

Vibrations mécaniques pendant le forage

Examen de MAP-AUT2 2016–2017

Une part importante de la note sera attribuée à la qualité du raisonnement, à la richesse des réponses et à la pertinence de l'analyse.

On s'intéresse à la suppression de vibrations mécaniques pendant le forage pétrolier. Ces oscillations indésirables risquent de casser les longues (plusieurs kilomètres) tiges flexibles en rotation qui composent le système de forage. Un tel système est représenté sur la Figure 1. La table de rotation applique le couple

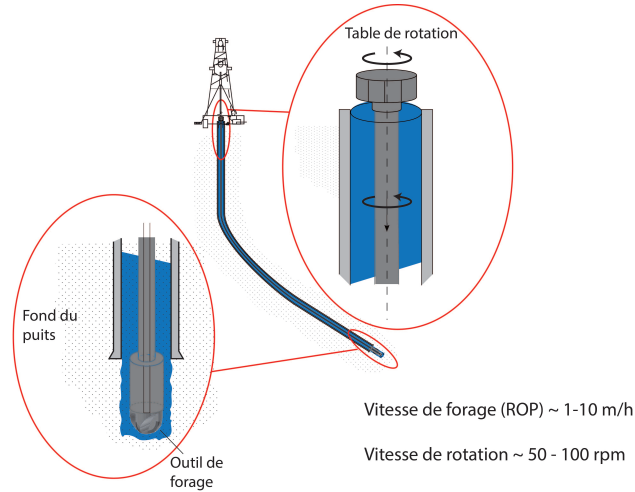


FIGURE 1 – Vision schématique d'un système de forage

nécessaire à la mise en mouvement de rotation de la tige autour de son axe principal. Au fond du puits, l'outil de forage découpe et casse la roche. Ce processus est parfois instable en raison du couple subit par l'outil en contact avec la roche. Le but est de synthétiser un contrôleur capable d'assurer la rotation de l'ensemble du système à vitesse constante.

1 Etude théorique

On commence par modéliser le système comme deux oscillateurs en torsion couplés, représentant respectivement la tige de forage (indice t) et le 'Bottom Hole Assembly' (BHA, indice b) comme suit

$$J_t \ddot{\phi}_t = k(\phi_b - \phi_t) + T_{drive}(t) \quad (1)$$

$$J_b \ddot{\phi}_b = k(\phi_t - \phi_b) - T_{friction}(\dot{\phi}_b) \quad (2)$$

où $\phi_{t,b}$ est le déplacement angulaire, $J_{t,b}$ le moment d'inertie, k la raideur de la jonction, T_{drive} le couple appliqué par l'actionneur et $T_{friction}$ le couple résultant de la friction de l'outil sur la roche, qui s'exprime comme

$$T_{friction}(\omega) = c_b \omega + T_{tobdyn} \frac{2}{\pi} \left(\alpha_1 \omega e^{-\alpha_2 |\omega|} + \text{atan}(\alpha_3 \omega) \right) \quad (3)$$

Les valeurs numériques de tous les paramètres sont donnés en Table 1. Enfin, on mesure à l'aide d'un capteur la vitesse de rotation de tête $y = \dot{\phi}_t$.

Paramètre	Description	Valeur
J_b	Inertie du BHA	369 kg.m ²
J_t	Inertie de tête	2 380 kg.m ²
k	Raideur de la tige	472 N.m.rad ⁻¹
c_b	Amortissement visqueux	0.03 N.M.s.rad ⁻¹
T_{tobdyn}	Paramètre de friction	7500 N
α_1	Paramètre de friction	5.5
α_2	Paramètre de friction	2.2
α_3	Paramètre de friction	3500

TABLE 1 – Table des paramètres

1. On considère une trajectoire de référence à vitesse de rotation constante. Donner les expressions correspondantes des états et de la commande.
2. Linéariser le système autour de cette trajectoire.
3. Etudier l'observabilité du système. Interpréter ce résultat, notamment en regard avec l'objectif de commande.
4. On choisit donc le nouveau jeu de variables $(x_1, x_2, x_3) = (\phi_t - \phi_b, \widehat{\phi_t - \phi_b}, \dot{\phi}_b)$. Réécrire les équations de la dynamique et linéariser autour de la trajectoire de référence à vitesse constante.

