

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**  
**Faculté des Nouvelles Technologies de l'information et de**  
**communication**



**Département d'Electronique et de télécommunication**

**Mémoire : Master Professionnalisant**

**Filière : électronique**

**Spécialité Instrumentation Et Systèmes**

**Présenté par :**

**NETTARI Toufik**

**GHERIBI Zakaria**

**Thème**

*Conception d'un contrôleur avancé pour  
l'atténuation des vibrations stick slip dans le système  
de forage rotatif Algérien*

**Soutenu publiquement le : 22/06/2023**

**Devant le jury :**

**Mr. CHLAOUA R.**

**Mr. SMAHI M.**

**Mr. TIDJANI Z.**

**Mr. Doghmane M. Z. A.**

**Président**

**Examineur**

**Encadreur**

**Co. Encadreur**

**UKM Ouargla**

**UKM Ouargla**

**UKM Ouargla**

**UKM Ouargla**

**Année Universitaire : 2022 /2023**



**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**  
**Faculté des Nouvelles Technologies de l'information et de**  
**communication**



**Département d'Electronique et de télécommunication**

**Mémoire : Master Professionnalisant**

**Filière : électronique**

**Spécialité Instrumentation Et Systèmes**

**Présenté par :**

**NETTARI Toufik**

**GHERIBI Zakaria**

**Thème**

*Conception d'un contrôleur avenacé pour  
l'atténuation des vibrations stick slip dans le système  
de forage rotatif Algérien*

**Soutenu publiquement le : 22/06/2023**

**Devant le jury :**

**Mr. CHLAOUA R.**

**Mr. SMAHI M.**

**Mr. TIDJANI Z .**

**Mr. Doghmane M. Z. A.**

**Président**

**Examineur**

**Encadreur**

**Co. Encadreur**

**UKM Ouargla**

**UKM Ouargla**

**UKM Ouargla**

**UKM Ouargla**

**Année Universitaire : 2022 /2023**

# Remerciement

***En premier lieu, nous tenons à remercier notre Dieu "Allah" notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.***

***On tient à exprimer nos profonds remerciements et reconnaissance à notre encadrant Monsieur zakria tidjani pour avoir accepté l'encadrement de ce mémoire***

***On adresse nos sincères remerciements et gratitude à notre Co- encadrant dr.doghmen mohemde zeinelabidin pour donne le theme et ces remarques constructives qui ont contribué à améliorer ce travail, sa sympathie et patience et disponibilité totale dès le début de réalisation de ce mémoire.***

***On tient aussi à remercier membres du jury.***

# Dédicace

À mes chers parents, chère épouse et prunelle de mes yeux, Zahra Natari,  
A tous mes chers frères et particulièrement Farhat pour ses conseils et son suivi lors de  
ma lettre,  
A toute ma famille, source d'espoir et de motivation,  
A tous mes amis et à l'équipe de travail de Sonatrach.

Loué soit Dieu, avec la grâce voulue que les bonnes actions soient faites. Dieu soit loué  
pour sa bénédiction dans son accomplissement de ce travail.  
Tout d'abord, je tiens à remercier les deux personnes les plus précieuses de ma vie, mon  
père et ma mère, d'avoir pris soin de moi et suivi mon éducation.  
Un père pauvre, la douceur de mes yeux, et le délice de mon foie, mon fils  
**Ayham**, à mes frères et sœurs, chacun avec son propre nom.  
A mes amis et mon équipe de travail à Sonatrach.

## **RÉSUMÉ**

L'objectif de cette mémoire conception d'un contrôleur avancé pour réduire les vibrations de type "stick-slip" dans un système de forage rotatif en Algérie. Le stick-slip est principalement causé par l'élasticité du train de tiges utilisé dans le forage et les changements de forces de frottement au niveau du trépan. Ces vibrations entraînent une usure excessive des outils, des défaillances prématurées et une diminution du taux de pénétration.

Dans le mémoire, l'objectif principal était d'éliminer les vibrations stick-slip. Pour ce faire, deux modèles différents ont été élaborés : un modèle centralisé et un modèle distribué, afin de modéliser le système. Ensuite, des observateurs ont été calculés pour estimer les paramètres du fond.

