

Etude expérimentale du comportement dynamique des outils PDC

Un programme d'essais de forabilité par des outils PDC a été réalisé sur le banc de forage d'Armines à la halle d'essais de Pau, avec pour objectifs principaux :

- mettre en évidence l'effet de la vitesse de rotation sur la réponse mécanique des outils PDC ;
- quantifier cet effet ;
- déterminer si, parmi les causes physiques qui contrôlent cet effet, l'action individuelle de chacun des taillants de l'outil de forage est susceptible de jouer un rôle.

2.1. Présentation des essais de forabilité sur banc de forage

2.1.1. Présentation du banc de forage

Il existe quelques exemplaires de bancs de forage dans le monde permettant de tester le comportement mécanique d'outils de forage réels. Ces bancs sont généralement possédés par des fabricants d'outils et, suivant les cas, permettent de simuler des conditions de poids sur l'outil, de vitesse de rotation, de pression et de roches testées, plus ou moins représentatives de celles rencontrées à grande profondeur.

Le banc de forage d'Armines à la halle d'essais de Pau cumule les plus importantes de ces caractéristiques expérimentales. Il est constitué d'un arbre de forage rigide au bout duquel est vissé un outil de forage (**Fig. 2.1**). L'arbre est entraîné en rotation à l'aide d'un moteur électrique de grande puissance (300 kW) et en translation verticale descendante à l'aide de puissants vérins (**Fig. 2.1**, gauche). Le banc est dimensionné pour étudier le forage des roches sur une profondeur de 50 cm par des outils de diamètre allant jusqu'à 12"1/4. Un système de circulation de boue semblable à ceux qui sont utilisés sur chantier, permet d'injecter le fluide de forage à travers l'arbre de forage. Le fluide s'écoule ensuite à travers les buses de l'outil et permet de remonter les débris de coupe et de refroidir l'outil. Il est ensuite évacué vers les bacs à boue.

Le banc permet d'effectuer des essais de forage des roches sous confinement. Comme illustré dans la **Fig. 2.1** (droite), qui représente le schéma de principe de la cellule de forage, on peut injecter le fluide de forage sous pression et on peut appliquer à l'échantillon de roche une pression de pore, une pression de confinement latéral ainsi qu'une pression verticale.

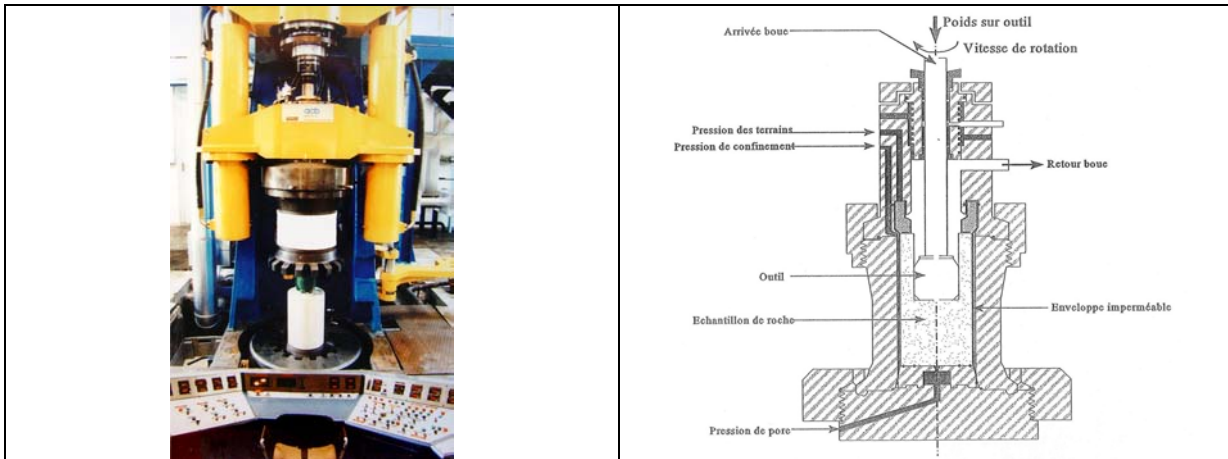


Fig. 2.1 : Cliché et schéma de principe du banc de forage

La rotation de l'arbre est contrôlée en vitesse de rotation, comme dans le forage réel. Sa translation, autrement dit, la pénétration de l'outil dans l'échantillon de roche, peut-être contrôlée en poids sur l'outil ou en vitesse d'avance. Pour simuler des conditions réelles de forage, on a choisi de piloter tous les essais présentés dans ce chapitre en poids sur l'outil. Ce choix est compatible avec les résultats numériques du **Chapitre 1**, obtenus à partir de l'approche en torsion pure, pour laquelle le poids sur l'outil est supposé constant.

