



HAL
open science

Interaction roche-outil PDC émoussé : théorie et essais

H. Geoffroy, Duc Nguyen-Minh, Jean Bergues, Nasser Hoteit, Claude Putot

► To cite this version:

H. Geoffroy, Duc Nguyen-Minh, Jean Bergues, Nasser Hoteit, Claude Putot. Interaction roche-outil PDC émoussé : théorie et essais. 9th ISRM International Congress on Rock Mechanics, 1999, Paris, France. pp.1229-1235. hal-00116559

HAL Id: hal-00116559

<https://hal.science/hal-00116559>

Submitted on 11 Nov 2022

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Interaction roche-outil PDC émoussé: théorie et essais

H.GEOFFROY, LMS, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France (Presently: DGCB-ENTPE, France)
D. NGUYEN MINH & J. BERGUES, LMS, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France
C. PUTOT, Institut Français du Pétrole, France

RESUME : Cette étude concerne la détermination des paramètres de forage PDC, en tenant compte de l'interaction entre la roche et les taillants individuels en supposant un avancement stabilisé. Ces outils, quoique efficaces dans les formations tendres, présentent une sensibilité importante à l'usure. L'élaboration d'un modèle de forage réaliste doit donc prendre en compte l'effet de l'usure sur la forme de l'outil et de son évolution. A côté du mécanisme de coupe qui peut être assimilé à un phénomène de charge limite, on a étudié le mécanisme moins connu de frottement sur le méplat d'usure. Des études numériques et expérimentales permettent d'identifier les forces de frottement, prépondérantes dans le développement du méplat d'usure, et de confirmer qu'elles sont reliées à la pente d'enfoncement α , liée à la trajectoire hélicoïdale que suit chaque taillant, et ce selon une loi qu'on peut relier au comportement élastoplastique du matériau. Les performances des outils PDC en fonction de l'évolution de l'usure de l'outil peuvent être alors évaluées. On donne quelques exemples, en utilisant des paramètres déduits d'essais tirés de la littérature. Pour valider le modèle, deux types de bancs ont été construits. Des essais préliminaires effectués avec des outils simplifiés ont permis de discuter les hypothèses du modèle. Enfin on propose une procédure expérimentale pour identifier les paramètres du modèle.

2 INTRODUCTION

Dans les années 70 furent introduits les outils PDC (Polycristalline Diamond Compact) ; constitués de plusieurs lames à pastilles cylindriques en diamant synthétique, ils travaillent par cisaillement de la roche. Les PDC ont remplacé les tricônes, dans les formations tendres et non abrasives en raison de leur vitesse d'avancement bien supérieure. Toutefois, leur pénétration sur le marché a été limitée par une durée de vie trop courte dans les formations dures ou fortement litées. Leurs performances y sont réduites en raison d'une usure importante de l'outil.

Dans notre étude, nous admettrons que l'usure se traduit par un méplat sous la lame PDC, forme assez courante due à l'abrasion. Une telle usure est associée à la progression régulière de l'outil. Le méplat d'usure en s'accroissant impose d'avoir un poids sur l'outil de plus en plus important pour garder une vitesse d'avancement constante.

L'étude de la réponse de l'outil passe alors par une meilleure compréhension des phénomènes au niveau local du taillant PDC. Cette démarche est certes classique et un acquis certain existe déjà dans la littérature ; mais il apparaît justement que le frottement sur le méplat d'usure, qui contribue largement à l'énergie dépensée par le travail du taillant élémentaire, reste mal identifié.

La modélisation des efforts de frottement qui s'exercent sur le taillant individuel, en relation avec la rhéologie de la roche constitue la première étape de notre travail. Ces mécanismes sont ensuite intégrés dans un modèle global décrivant le poids sur l'outil WOB , le couple T , et l'avance par tour a qui sont les paramètres de fonctionnement de l'outil.