Par la suite, différentes lois de commande ont été développées pour tester et comparer leurs performances. L'objectif était de trouver une loi de commande efficace qui réduirait les vibrations stick-slip et améliorerait ainsi le processus de forage.

**Mots-clés :** Vibrations Stick-Slip, Système de forage rotatifs ; Matalb / Simulink Simulation ; Commande avance

## **ABSTRACT**

The objective of this dissertation design of an advanced controller to reduce "stick-slip" type vibrations in a rotatif drilling system in Algeria. Stick-slip is primarily caused by the elasticity of the drill string used in drilling and changes in frictional forces at the bit. These vibrations lead to excessive tool wear, premature failures and reduced penetration rates.

In the brief, the main goal was to eliminate stick-slip vibrations. To do this, two different models were developed: a centralized model and a distributed model, in order to model the system. Then, observers were calculated to estimate the bottom parameters.

Subsequently, different control laws were developed to test and compare their performance. The goal was to find an efficient control law that would reduce stick-slip vibrations and thus improve the drilling process.

**Keywords:** Stick-Slip Vibrations, Rotatif Drilling System; Matalb/Simulink Simulation; Advanced command

### ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو تصميم وحدة التحكم المتقدمة هذه لتقليل الاهتزازات من نوع «العصا والانزلاق» في نظام الحفر الدوار في الجزائر. ينتج الانزلاق اللاصق بشكل أساسي عن مرونة سلسلة الحفر المستخدمة في الحفر والتغيرات في قوى الاحتكاك في لقمة الحفر. تؤدي هذه الاهتزازات إلى تآكل مفرط للأداة وفشل سابق لأوانه ومعدلات اختراق منخفضة.

باختصار، كان الهدف الرئيسي هو القضاء على اهتزاز الانزلاق اللاصق. للقيام بذلك ، تم تطوير نموذجين مختلفين: نموذج مركزي ونموذج موزع ، لنمذجة النظام. بعد ذلك ، تم حساب المراقبين لتقدير المعلمات السفلية. بعد ذلك ، تم تطوير قوانين تحكم مختلفة لاختبار ومقارنة أدائها. كان الهدف هو إيجاد قانون تحكم فعال من شأنه أن يقلل الاهتزازات المنزلقه والقبض عليها وبالتالي تحسين عملية الحفر.

**الكلمات المفتاحية:** الاهتزازات عصا الانزلاق، نظام الحفر روتايف؛ ماتلاب/محاكاة سيمولينك؛ القيادة المتقدمة.

---

# Sommaire

<i>Remerciement</i> .....	I
<i>Dédicace</i> .....	II
RÉSUMÉ .....	III
<b>Sommaire</b> .....	V
<b>Liste du Figures</b> .....	VIII
<b>Liste des abréviations</b> .....	IX
<b>Liste des symboles</b> .....	X
Introduction générale : .....	1
<b>Chapitre I :</b> .....	3
Généralités sur les forages pétroliers .....	3
I.1. Introduction : .....	4
<b>I.2. Définition de forage :</b> .....	4
<b>I.3 Les Différents types de forage :</b> .....	4
I.3.1 Le forage rotatif : .....	4
I.4 Description de l'appareil de forage : .....	5
I.4.1. Classification des appareils de forage : .....	5
I.4.2. Matériel surface. : .....	7
I.4.3. La fonction de rotation : [6]. .....	9
<b>I.4.4 Fonction de sécurité</b> .....	10
I.4.5. Le matériel de fond : .....	11
I.4.5.1 Les tiges de forage : (drill pipe) : .....	11
I.4.5.2 Les masse de tige : (drill collars) [8] : .....	12
I.4.5.3. L'outil de forage : (trépan) : .....	12
I.4.5.4 Stabilisateurs : (stabiliser) : .....	13
I.4.5.5 Le BHA (Buttom Hole Asembly): .....	14
I.5 Paramètres du Forage [10] : .....	15
I.5.1 La pression (SPP) : .....	16
I.5.2 WOB : .....	16
I.5.3. RPM : .....	16
I.5.4. Couple en Surface : .....	17
I.5.5. ROP : .....	17
<b>I.6 Définition le phénomène stick slip :</b> .....	17
I.7 Les Différents types de vibrations : .....	17
<b>I.7.1 la vibration de torsion</b> .....	18
<b>I.7.2 Les vibrations axiales</b> : .....	18
I.7.3. Les vibrations latérales : .....	18