De manière générale, les observables d'un essai de forabilité sur le banc de forage sont les suivants :

- le couple résistant mesuré sur l'outil (TOB) ;
- la cote verticale de l'outil et par conséquent sa vitesse d'avance (ROP) ;
- les débris de coupe, filtrés avant éjection dans les bacs à boue (non récupérés dans ces essais) ;
- le fond de trou, c'est-à-dire l'empreinte finale laissée par l'outil dans la roche.

2.1.2. Conditions opératoires

Six outils de forage de géométries différentes et notés P_1 , P_2 , P_3 , H_{121} , P_n et P_u , ont été utilisés pour les essais. Quatre d'entre eux sont représentés dans la **Fig. 2.2**.

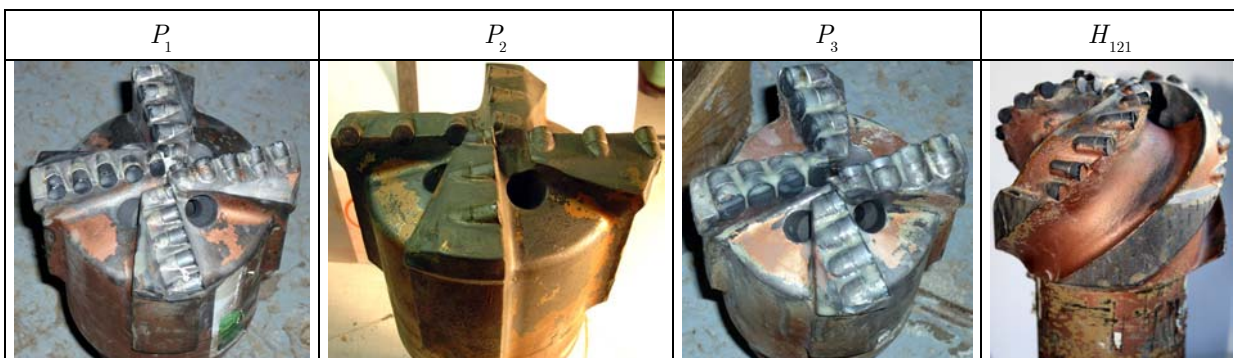


Fig. 2.2 : Outils de forage testés

Les outils P_1 , P_2 , P_3 et H_{121} sont neufs et la roche forée avec ces outils est du calcaire de Buxy, qui est une roche dure dont la résistance à la compression simple, R_c , est 100 MPa. Les outils P_n et P_u , dont la nature confidentielle ne nous autorise pas à fournir la géométrie, sont identiques sauf que le premier est neuf et le second est usé. Pour ces outils, on a utilisé une roche très dure, le Calcaire Gris de Sainte-Anne (GSA), pour lequel $R_c = 140$ MPa. Le fluide de forage (eau ou boue à base d'eau) a

été injecté à pression atmosphérique. La **Fig. 2.3** présente l'évolution temporelle du poids sur l'outil (WOB) et de la vitesse de rotation imposés pour un des essais de forabilité effectués.

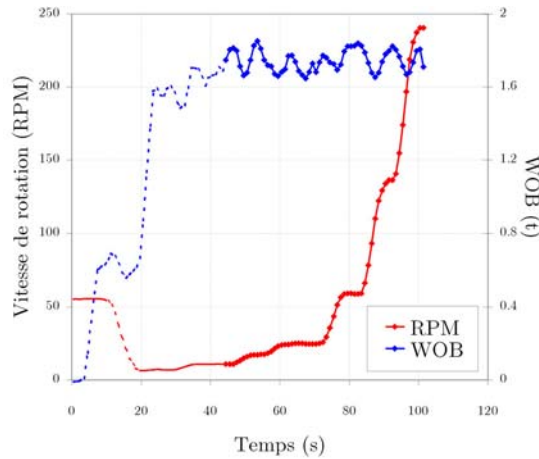


Fig. 2.3 : Poids sur l'outil et vitesse de rotation en fonction du temps (outil P_3)

