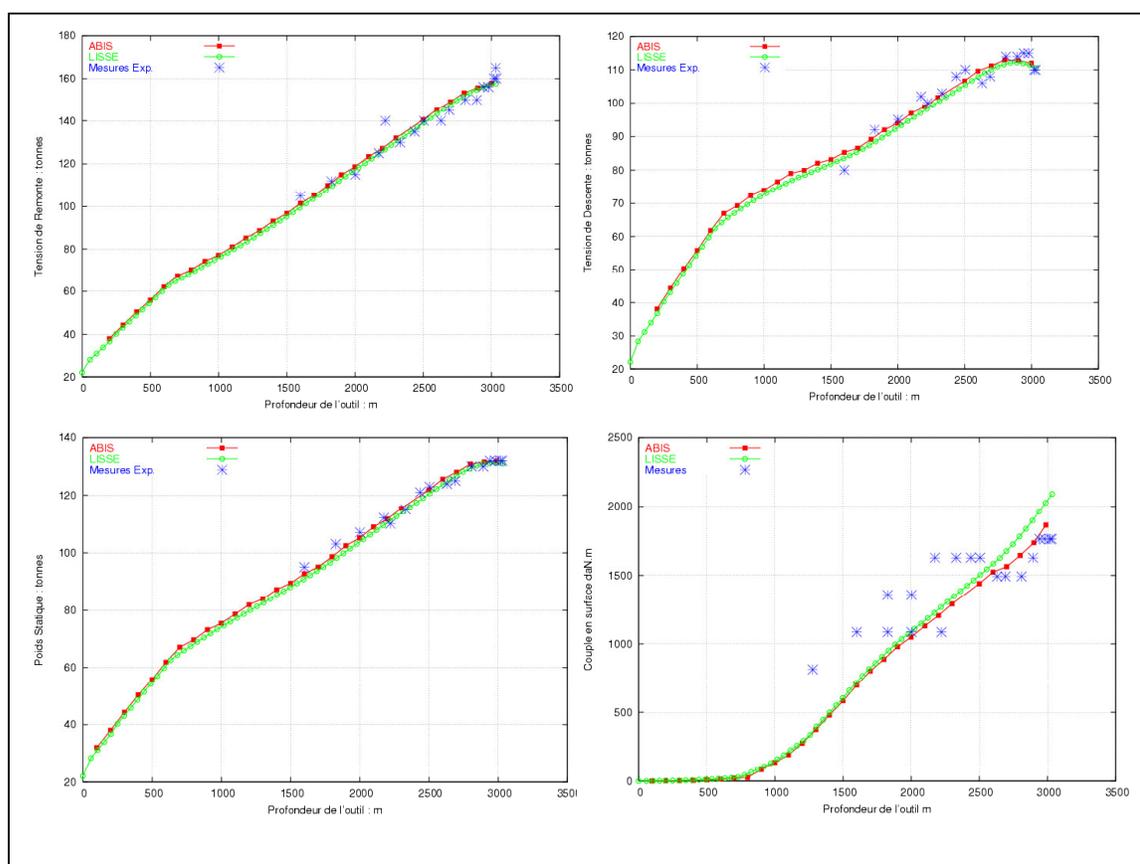


FIG. 4 – Comparaison des tensions et du couple de torsion de la garniture de forage, en surface du puits, obtenus par le modèle ABIS et le modèle LISSE et confrontation avec les mesures du terrain

References

- [1] B. S. Aadnoy and K. Andersen, Design of Oil Wells Using Analytical Friction Models, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 931, Sept 4, 2001
- [2] A. Belaid, Modélisation tridimensionnelle du comportement mécanique de la garniture de forage dans les puits pétroliers à trajectoires complexes , Rapport de thèse, Juin, 2005
- [3] JF. Brett , A. D. Beckett, C.A. Holt and D.L. Smith, Uses and Limitations of a Drill string Tension and Torque Model to Monitor Hole Conditions, SPE 16664, Dallas, TX, Sept. 27-30, 1987
- [4] S-D. Fraser, M. Rennie and C-J. Mason, Planning Fit for Purpose Solutions with Roller Technology – the Value of Applied e-valuation, SPE 79822, Amsterdam, Netherlands, Feb. 19-21, 2003
- [5] H-S. HO, An Improved Modelling Program for Computing the Torque and Drag in Directional and Deep Wells, SPE 18047, Houston, TX, Oct. 2-5, 1988
- [6] C. A. Johansick , D. B. Friesen and R. Dawson, Torque and Drag in Directional Wells - Prediction and Measurement, SPE 11380, New Orleans, LA, Feb. 20-23, 1983
- [7] P. Skalle, K.R. Backe and al., Microbeads as Lubricant in Drilling Muds Using a Modified Lubricity Tester, SPE 56562, Houston, TX, Oct. 3-6, 1999
- [8] M. Tijani, Frottements dans les puits pétroliers - Code ABIS , Rapport Interne, ENSMP, Octobre, 2003