3 MECANISMES DE COUPE

L'action d'un taillant seul défini par un angle de coupe θ et un méplat d'usure se décompose classiquement en deux mécanismes que l'on va considérer comme indépendants (Figure 1) : la «coupe» sur la face d'attaque du taillant, et le «frottement» sur le méplat d'usure (Detourmay (1992), Kuru (1990), Sellami (1987)) :

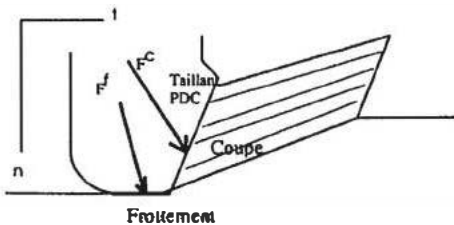


Figure 1. Décomposition des efforts sous le taillant.

Soit (n, t) le repère local du taillant situé dans un plan contenant le vecteur déplacement du taillant et qui y est normal. Les forces appliquées sur le taillant se décomposent suivant une force de coupe s'exerçant sur la face d'attaque du taillant et une force de frottement s'appliquant sur le méplat d'usure. Leurs coordonnées dans le plan (n, t) sont :

$$F_t = F_t^c + F_t^f$$

$$F_n = F_n^c + F_n^f$$

Le mécanisme de coupe peut être considéré comme résultant d'un mécanisme de rupture de la roche ou de chargement limite. Si l'on considère un taillant neuf, en coupe orthogonale, la force de coupe est proportionnelle à la profondeur d , en d'autres

termes, le travail par unité de volume déblayé par le taillant est constant, égal à ε_0 , énergie spécifique « intrinsèque ». Cette énergie dépend de l'angle de coupe et du frottement de contact sur la face de coupe. Nous pouvons faire l'hypothèse simplificatrice pour un angle de coupe donné, que ε_0 reste indépendant de la forme de la section de coupe, c'est-à-dire, qu'il est peu sensible à l'effet tridimensionnel :

$$\begin{aligned} F_t^c &= \varepsilon_0 A_c \\ F_n^c &= \zeta F_t^c \end{aligned} \quad (1)$$

où A_c est la surface de coupe et ζ un coefficient de frottement dépendant de l'inclinaison θ du taillant.

Le mécanisme de frottement est un mécanisme important car il détermine la loi d'avancement de l'outil en fonction de la charge appliquée. Il peut être responsable d'une grande partie de la dépense d'énergie spécifique et régir l'usure des outils. Or le mécanisme de rupture qui y est associé apparaît moins bien cerné. Des travaux menés par Nguyen Minh (1974) ont servi de point de départ. Il a étudié le cas limite de l'outil à fond plat chargé librement par une force verticale. L'outil tout en progressant s'enfonce avec une pente constante α . α représente l'angle entre la vitesse de déplacement relative à l'outil et la surface de contact. Les essais ont été effectués sur un matériau modèle ; un mélange de sable et de paraffine relativement « plastique ». Lorsque la profondeur est faible, la force horizontale (force de coupe) est quasi-constante et assimilable à une force de frottement sur la base de l'outil. L'outil s'enfoncé suivant une pente α croissante avec l'effort normal appliqué du fait de sa progression. Les essais mettent en évidence une relation linéaire entre les contraintes normales et l'angle α . α ne dépend pas de la profondeur de coupe. En se fondant sur ces considérations expérimentales, Nguyen Minh (1974) propose un mécanisme relié aux déformations élastoplastiques. Ce mécanisme doit pouvoir être rapproché du mécanisme de frottement dans le cas d'un taillant PDC.

Afin de préciser ce que représente alors α , considérons un taillant dont le méplat est orthogonal à l'axe de rotation de l'outil (Oz). Il suit une trajectoire hélicoïdale d'axe Oz dont le pas est l'avance par tour a (Figure 2).