<b>I.7.4 Détection de vibration de Stick-Slip :</b> .....	18
I.8 Conclusion : .....	20
<b>Chapitre II</b> .....	13
Modélisation du système.....	13
de forage rotatif.....	13
<b>II.1 Introduction :</b> .....	20
<b>II.2 Modélisation des frottements :</b> .....	20
<b>II.2.1 Les modèles statiques :</b> .....	20
<b>II.2.1.1 Frottements secs statiques :</b> .....	20
<b>II.2.1.2 Frottement de coulomb :</b> .....	20
<b>II.2.1.3 Frottement de visqueux :</b> .....	21
<b>II.2.1.4 Frottement de Stiction :</b> .....	21
<b>II.2.1.5 Frottement de Stribeck :</b> .....	22
<b>II.2.2 Les frottements dynamiques :</b> .....	23
<b>II.3 Modélisation de la garniture :</b> .....	23
II.3.1 Modèle Dynamique du Top drive :.....	24
<b>II.3.2 Modèle de train de tiges et le BHA :</b> .....	24
<b>II.3.3 Système d'induit :</b> .....	24
<b>II.3.2.1 Le moteur :</b> .....	24
<b>II.3.2.2 Le Réducteur :</b> .....	25
<b>II.4 Mise sous forme d'état :</b> .....	26
<b>II.4.1 Cas linéaire :</b> .....	27
<b>II.5 Simulation de système non commandé :</b> .....	28
II.6 Résultats de la simulation.....	29
II.6.1 Deux modèle de la simulation .....	29
II.6.1.1 Le premier modèles .....	29
II.6.1.2 Le deuxième modèle.....	30
<b>II.6 Conclusion :</b> .....	31
<b>Chapitre III</b> .....	32
Commande par mode glissant .....	32
III.1 Introduction.....	30
III.2 Système à structures variable.....	30
<b>III.3 Le principe de réglage de commande régime glissant</b> .....	31
<b>III.3.1 Fonction de commutation</b> .....	31
III.3.2 Hyperplan de commutation.....	31
<b>III.4. Exploration de la dynamique de la surface en mouvement (Régime glissant)</b> .....	32
<b>III.4.1 Choix de la Surface de glissement</b> .....	32
<b>III.4.2 La condition d'existence</b> .....	33
<b>III.4.3 La fonction de Lyapunov :</b> .....	33
<b>III.4.4 La fonction saturation</b> .....	34

III.4.5 Commande avec un seul seuil.....	35
III.4.6 La commande utilisant l'approche de la loi d'arrivée.....	35
III.5. Commande glissante (Sliding Mode Control).....	35
III.6 Les avantages de la commande en mode glissant sont les suivants.....	37
III.7 Relation entre phénomène stick-slip et mode glissement.....	37
III.8 Conclusion.....	38
Chapitre IV.....	56
Les résultats de la simulation.....	56
IV.1 Introduction :.....	57
IV.2 Les résultats de la simulation en boucle ouverte :.....	57
IV.3 Les résultats de la simulation en boucle fermée :.....	60
IV.3.1. La fonction générale est la suivante :.....	60
IV.3.1.1 Première simulation :.....	60
IV.3.1.2 Deuxième simulation :.....	62
IV.3.1.3 Troisième simulation :.....	63
IV.3.2. La fonction stribeck.....	64
IV.3.2.1 Première simulation :.....	64
IV.3.2.2 Deuxième simulation :.....	66
IV.3.2.3 Troisième simulation :.....	68
IV.4 Etude comparative.....	68
IV.5 Conclusion :.....	69
Conclusion générale.....	70
Bibliographies.....	70