Dans cet essai, comme dans les autres, on a choisi de faire varier la vitesse de rotation de l'outil par paliers suffisamment longs (environ 5 à 10 s) pour que le poids sur l'outil se stabilise, en particulier aux vitesses faibles. On rassemble les paramètres opératoires des essais dans **Tab. 2.1** :

Paramètres opératoires								
Outil	$\varnothing_{\text{outil}}$	Profil	Lames	\varnothing_{pdc}	Boue	Roche	WOB(t)	Vit. Rot. (tr/min)
P_1	4 "3/4	plat	droites (*4)	8 mm (*20)	Eau	Buxy	0.4-0.6-0.9- 1.3-1.6	6-12-24-60-140- 250
P_2	4 "3/4	plat	droites (*4)	8 mm (*12)	Eau	Buxy	0.3-0.6-0.9- 1.2-1.3	6-12-24-60-140- 250
P_3	4 "3/4	plat	droites (*4)	13 mm (*16)	Eau	Buxy	0.4-0.7-0.9- 1.3-1.7	6-12-24-60-140- 250
H_{121}	4 "3/4	parabol.	spirales (*4)	8 mm (*28)	Bento	Buxy	0.4-0.9	6-12-24-60-140- 250
P_n	6 "	parabol.	spirales	9 mm	Eau	GSA	1.6-2.8	6-12-24-60-100- 140-180
P_u	6 "	parabol.	spirales	9 mm	Eau	GSA	3.6-4.9	6-12-24-60-100- 140-180

Tab. 2.1 : Paramètres opératoires des essais à pression atmosphérique

Tous les essais se sont déroulés dans des conditions contrôlées où l'on n'a observé aucun phénomène de bourrage ni de colmatage de débris sur l'outil. Au cours des essais, les variations de poids sur l'outil n'ont pas dépassé 0.5 t, et cela, quel que soit le poids imposé (**Fig. 2.4**).

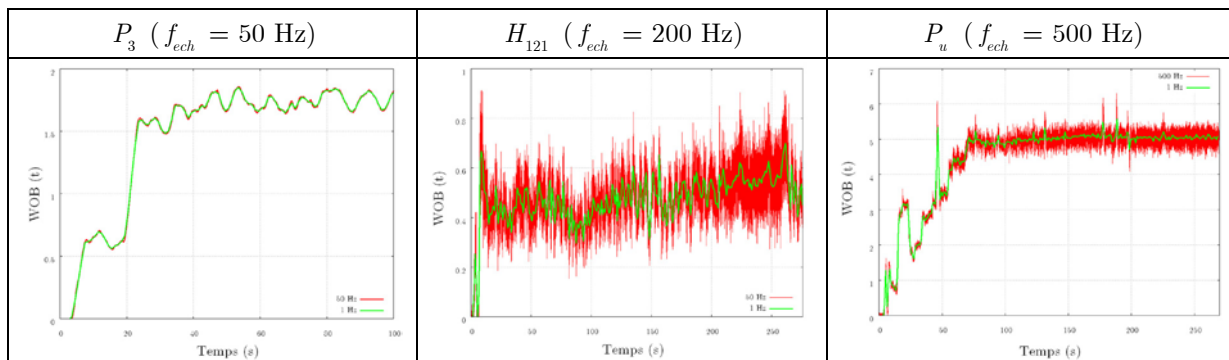


Fig. 2.4 : Comparaison des signaux bruts et moyennés du poids sur l'outil

Sur ces graphes, on a superposé aux signaux bruts (échantillonnés, suivant les cas, à 50 Hz, 200 Hz ou 500 Hz), les signaux moyennés sur des fenêtres disjointes de 1 s. On observe que les variations haute fréquence (≥ 200 Hz) sont similaires dans le cas où le poids sur l'outil est d'environ 0.5 t (**Fig. 2.4**, milieu) et celui où il est d'environ 5.0 t (**Fig. 2.4**, droite). On attribue donc ces variations au bruit du capteur et on en conclut que les essais se sont déroulés en l'absence de vibrations significatives. Notons que les enregistrements représentés dans la **Fig. 2.3** et ceux représentés par la suite sont relatifs aux données moyennées.