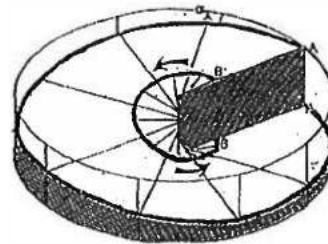


Figure 2. Représentation de la trajectoire des taillants

Les points A et B représentent deux taillants disposés sur un rayon de l'outil. A la fin d'un tour ils se sont enfoncés d'une profondeur a . α est inversement proportionnel à la distance qui sépare le centre du taillant de l'axe de l'outil. Les taillants les plus proches du centre de l'outil s'enfoncent avec l'angle le plus élevé. Dans un forage pétrolier, la vitesse d'avancement moyenne peut varier de 15 m/h à 60 m/h. Prenant une vitesse de rotation moyenne de 120 trs/mn, l'avance moyenne a est alors comprise entre 2 mm/tr et 8 mm/tr. Pour un outil de diamètre 216 mm, on peut alors estimer α entre $3 \cdot 10^{-3}$ et $6 \cdot 10^{-2}$. Précisons toutefois que les vitesses de progression peuvent être de l'ordre de quelques mètres par heure dans le cas de formations dures.

L'étude du mécanisme de frottement va être menée à partir des deux hypothèses sur l'existence d'une relation entre α et les forces de frottement et sur un mode de déformation élastoplastique. Cependant ces considérations demandent à être vérifiées expérimentalement sur des roches représentatives et confirmées par une étude numérique.

4 ETUDE DU MECANISME DE FROTTEMENT

4.1 Etude expérimentale

L'élaboration du banc d'essais a été guidée par deux considérations ; l'évaluation de l'effort normal $F_{n,f}$ sous le méplat d'usure et la mesure de l'angle d'enfoncement α et sa relation éventuelle avec $F_{n,f}$. Or les expériences classiques menées sur des taillants élémentaires sont en général réalisées avec des profondeurs de coupe constante ; ce qui ne met pas en valeur ce mécanisme de frottement.

Dans notre cas, les essais ont été faits à effort imposé et non à déplacement imposé (Figure 3). Comme l'angle imposé qui résulte de l'effort normal appliqué au taillant est assez faible, nous avons choisi le principe du banc rotatif, l'échantillon tournant autour d'un axe vertical et le taillant mobile suivant un axe vertical fixe. La tige peut être placée à différents rayons afin de simuler différentes positions du taillant sur l'outil.

Le matériau sur lequel sont effectués les essais est une craie de Liège relativement homogène. C'est une roche très poreuse qui présente une destruction progressive de sa structure poreuse sous des chargements hydrostatiques et déviatoriques. C'est un matériau tendre à grains fins et dont la taille est compatible avec les dimensions des outils de laboratoire utilisés.

Deux types d'essais différents ont été menés avec des taillants en acier. L'un des taillants est un parallélépipède de 10 mm de longueur, la face d'attaque est un rectangle. Ce type de géométrie permet d'étudier le mécanisme de frottement seul. L'autre est un cylindre affûté de 13 mm de diamètre représentant le taillant neuf.

La profondeur de coupe en fonction de la distance parcourue par le taillant est présentée dans les deux cas en Figure 4.

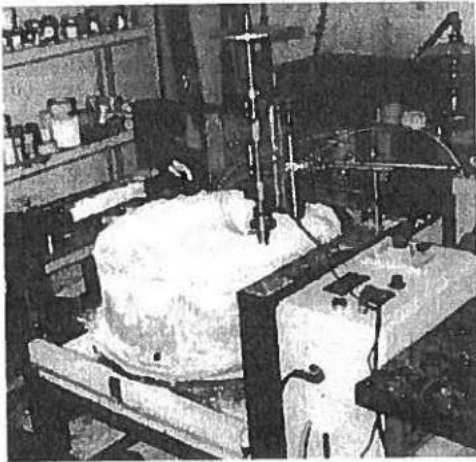


Figure 3. Montage expérimental.