**Liste du Figures**

Figure I. 1: Appareil de Forage.....	5
Figure I. 2: Types de l'appareil de forag .....	7
Figure I. 3: Le mat de forag .....	7
Figure I. 4: Le treuil.....	8
Figure I. 5: Moufle fixe.....	8
Figure I. 6: Moufle mobile.....	9
Figure I. 7: Le top drive.....	10
Figure I. 8: monte un obturateur.....	10
Figure I. 9: Système SCR.....	11
Figure I. 10: Les tiges de forage.....	11
Figure I. 11: les masses de tige.....	12
Figure I. 12: L'outil de forage.....	13
Figure I. 13: Les stabilisateurs.....	14
Figure I. 14: le BHA .....	14
Figure I. 15: Les tiges de forage .....	15
Figure I. 16: Schéma symboliquement un exemple de stick slip.....	17
Figure I. 17: Détérioration du foret due aux vibrations saccadées dans les hydrocarbure algérien influence de (WOB/ROP).....	19
Figure II. 1: Les modes des frottements statiques.....	23
Figure II. 2: Model physique de forage rotatif (vibration de torsion).....	24
Figure II. 3: Schéma électrique de l'induit d'un moteur DC.....	25
Figure II. 4: Réducteur.....	26
Figure II. 5: Réponses en boucle ouverte du premier modèle.....	29
Figure III. 1: Système de réglage simple avec structure variable.....	30
Figure III. 2: La fonction de saturation.....	34
Figure III. 3: La fonction signe de la commande avec un seul seuil.....	35
Figure IV. 1: Les réponses en boucle ouverte des systèmes de forage rotatif du modèle généralisé.....	59
Figure IV. 2: Les réponses en boucle ouverte des systèmes de forage rotatif du modèle généralisé.....	60
Figure IV. 3: Les réponses par l'utilisation du contrôle en mode glissant.....	62
Figure IV. 4: Les réponses par l'utilisation du contrôle en mode glissant.....	63
Figure IV. 5: Les réponses de la vitesse angulaire par l'utilisation du contrôle en mode glissant.....	64
Figure IV. 6: Les réponses par l'utilisation du contrôle en mode glissant pour les paramètres $\lambda=0.3$ ; $K=0.4$ a) les vitesses angulaire b) les vitesses angulaire c) la surfaces de glissement.....	66
Figure IV. 7: Les réponses par l'utilisation du contrôle en mode glissant.....	67
Figure IV. 8: Les réponses de la vitesse angulaire par l'utilisation du contrôle en mode glissant.....	68

## Liste des abréviations

<b>Abr.</b>	<b>Description</b>
BHA	"Botom hole assembly" assemblage du fond
ROP	"rate of penetration" taux de pénétration
TOB	"torque on bit" couple sur l'outil
WOB	weight on bit" poids sur l'outil
PDC	"Polycrystalline Diamond Compact" Compact de diamant polycristallin
LMI	Linear Matrix Inequality
LFT	"Linear Fractional Transformation" Transformation Fractionnaire Linéaire
LQG	linéaire quadratique gaussienne
EDP	Equation aux Dérivées Partielles
LQR	linéaire quadratique régulateur

**Liste des symboles**

$\Phi_r$	position angulaire de top drive
$\dot{\Phi}_r$	vitesse angulaire de top drive
$\ddot{\Phi}_r$	accélération angulaire de top drive
$J_r$	inertie de la table de rotation
$D_p$	constante d'amortissement visqueux au niveau de train de tiges
$k_p$	constante de la rigidité de torsion au niveau de train de tiges
$\varphi_p$	position angulaire de train de tiges
$\dot{\varphi}_p$	vitesse angulaire de train de tiges
$\ddot{\varphi}_p$	accélération angulaire de train de tiges
$J_p$	inertie de train de tiges
$\varphi_b$	position angulaire du BHA
$\dot{\varphi}_b$	vitesse angulaire du BHA
$\ddot{\varphi}_b$	accélération angulaire du BHA
$J_p$	inertie du BHA
$D_b$	constante d'amortissement visqueux au niveau de BHA
$k_b$	constante de la rigidité de torsion au niveau du BHA
$T_m$	couple de surface
$T_{TOB}(\varphi_b)$	couple exercé par la formation sur le trépan