2.2. Résultats expérimentaux

2.2.1. Réponse en couple à des variations de la vitesse de rotation

La **Fig. 2.5** présente l'évolution du couple à l'outil en fonction de la vitesse de rotation pour les essais conduits avec l'outil P_3 à différents poids sur outil.

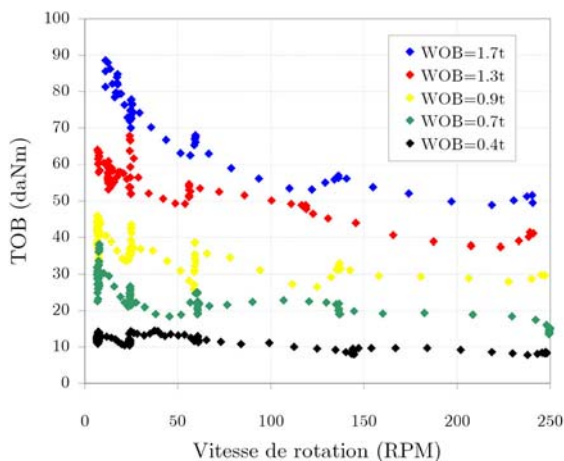


Fig. 2.5 : Le couple à l'outil en fonction de la vitesse de rotation (outil P_3)

Pour tous les essais, on constate que le couple à l'outil décroît significativement avec la vitesse de rotation. Cette observation vaut pour l'intégralité des essais (**Tab. 2.1**). On retrouve donc en laboratoire et en régime quasi statique, c'est-à-dire en l'absence de stick-slip, le même phénomène dynamique que celui qui est observé par de nombreux auteurs sur le terrain en cas de stick-slip et appelé classiquement "negative damping effect" (**Chapitre 1**).

2.2.2. Réponse en avancement à des variations de la vitesse de rotation

On présente l'évolution de l'avancement par tour (DOC) en fonction de la vitesse de rotation (**Fig. 2.6**). Etant donné que l'avancement par tour est calculée à partir du ratio entre la vitesse d'avance et la vitesse de rotation et que c'est lorsque cette dernière est faible qu'elle présente une variabilité relative maximale, les courbes (**Fig. 2.6**) présentent une forte variabilité aux vitesses de rotation les plus faibles. Néanmoins, la tendance est suffisamment claire aux vitesses plus élevées pour faire abstraction de cette remarque.

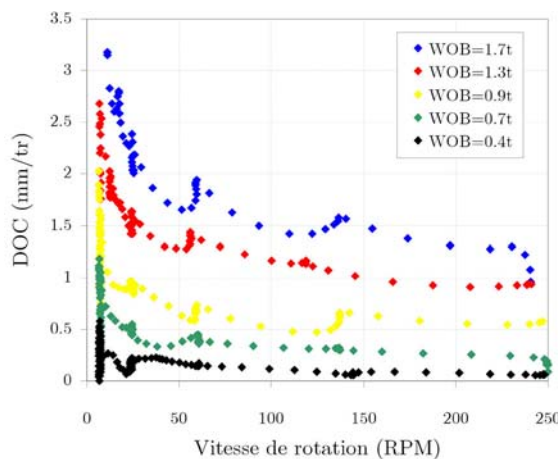


Fig. 2.6 : L'avancement par tour en fonction de la vitesse de rotation (outil P_3)

Ces courbes montrent que l'avancement par tour diminue avec la vitesse de rotation. Cette observation s'étend à l'intégralité des essais (**Tab. 2.1**). On a sélectionné douze des essais conduits avec les outils P_1 , P_2 , P_3 et H_{121} pour lesquels le poids sur l'outil est particulièrement stable. Pour ces essais, on a observé que le coefficient de corrélation entre l'avancement par tour et le couple est compris entre 0.75 et 0.97.

2.2.3. Interprétation physique

Alors qu'une diminution du couple sans diminution de l'avancement par tour indiquerait que le mécanisme à l'œuvre agit par seule diminution du frottement outil-roche, les fortes corrélations précédentes indiquent que ce mécanisme affecte le volume de roche abattue. Par conséquent, le couple à l'outil diminue avec la vitesse de rotation parce que la quantité de roche abattue diminue avec la vitesse de rotation. Autrement dit, à mesure que la vitesse de rotation augmente, une partie croissante du poids sur l'outil est dirigée vers un mécanisme autre que l'abattage de la roche. Cela aboutit à une diminution globale de l'efficacité de la coupe avec la vitesse de rotation.