2 Etude numérique

2.1 Autour d'une vitesse constante

5. Ecrire un script Matlab calculant pour toute vitesse de référence les matrices de la forme d'état, les valeurs propres en boucle ouverte ainsi que les conditionnements des matrices d'observabilité et de commandabilité.
6. Construire une planche Simulink permettant de simuler les équations (2)–(1). Inclure ces équations dans un bloc 'Subsystem' ayant comme entrée le couple T_{drive} et en sortie les vitesses de rotation en tête et en fond de puits. Vérifier que le système est bien localement stable en boucle ouverte autour de $\omega_{ref} = 10$.
7. Evaluer numériquement les performances du système en boucle ouverte autour de $\omega_{ref} = 10$.
8. On souhaite améliorer ces performances. Proposer un contrôleur par retour d'état qui déplace toutes les parties réelles des valeurs propres du système en (x_1, x_2, x_3) de 10^{-1} vers la gauche. Les performances ont-elles été améliorées ?
9. Proposer un contrôleur ayant un temps de réponse à 5% inférieur à 5 secondes pour la vitesse de fond.

2.2 Démarrage à l'arrêt

10. L'actionneur peut délivrer un couple maximum de $1,75 \times 10^4$ N.m. Intégrer cette contrainte à votre planche simulink.
11. Que se passe-t-il lorsqu'on applique la commande (constante) d'équilibre alors que l'ensemble du système est à l'arrêt (vitesses de rotation initiales nulles) ?
12. Le contrôleur de la question précédente permet-il de résoudre le problème ?
13. Proposer un contrôleur de type LQR ayant un temps de réponse à 5% inférieur à 20 secondes et permettant de réaliser un départ à l'arrêt.
14. *Bonus : en utilisant la sortie de Brunovski (possiblement nonlinéaire), proposer une commande boucle ouverte permettant d'effectuer un démarrage à l'arrêt. Linéariser le système autour de cette trajectoire et la stabiliser.*

2.3 Observation

On n'a désormais accès, pour réaliser un contrôleur, qu'à la mesure de la vitesse de tête.

15. Réaliser un observateur-contrôleur stabilisant le système autour de $w_{ref} = 10$. Evaluer la robustesse et les performances de votre contrôleur.
16. Les spécifications du capteur indiquent une précision de l'ordre d'1 m.s⁻¹. Par ailleurs, la tige subit des oscillations verticales couplées à la dynamique en torsion, qui induisent des variations hautes fréquence du couple au niveau de l'outil d'environ 750 N.m. Modéliser ces perturbations par des bruits blancs gaussien et tester votre observateur-contrôleur.
17. Proposer un filtre de Kalman au vu de la modélisation de la question précédente.
18. *Bonus : Proposer un algorithme permettant d'effectuer un démarrage à l'arrêt vers n'importe quelle vitesse de rotation fixée à l'avance avec la seule mesure de la vitesse de tête.*

2.4 Retards

19. En fait, les ondes en torsion mettent un certain temps à se propager de la tête au fond du puits, et vice-versa. Modifier les équations d'état pour rendre compte de ce phénomène.
20. Quelle est la marge de retard de votre contrôleur de la question 14 ou 16? A partir de quelle longueur de puits votre contrôleur ne sera-t-il plus utilisable, sachant que les ondes se propagent à 3000 m.s⁻¹ environ.
21. Si la réponse à la question précédente est inférieure à 2000 m, proposer un nouveau contrôleur possédant une marge de retard suffisante.