Paramètre	Description
$T_{tob}$	Couple non linéaire exercé sur le trépan
$T_m$	Couple exercé sur la table de rotation (Couple moteur)
$J_2$	Inertie équivalente de la table de rotation et du moteur électrique
$J_1$	Inertie équivalente d'une partie de l'inertie des tiges de forage et les masses tiges
$\dot{\varphi}_2 = \Omega_2$	Vitesse angulaire de la table de rotation
$\varphi_2$	Position angulaire de la table de rotation
$\dot{\varphi}_1 = \Omega_1$	Vitesse angulaire du trépan
$\varphi_1$	Position angulaire du trépan
$c_2$	Coefficient de frottement visqueux équivalent au niveau de la surface
$c_1$	Coefficient de frottement visqueux équivalent au niveau de BHA
$k$	Raideur de l'ensemble des tiges
$\varphi_1$	Position angulaire de trépan
$\varphi_2 = \phi_{rt}$	Position angulaire de table de rotation
$\Omega_1 = \dot{\varphi}_1$	Vitesse angulaire de trépan
$J_1$	Inertie équivalente d'une partie de l'inertie des tiges de forage et les masses tiges
$C_1$	Constante d'amortissement visqueux au niveau du BHA
$T_{tob}$	Couple non linéaire exercé sur le trépan
$J_2$	Inertie équivalente de la table de rotation et du moteur électrique $J_m$ ainsi qu'une partie de l'inertie des tiges et celle de la transmission mécanique
$n$	Rapport de transmission
$C_2$	Constant d'amortissement visqueux de la table de rotation
$T_2$	Couple exerce sur la table de rotation
$\Omega_{ref}$	Vitesse angulaire de la table de rotation
$\Omega_2 = \dot{\varphi}_2$	Vitesse angulaire de la table de rotation
$u$	La commande

<b>Paramètre</b>	<b>Description</b>	<b>unité</b>
<b><math>I_m</math></b>	Courant de l'induit	[A]
<b><math>V_m</math></b>	Tension de l'induit	[V]
<b><math>R_m</math></b>	Résistance du moteur	[ $\Omega$ ]
<b><math>L_m</math></b>	Inductance du moteur	[H]
<b><math>V_{emf}</math></b>	Force contre électromotrice	[V]
<b><math>K_e</math></b>	Coefficient de la force contre électromotrice	[V/rad/s]
<b><math>K_c</math></b>	Coefficient de couple	[Nm/A]
<b><math>J_m</math></b>	Inertie du moteur	[Kgm <sup>2</sup> ]
<b><math>T_m</math></b>	Couple moteur	[Nm]
<b><math>\Omega_m</math></b>	Vitesse angulaire de l'arbre de moteur	[Rad/s]
<b><math>F_v</math></b>	Coefficient de frottement visqueux	[N/(m/s)]
<b><math>N_m</math></b>	Nombres de dents de l'engrenage 1	
<b><math>n_{rt}</math></b>	Nombres de dents de l'engrenage 1	
<b><math>\phi_m</math></b>	Position angulaire de l'arbre moteur	[rad]
<b><math>\phi_{rt}</math></b>	Position angulaire de la table de rotation	[rad]
<b><math>\Omega_{rt} = \phi_r \cdot t</math></b>	Vitesse angulaire de la table de rotation	[Rad/s]
<b><math>T_1</math></b>	Couple appliqué sur $J_m$ par le réducteur	[Nm]
<b><math>T_2 = nT_m</math></b>	Couple transmis par le réducteur	[Nm]
<b><math>1/n</math></b>	Coefficient de réduction	



Introduction générale



### **Introduction générale :**

Le forage rotatif est une méthode largement utilisée pour l'extraction de pétrole et de gaz, offrant des avantages significatifs en termes de productivité et d'efficacité. Cependant, les vibrations stick-slip, caractérisées par des mouvements saccadés et des glissements intermittents de la garniture de forage, peuvent entraîner des problèmes majeurs tels que des dommages matériels, une réduction de la productivité et une usure prématurée des équipements.

L'Algérie est un acteur majeur sur le marché mondial de l'énergie, possédant d'importantes réserves de pétrole et de gaz. Cependant, le système de forage rotatif en Algérie est confronté à des défis spécifiques, notamment la présence de formations géologiques dures qui amplifient les vibrations stick-slip ces vibrations peuvent être particulièrement préjudiciables, entraînant des arrêts de production, des temps d'arrêt coûteux et des pertes de revenus. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de concevoir un contrôleur avancé capable d'atténuer de manière efficace les vibrations stick-slip dans le système de forage rotatif en Algérie. Pour atteindre cet objectif, une compréhension détaillée des mécanismes des vibrations stick-slip est essentielle, ainsi que l'identification des paramètres clés qui les influencent. De plus, il est nécessaire de développer des stratégies de contrôle adaptées pour prévenir ces vibrations indésirables.