BRETT (1992) a déjà observé une telle évolution du couple à l'outil et de l'avancement par tour avec la vitesse de rotation pour des outils usés. Les outils usés étant connus pour générer une plus grande quantité de roche broyée, il attribue cette baisse des performances à une difficulté à évacuer la roche broyée lorsque la vitesse de rotation augmente (**Chapitre 1**). Or, les taillants des outils P_1 , P_2 , P_3 et H_{121} ne sont pas usés, mais neufs, c'est-à-dire simplement chanfreinés. L'interprétation, que BRETT (1992) lui-même présente comme une conjecture, pourrait être valable dans le cas présent, mais en acceptant que les taillants chanfreinés génèrent eux aussi une quantité substantielle de roche broyée.

Ayant effectué des essais avec les outils P_n et P_u , qui ne se distinguent que par leur niveau d'usure, on peut pousser l'analyse un peu plus loin. On représente dans la **Fig. 2.7** l'évolution du couple à l'outil suivant la vitesse de rotation pour les quatre essais conduits avec ces deux outils.

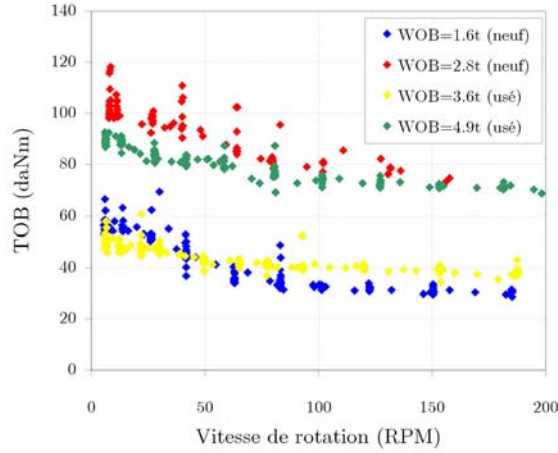


Fig. 2.7 : Couple à l'outil en fonction de la vitesse de rotation (outils P_n et P_u)

Comme précédemment (**Fig. 2.5**), la décroissance du couple à l'outil avec la vitesse de rotation est très nette sur l'ensemble des essais (**Fig. 2.7**). Mais on observe aussi que le niveau d'usure n'a pas une influence significative sur la décroissance du couple à l'outil. Il semble même que la décroissance du couple soit plus prononcée pour les deux outils neufs. Cependant, comme les poids imposés pour ces quatre essais sont différents, les quantités de roche abattue ne sont pas identiques et, d'un point de vue quantitatif, les essais ne sont pas comparables. Cependant, d'un point de vue qualitatif, on conclut que le comportement mécanique des outils PDC neufs lorsque l'on fait varier la vitesse de rotation, n'est pas sensiblement différent de celui des outils PDC usés. Ainsi, si la conjecture de BRETT (1992) est valable dans le cas présent, cela implique que le processus de forabilité par des outils PDC neufs génère lui aussi de la roche broyée en suffisamment grande quantité pour faire apparaître l'effet d'amortissement négatif présenté au **Chapitre 1**.

2.2.4. Baisse de la vitesse d'avance en cas de stick-slip

On s'attend à ce que la baisse des performances de forage avec la vitesse de rotation ait un impact sur la vitesse d'avance (ROP). Afin d'aborder cette question, on représente dans la **Fig. 2.8**, l'évolution de la vitesse d'avance (ROP) suivant la vitesse de rotation, pour différents poids sur l'outil.

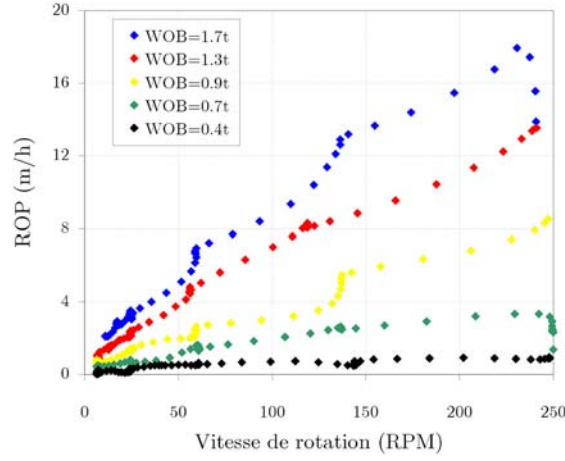


Fig. 2.8 : La vitesse d'avance en fonction de la vitesse de rotation (outil P_3)

On constate tout d'abord que ces courbes sont globalement croissantes. Si le processus de coupe ne variait pas à mesure que la vitesse de rotation augmente, ces courbes seraient des droites passant par l'origine. En effet, multiplier la vitesse de rotation par un facteur donné revient à multiplier la vitesse d'avance par ce même facteur.