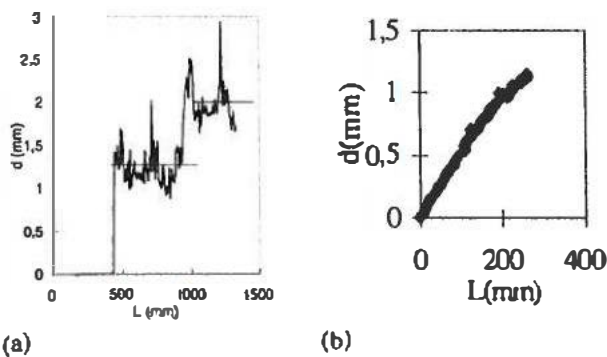


Figure 4. d en fonction de L pour le taillant neuf (a) et usé (b)

Cette représentation illustre clairement l'existence de deux mécanismes. Dans le cas du taillant neuf (Figure 4-(a)), la profondeur atteinte se stabilise rapidement autour d'une valeur moyenne symbolisée par les deux traits horizontaux en pointillés et correspondant à deux tours successifs effectués par le taillant pour un même effort normal imposé. Dans le cas du taillant usé (Figure 4-(b)), la profondeur augmente graduellement avec la distance parcourue et ce pour un effort normal imposé. En effet, le taillant pénètre peu à peu dans la roche avec un angle moyen qui est notre pente d'enfoncement α et qui est relié à la force normale appliquée.

4.2 Etude numérique

4.2.1 Formulation

L'étude numérique est consacrée à la simulation du passage du méplat sur la roche. Les mécanismes de coupe et de frottement ayant été considérés indépendants, le mécanisme de frottement peut être étudié seul.

Le méplat est assimilé à un poinçon rigide, en contact avec le massif sur une longueur l et incliné d'un angle α . Le poinçon glisse sur un massif semi-infini avec une vitesse constante v . Les calculs sont effectués en tenant compte de l'existence d'un frottement entre le massif et le poinçon (Figure 5).

Il s'agit ici d'un problème de contact avec frottement. Le contact s'applique sur une longueur $2a$ a priori inconnue. Sur $[a, a]$, $v'(x) = -\tan \alpha$. Nous traitons un problème de contact unilatéral ; la distribution de pression solution $p(x)$ doit donc vérifier $p(x) \geq 0$ sur $[-a, a]$ pour être physiquement admissible.

L'avancement du poinçon est simulé en utilisant un algorithme stationnaire implanté dans un code aux éléments finis (Maitoumam, 1989). Cet algorithme permet en se plaçant dans un repère bougeant avec le taillant de traiter le problème stationnaire pour une géométrie fixée.

Nous avons fait l'hypothèse que le mécanisme de frottement est de nature élastoplastique. Deux modèles ont été utilisés pour

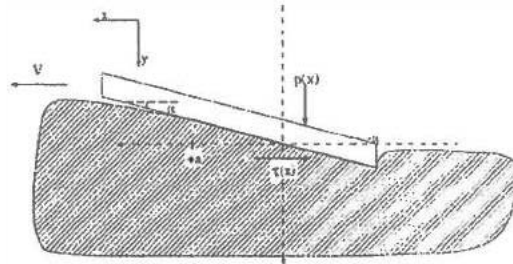


Figure 5. Modélisation du méplat

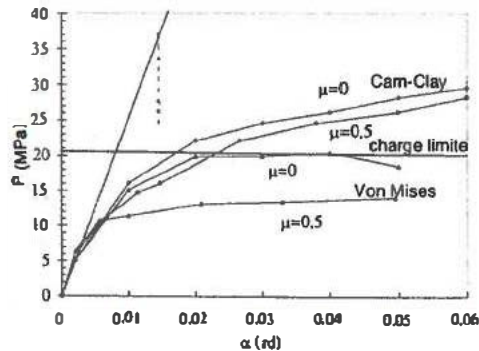


Figure 6. P en fonction de α : loi de Von Mises et de Cam-Clay

décrire le comportement du massif. La loi de Von Mises, loi élastoplastique parfaite servant de loi de référence, permet d'une part de confirmer l'existence d'une relation entre α et F_n^f et d'autre part de vérifier la nature élastoplastique du mécanisme de frottement. La loi de Cam-Clay permet de qualifier les déformations plastiques et volumiques induites dans la roche par le passage du méplat en tenant compte de l'écroutissement, du radoucissement, de la dilatance et de la contractance de la craie.