La structure de ce mémoire est organisée de la manière suivante :

**Chapitre 1 :** Dans ce premier chapitre, nous procéderons à la définition du système de forage rotatif, en détaillant ses équipements, le type d'appareil de forage utilisé et les différents paramètres de forage. Nous aborderons également les différentes formes de vibrations associées à ce système.

**Chapitre 2 :** Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation approfondie de la garniture de forage rotatif. Nous examinerons en détail sa structure et ses caractéristiques afin de développer un modèle précis.

**Chapitre 3 :** Le troisième chapitre mettra l'accent sur l'étude de la commande par mode glissant et la conception d'une loi de commande pour le contrôle du système de forage rotatif. Nous explorerons cette approche et détaillerons les étapes nécessaires à sa mise en œuvre.

**Chapitre 4 :** Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les résultats des simulations réalisées à l'aide du logiciel MATLAB. Nous analyserons les performances du système en

boucle ouverte, en examinant à la fois des cas linéaires et non linéaires, et nous étudierons également les résultats obtenus en utilisant la commande par mode glissant en boucle fermée.

Enfin, nous **conclurons** ce mémoire en résumant les principales conclusions tirées de cette étude dans une synthèse générale.



**Chapitre I :**  
Généralités sur les  
forages pétroliers

# **CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier**

---

## **I.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous nous pencherons de manière approfondie sur le principe et le déroulement de l'opération de forage. Nous examinerons en détail les différents composants de l'appareil de forage, ainsi que les divers types de vibrations qui peuvent survenir pendant la phase de forage. Parmi ces vibrations, nous accorderons une attention particulière aux vibrations de torsion engendrées par le phénomène de Stick & Slip, étant donné leur caractère plus dangereux et préjudiciable pour l'appareil de forage. Par conséquent, l'élimination ou l'atténuation de ces vibrations représente une priorité majeure.

## **I.2. Définition de forage :**

Une technique appelée forage est utilisée pour créer des trous profonds dans le sol, le sous-sol ou d'autres matériaux solides. Il est généralement effectué à l'aide d'une foreuse, un équipement spécialisé. L'exploration minière, la construction de puits d'eau, l'extraction de ressources naturelles telles que le pétrole, le gaz naturel et les minéraux, ainsi que la construction de fondations pour les bâtiments et les structures sont quelques-unes des nombreuses applications du forage. En fonction du type de terrain et de l'objectif du forage, cette technique implique l'utilisation de diverses méthodes et outils. Le forage est crucial dans de nombreux domaines et contribue à la découverte, à l'exploitation et à l'utilisation de ressources naturelles qui sont essentielles à notre société, utilisé pour l'exploration et l'extraction du pétrole et du gaz naturel dans des gisements souterrains. Il comprend des techniques. [1]

## **I.3 Les Différents types de forage :**

Les principaux types de forage sont :

- Le forage vertical : permet de forer le puits à l'aplomb vertical de la zone du gisement où le pétrole est susceptible d'être présent dans le sous-sol ;
- Le forage dévié : permet de forer plusieurs cibles depuis un même site de forage ;
- Le forage rotatif. [2]

### **I.3.1 Le forage rotatif :**

Le forage rotatif est une technique de forage utilisée dans l'industrie pétrolière et minière pour atteindre des formations géologiques profondes. Elle implique l'utilisation d'un trépan rotatif qui exerce une force de coupe sur la roche, permettant ainsi de percer et de créer

# CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier

un trou dans le sol.

Cette technique offre une flexibilité permettant d'atteindre des profondeurs importantes et de traverser différentes formations géologiques, tout en permettant le contrôle et l'analyse des échantillons de roche récupérés à la surface.

Il compatible avec les caractéristiques de cet Outil. Le forage de la roche nécessite :

- 1) La circulation de la boue pour le nettoyage du nouveau trou et le refroidissement de l'Outil ;
- 2) La pression qui exerce une force hydraulique au niveau de l'Outil ;
- 3) Le poids sur l'Outil qui met en contact la formation et le trépan ;
- 4) La rotation de la garniture qui entraîne une torsion des tiges mesurée en surface.