Or, on observe que les courbes (**Fig. 2.8**) sont concaves. Considérons par exemple la courbe (WOB = 1.3 t). Sa pente moyenne vaut 0.072 (m/h)/(tr/min) sur l'intervalle [6.7-56.7 tr/min], 0.053 (m/h)/(tr/min) sur [56.7-118.8 tr/min] et 0.045 (m/h)/(tr/min) sur [118.8-239.1 tr/min]. Ces observations s'étendent à l'intégralité des essais. La diminution de l'efficacité de la coupe avec la vitesse de rotation se traduit donc par le fait que les courbes $ROP = f(RPM)$ sont significativement concaves.

En transposant ces courbes expérimentales, obtenues en régime quasi statique, au régime dynamique de stick-slip, il est possible d'expliquer, du moins en partie, la baisse de la vitesse d'avance qui est systématiquement associée au stick-slip en forage réel (DUFEYTE & HENNEUSE, 1991). En effet, considérons la courbe paramétrée $ROP(t) = f(RPM(t))$, où f est une fonction concave. Le théorème de Leine stipule que :

$$\overline{f(RPM(t))} \leq f(\overline{RPM(t)}) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Où \overline{X} désigne la valeur moyenne de la grandeur X sur une fenêtre temporelle donnée. Supposons que la quantité $RPM(t)$ décrive l'évolution temporelle de la vitesse de rotation de l'outil en cas de stick-slip, $ROP_{stick-slip}$ désigne la vitesse d'avance moyenne correspondante et RPM_{nomin} désigne la vitesse de rotation moyenne sur une période de stick-slip, alors on obtient :

$$ROP_{stick-slip} \leq ROP(RPM_{nomin}) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

On en conclut que la vitesse d'avance moyenne au cours d'une phase de stick-slip est inférieure à la vitesse d'avance d'une phase de forage nominale, effectuée à la vitesse de rotation moyenne correspondante. Cependant, pour valider un tel résultat sur le terrain, il faut déterminer des conditions opératoires pour lesquelles on observe simultanément la présence et l'absence de stick-slip. De telles conditions ne sont remplies que lorsque la vitesse de rotation imposée est égale à la vitesse-seuil (**Chapitre 1**). On devrait alors observer un saut de vitesse d'avance de part et d'autre de la vitesse-seuil.

2.2.5. Relation entre le couple à l'outil et le poids sur l'outil

Les résultats précédents montrent que la vitesse induit des non-linéarités dans les relations $TOB = f(RPM)$, $DOC/TOB = f(RPM)$ et $ROP = f(RPM)$. Le comportement mécanique des outils PDC étant généralement décrit par une relation $TOB = f(WOB)$ linéaire dans des conditions nominales de forage, on s'attache à déterminer si une telle relation reste valable dans le cadre de nos essais. A cette fin, on représente dans le diagramme TOB-WOB, les points expérimentaux correspondant aux essais conduits avec l'outil P_3 (**Fig. 2.9**). Les points expérimentaux dont la couleur est indiquée dans la légende correspondent à une plage de vitesse de rotation donnée. De plus, ces points ont été sélectionnés parmi ceux pour lequel le poids sur l'outil est bien stabilisé.

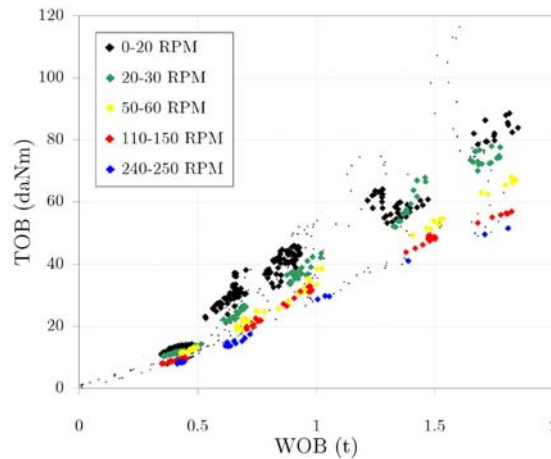


Fig. 2.9 : Le couple à l'outil en fonction du poids sur l'outil (outil P_3)