4.2.2 Simulations numériques

Soit P, la pression moyenne normale s'exerçant sur le poinçon. Dans le cas du modèle de Von Mises, P augmente avec α jusqu'à 2.10^{-2} , puis atteint une valeur limite proche de la charge limite en poinçonnement. Cependant, dans le cas du modèle de Cam Clay, P augmente indéfiniment en raison de l'écroutissement du matériau et n'atteint pas de charge limite. Pour une valeur donnée de la pression moyenne, α est plus important en présence de frottement (Figure 6).

Ainsi, une relation entre les forces de contact s'exerçant sur le taillant et l'angle α a été mise en évidence, résultant d'un mécanisme élastoplastique :

$$F_n^f = A_w f(\alpha) \text{ et } F_t^f = \mu F_n^f$$

avec A_w aire du méplat.

Le comportement asymptotique de $f(\alpha)$ est lié à l'existence éventuelle d'une charge limite pour le matériau. La forme $f(\alpha)$ est la suivante :

$$f(\alpha) = \sigma_0 \left[1 + \beta_0 \alpha - \exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha_0}\right) \right]$$

Le paramètre α_0 contrôle la progression de f vers l'état asymptotique. Les paramètres α_0 , β_0 , σ_0 et μ dépendent de la rhéologie de la roche. β_0 est nul s'il existe un chargement limite.

5 MODELE DE FORAGE

5.1 Géométrie de l'outil

On se place dans un repère cylindrique (r, θ, z) , l'axe de l'outil étant la direction z . Le profil de l'outil (courbe $z(y)$, Figure 7) est défini comme le lieu de tous les centres des taillants de l'outil lorsqu'ils sont projetés sur un plan méridien fixe (y, z) . On suppose que ce profil est régulier.

La position d'un taillant sur l'outil est défini par ses coordonnées cylindriques, c'est-à-dire par un point sur le profil de l'outil et par sa position angulaire. On suppose que l'outil progresse avec une rotation et une avance constantes. De plus les effets visqueux et le problème d'évacuation des copeaux ne sont pas considérés ici.

Le mouvement de l'outil est simplement décrit en considérant sa vitesse de pénétration δ par tour dans la direction z .

5.2 Forces globales s'exerçant sur l'outil

Les forces globales s'exerçant sur l'outil, à savoir, le couple (T) , le poids sur l'outil (WOB) sont obtenues en sommant les efforts individuels s'exerçant sur chaque taillant, c'est à dire les forces de coupe et de frottement. Le couple et le poids sur l'outil se décomposent de façon identique aux efforts individuels.

$$(T) = (T)^c + (T)^f$$

$$(WOB) = (WOB)^c + (WOB)^f$$

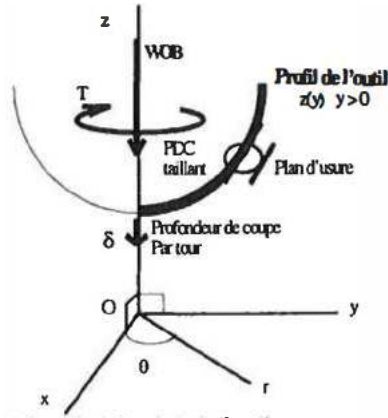


Figure 7. Géométrie de l'outil

5.2.1 Forces de coupe

Les forces globales de coupe appliquées sur l'outil ne dépendent pas de la géométrie de l'outil si l'on suppose que l'écroissance spécifique est constante pour tous les taillants (Detournay) :

$$(T)^c = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \delta R^{*2} \text{ and } (WOB)^c = \zeta \varepsilon_0 \delta R^*$$

avec (δR^*) est la quantité de roche enlevé par l'outil en un tour dans un plan méridien, δ , la pénétration de l'outil par tour, et R^* le rayon de la « ligne de coupe de l'outil » définie par Detournay.