## I.4 Description de l'appareil de forage :

Un appareil de forage doit accomplir dans les meilleures conditions techniques et de sécurité, la réalisation d'un puits reliant un gisement à la surface.

Le schéma suivant montre les différents éléments d'un appareil de forage

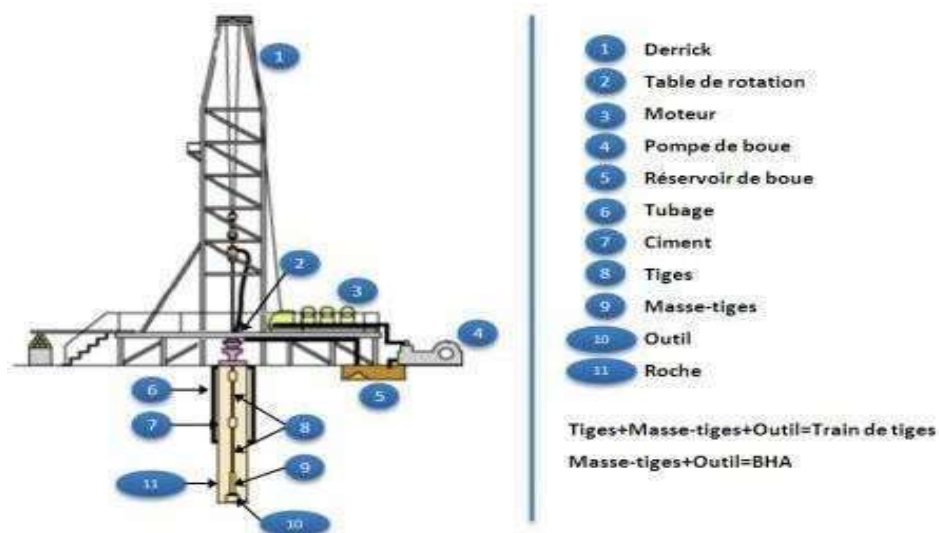


Figure I. 1: Appareil de Forage

### I.4.1. Classification des appareils de forage :

Il existe plusieurs gammes des appareils de forage : légers, moyens et lourd, attribués aux profondeurs de gisement.

## **CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier**

---

- ✓ Capacité ou profondeur de forage maximale ;
- ✓ La puissance de treuil.
- Appareils légers moins de 2000 m ;
- Appareils moyens de 3000 à 3500 m ;
- Appareils lourds de 4000 à 6000 m ;
- Appareils ultra lourds plus de 7000 m jusqu'à 10000m.

Les performances en termes de profondeur dans le forage sont directement liées au poids total des équipements, y compris les tiges de forage et les tubes de revêtement (casings). Pour déterminer la puissance maximale requise pour le treuil de forage, on peut estimer que pour chaque tranche de 100 pieds de forage, une puissance de 10 chevaux (HP) est nécessaire.

En se basant sur les catégories d'appareils mentionnées précédemment, voici une évaluation approximative de la puissance requise

- ✓ Pour un forage peu profond, par exemple jusqu'à 1 000 pieds, une puissance de 100 HP serait nécessaire.
- ✓ Pour un forage de profondeur moyenne, allant jusqu'à 5 000 pieds, une puissance d'environ 500 HP serait requise.
- ✓ Pour un forage en eau profonde ou dans des formations géologiques plus complexes, dépassant les 5 000 pieds, une puissance supérieure à 500 HP serait nécessaire, généralement en fonction de la profondeur spécifique et des caractéristiques du terrain.

Ces estimations sont basées sur une règle générale et peuvent varier en fonction des conditions réelles du forage, telles que la résistance de la formation, la taille de l'appareil de forage utilisé et d'autres facteurs spécifiques au projet. Il est essentiel d'effectuer une analyse précise des besoins énergétiques pour chaque opération de forage afin de garantir une performance optimale et sécurisée.