On observe que les nuages de points des différentes plages s'organisent en fuseaux qui montrent que la relation linéaire entre le couple à l'outil et le poids sur l'outil est assez bien respectée. En outre, ces fuseaux convergent vers une origine qui correspond à un poids non nul. Cela signifie qu'un certain seuil de poids doit être franchi pour initier la coupe et générer du couple à l'outil, phénomène bien connu du forage. Enfin, conformément aux résultats précédents, le coefficient directeur des courbes $TOB = f(WOB)$, à vitesse donnée, diminue nettement avec la vitesse de rotation. Par conséquent, l'idée classique selon laquelle la relation entre le couple et le poids sur l'outil est linéaire, n'est pas remise en question dès l'instant que la vitesse de rotation est maintenue constante.

2.3. Conclusion

L'objectif de cette campagne d'essais de forabilité était de mesurer la réponse mécanique des outils de forage type PDC à des variations quasi statiques de leur vitesse de rotation. Six outils de géométries variables ont été utilisés pour forer deux calcaires, dur à très dur, sous un écoulement de boue à pression atmosphérique.

Tous ces essais présentent la même tendance selon laquelle le couple à l'outil diminue avec la vitesse de rotation lorsque le poids sur outil est maintenu constant. On a donc montré que ce phénomène dynamique, appelé "negative damping effect" et généralement évoqué dans la littérature comme étant propre au stick-slip, peut être reproduit en laboratoire dans des conditions nominales de forage.

L'interprétation physique de ce phénomène n'est pas encore complète, mais le fait que ces essais aient été effectués dans des conditions nominales de forage ne présentant pas de problèmes liés à l'évacuation des débris ni à l'occurrence de vibrations significatives, conduit à plusieurs conclusions importantes.

D'une part, il apparaît clairement qu'il n'est pas nécessaire d'invoquer un mécanisme de couplage entre les vibrations de torsion et les vibrations axiales pour observer ce phénomène dynamique. Ceci apporte donc un argument expérimental au choix qui a été fait au **Chapitre 1** de suivre l'approche en torsion pure. Cependant, on n'exclut pas complètement la possibilité que des vibrations axiales de faibles amplitudes prennent éventuellement place au cours de processus de forabilité.

D'autre part, ces essais confirment les observations effectuées par BRETT ET AL. (1989) et BRETT (1992), concernant la diminution simultanée du couple à l'outil et de l'avancement par tour avec la vitesse de rotation. Mais on élargit leur portée au cas des outils PDC neufs et forant des calcaires durs. Ainsi, on valide le résultat selon lequel les performances des outils PDC diminuent avec la vitesse de rotation.

Enfin, au cours du **Chapitre 1**, on a vu que, suivant la longueur du forage, la période de stick-slip vaut entre 2 s et 10 s. Par conséquent, par comparaison avec le stick-slip en forage réel, ces expériences sont conduites en régime quasi statique, et non dynamique. Tous les résultats présentés au cours de ce chapitre s'appliquent donc, en premier lieu, à des conditions nominales de coupe et requièrent une hypothèse pour être transposés au régime de stick-slip. Autrement dit, bien que ces résultats aient déjà été observés en régime de stick-slip et soient habituellement considérés comme caractéristiques de ce régime dynamique de coupe, cette campagne d'essais montre qu'ils sont, en fait, vraisemblablement caractéristiques du processus nominal de forage. Or, on a souligné qu'aucun indice de colmatage ou de bourrage n'a été relevé au cours de la campagne d'essais. On en déduit que le mécanisme physique à l'origine de ce phénomène dynamique, qui pourrait être celui proposé par BRETT (1992), affecte uniquement le processus de forabilité de la roche et non le processus de transport des débris de roche.

Ces éléments de réflexion laissent donc penser que le phénomène dynamique appelé "negative damping effect" se manifesterait à une plus petite échelle que celle de l'outil de forage, c'est-à-dire à l'échelle de ses taillants. C'est pourquoi, au cours du chapitre suivant, on va s'intéresser à l'interaction taillant-roche, dans un premier temps, d'un point de vue bibliographique.