5.2.2 Forces de frottement

Le couple $(T)^f$ et le Poids Sur l'outil $(WOB)^f$ sont calculés à partir des contributions élémentaires des forces de frottement :

$$(T)^f = \sum (y F_t^f) \quad \text{ou} \quad F_t^f \cong F_n^f$$

$$(WOB)^f = \sum F_n^f$$

Afin de déterminer les forces de frottement, il est nécessaire de calculer l'évolution de méplat d'usure. Cette évolution est obtenue à partir d'un état d'usure initial supposé uniformément réparti sur l'ensemble des taillants, parallèlement au profil de l'outil. Les forces de frottement résultent de l'existence d'un angle α entre la surface de la roche, qui peut être supposée tangente au profil de l'outil et le vecteur déplacement de la lame dans son mouvement hélicoïdal. Les forces viennent du développement du méplat d'usure sur les lames.

Décrire l'accroissement de l'usure nécessite de définir l'orientation du méplat d'usure et de la vitesse volumétrique d'usure. Il est généralement admis que le méplat d'usure se développe tangentiellement à la paroi de la roche forée. La surface de la roche est très similaire au profil de l'outil, nous allons donc faire l'hypothèse que le méplat se développe tangentiellement au profil de l'outil, ce qui est confirmé par des expériences in-situ (Sinor, 1989).

ξ représente l'épaisseur perdue par usure par le méplat et est écrit (Nguyen Minh & al., 1998. Glowka, 1985) :

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{1}{C} \frac{F_t^f}{A_w} \mu \frac{F_n^f}{C A_w} \frac{\mu f(\alpha)}{C}$$

En raison de la forme cylindrique du taillant PDC, le méplat d'usure a la forme d'une ellipse tronquée. Cette surface peut s'exprimer en terme de profondeur d'usure ξ dans la direction normale à la paroi (Kuru, 1990). ξ est donnée par l'intégration de l'équation précédente

6 APPLICATIONS

6.1 Description des essais

Un banc de forage en modèle réduit a été construit afin d'identifier les forces globales s'exerçant sur l'outil (Figure 8). Les essais ont été réalisés à des conditions atmosphériques. Le banc a été monté sous une presse qui permet d'imposer un poids normal constant ou une vitesse de pénétration constante sous une vitesse de rotation constante. Le montage expérimental est décrit en détail dans (Geoffroy & al., 1998) :

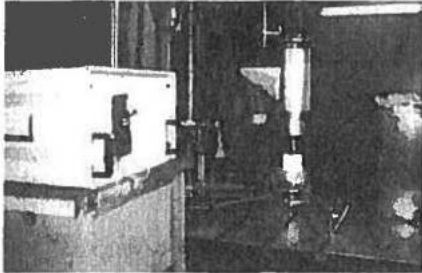


Figure 8 Banc de forage modèle réduit

Rappelons simplement que l'échantillon de craie a 100 mm de diamètre. On mesure le couple et le poids de l'outil sur l'échantillon. Quatre fraises du commerce de 30 mm de diamètre ont été utilisées en tant que version simplifiée d'outils de forage à fond plat ou sphérique avec deux ou trois lames. Le poids et la vitesse de rotation sont en général les paramètres contrôlés par l'opérateur, cependant dans nos essais, la vitesse de pénétration est gardée constante, en effet il a été difficile de maintenir un effort constant. Durant l'essai les copeaux ont été évacués par aspiration. Les paramètres suivants ont été enregistrés : l'effort normal (WOB), le couple exercé sur l'échantillon (T), l'enfoncement de l'outil, la vitesse de rotation (N). N est comprise dans nos essais entre 4,51 et 59,80 tr/min, et la vitesse d'avancement entre 0,11 and 1,11 mm/s.

La Figure 9-(a) montre le couple en fonction du WOB pour chaque fraise et pour différentes vitesses de pénétration et de rotation. Les quatre outils se conduisent de façon similaire en montrant une concavité différente de celle observée dans le cas d'outils usés. Ce sont donc des outils neufs. Des constatations similaires sont faites chez Warren.

Cependant, les énergies spécifiques déduites ne sont pas constantes (Figure 9-(b)) comme on l'a supposé dans le modèle, elles dépendent du type d'outil. Les outils sphériques montrent une augmentation de l'énergie spécifique avec la vitesse d'avancement par tour, ce qui peut être expliqué par des phénomènes de bourrage. L'augmentation de l'énergie spécifique avec la diminution de la profondeur de coupe dans le cas des outils à fond plat peut être expliquée par un mécanisme de coupe plus ductile. Pour les fraises à deux dents, l'énergie moyenne de 4 MPa est obtenue pour une profondeur supérieure à 3 mm.

On peut remarquer que les énergies spécifiques des fraises à trois lames sont supérieures à celles des fraises à deux dents en raison d'une profondeur de coupe plus faible pour la même pénétration de l'outil.

6.2 Application numérique du modèle de forage

Un outil de forme elliptique a été choisi, en reprenant l'exacte distribution des taillants (exemple de Warren,). Son rayon est 3,75 in. (16,64 cm), $S_z = 6,55$ in. (9,52 cm). Afin d'évaluer les paramètres d'usure, on prend comme référence l'étude menée par Glowka avec comme matériau le granit Sierra. L'évolution du méplat d'usure est clairement visible sur les Figures 10 présentant la vitesse de pénétration en fonction du WOB et le

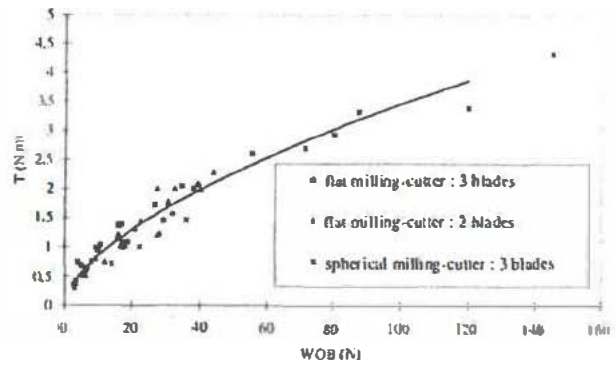


Figure 9a Couple en fonction du poids sur l'outil. Fraises de géométries différentes.

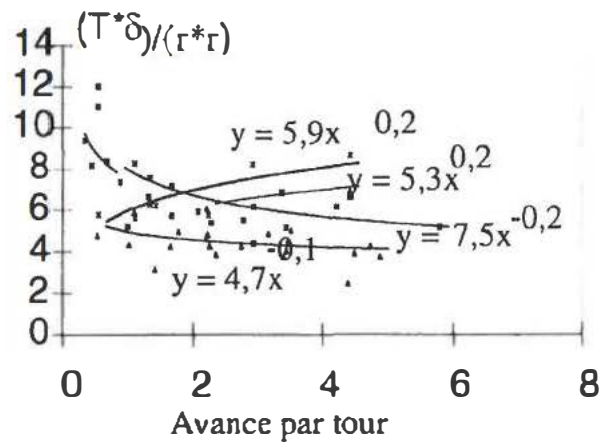


Figure 9 b) Estimation des énergies spécifiques en fonction de la profondeur de coupe. ■ : fond plat-trois lames, ▲ : fond plat-deux lames, ● : sphérique-3 lames, □ : sphérique-2 lames

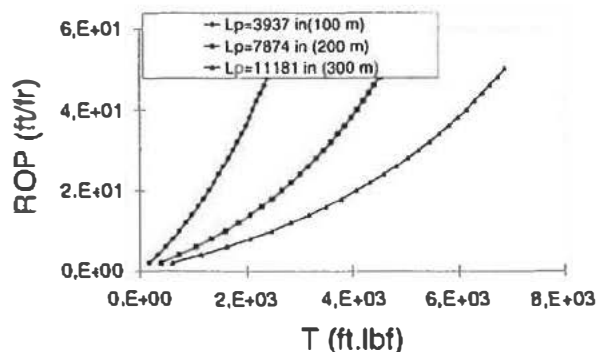
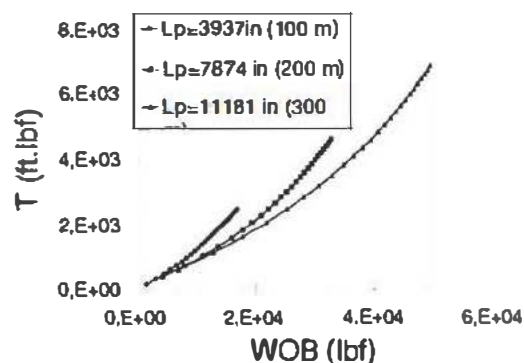


Figure 10. Exemples d'application du modèle de forage à un outil de forme elliptique

couple T en fonction du WOB. Ces dernières courbes sont caractéristiques du mécanisme de frottement. Elles sont différentes de celles obtenues avec un outil neuf. En outre la concavité des courbes illustre bien la meilleure efficacité de l'outil quand le poids sur l'outil (WOB) augmente c'est à dire quand la profondeur de coupe diminue.

7 CONCLUSION

On peut dire qu'on est arrivé actuellement à une assez bonne compréhension des mécanismes de destruction de la roche par une lame PDC. En particulier, nous avons pu établir la nature élastoplastique du mécanisme de frottement intervenant sous le régime d'usure d'une lame PDC, et avons proposé une loi simplifiée permettant de relier la force de réaction avec la cinématique de la lame.

Ainsi, les paramètres de forage d'un outil PDC et leur évolution au cours de son usure, ont pu être établis dans le cadre d'un avancement stabilisé. D'autres essais permettront d'étudier l'effet de l'usure. Dans un premier temps une étude numérique permet une évaluation générale des paramètres de forage.

En moyennant la formulation d'une loi d'usure spécifique.

La prochaine étape de cette étude est la validation de ce modèle de forage, et l'identification expérimentale des paramètres, qui permettra, in fine, d'optimiser la géométrie de l'outil.

BIBLIOGRAPHIE

- Detournay, E., Defoumy, P. : "A phenomenological model of the drilling action of drag bits", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (1992) 29(1), 13-23.
- Kuru, E. : *Effect of rock/cutter friction on PDC bit drilling performance - an experimental and theoretical study*, PhD thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, La, USA (1990).
- Sellami, H.: PhD thesis, ENPC, France (1987).
- Nguyen Minh, D : *Contribution à l'étude de la taille des roches*, PhD thesis, University of Paris VI, France (1974).
- Geoffroy, H. : *Etude de l'interaction roche-outil de forage : influence de l'usure sur les paramètres de coupe*. PhD thesis, Ecole Polytechnique, France (1996).
- Sinor, A. and Warren, T.M. : "Drag bit wear model", *SPE Drilling Engineering* (1989), 128-137.
- Geoffroy, H., Nguyen Minh, D., Putot, C. : "Study on interaction between rocks and worn PDC's cutter", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36th US Symposium, New York, Balkema (1997) 34(3-4).
- Glowka, D.A. : "Implication of thermal wear phenomena for PDC bit design and operation". *SPE 14222* (1985).
- Glowka, D.A. : *Development of a method for predicting the performance and wear of PDC drill bits*, Sandia Report 86-1745, Sandia national laboratories (1987)
- Adachi, J.I. : *Frictional contact in rock cutting with blunt tools*, Master's thesis, University of Minnesota, USA (1996).
- Warren, T.M., Amagost, W.K. : "Laboratory Drilling Performance of PDC Bit", *SPE Drilling Engineering* (June 1988).