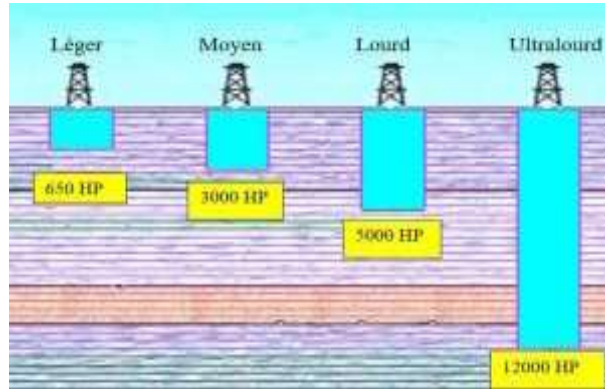


Figure I. 2: Types de l'appareil de forag

## I.4.2. Matériel surface. :

### I.4.2.1 Levage :

**Le mat de forage :** (Drilling mast)

Le mat de forage est une structure métallique mobile de forme "A" pointue au sommet qui peut supporter la charge et positionner la garniture de forage. Il se distingue par la rapidité avec laquelle il est monté et démonté.



Figure I. 3: Le mat de forag

### I.4.2.2 Le treuil pour forer : (drawworks)

La puissance du treuil de forage détermine la profondeur maximale que l'appareil de forage peut effectuer. Il est principalement composé d'un tambour sur lequel s'enroulera le câble de forage, d'une boîte de vitesses qui peut sélectionner jusqu'à trois rapports de vitesses et d'un système de freinage.

## **CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier**

- ✓ Il a plusieurs rôles
- La mise en place de garnitures
- Visser et dévisser les tiges
- L'entraînement de la table de rotation sur certains appareils



**Figure I. 4:** Le treuil.

### **I.4.2.3 Les blocs de frappe :**

Les mécanismes constitués d'une ou plusieurs poulies sur lesquelles passe le câble de forage servent à réduire l'effort nécessaire pour faire élever et descendre les grandes charges.

✓ **Il existe deux types différents de moufles.:**

- La moufle fixe, ou crown block, est une partie essentielle du système de forage rotatif. Elle est située au sommet du mât et supporte des charges importantes grâce à ses poulies supplémentaires. Son rôle principal est de guider et de soutenir le câble de levage, contribuant ainsi au bon déroulement des opérations de forage.



**Figure I. 5:** Moufle fixe.



# **CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier**

---

## **La moufle mobile (traveling block) :**

Est un composant mobile du système de forage rotatif. Elle se déplace le long du mât de forage et est équipée d'un crochet de levage pour soulever et descendre la garniture de forage. Sa mobilité offre une grande flexibilité lors des opérations de forage et facilite le déplacement vertical des équipements de forage



**Figure I. 6:** Moufle mobile

## **I.4.3. La fonction de rotation : [6].**

Il y'a deux systèmes peuvent être utilisés :

### **Système 'Kelly rotary' table :**

Le système 'Kelly rotary' table est responsable de la transmission du couple de rotation nécessaire à la garniture de forage. La table de rotation entraîne la tige carrée (kelly) pour faire tourner la garniture, tandis que la tête d'injection permet l'injection de fluide de forage. De plus, la table de rotation assure le support de la charge de la garniture de forage.

### **Système de top drive (TDS) :**

Une technologie avancée utilisée dans les opérations de forage. Il est conçu pour remplacer le système conventionnel de forage rotatif (Kelly-rotary table system) et combine plusieurs fonctions essentielles en une seule unité.

Le top drive est une tête d'injection motorisée qui est entraînée par un ou plusieurs moteurs électriques ou hydrauliques. Il peut être installé sur le mât de forage et permet d'effectuer les opérations de rotation, de pompage et de levage de la garniture de forage. Cette technologie moderne qui combine les fonctions de rotation, de pompage et de levage dans une seule unité motorisée. Il offre des avantages en termes de contrôle, de flexibilité et d'efficacité par rapport au système conventionnel de forage rotatif.

# CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier

- ✓ Le top drive effectue plusieurs opérations comme :
  - Faire tourner la garniture de forage (drill string)
  - Assurer la circulation de la boue de forage
  - Remontée et descente des tiges.



Figure I. 7: Le top drive.

## I.4.4 Fonction de sécurité

- ✓ **Les obturateurs (Blow out preventers) :**

Les obturateurs sont des valves de sécurité installées en surface du puits de forage pour prévenir les éruptions incontrôlées de gaz et de fluides. Ils sont essentiels pour assurer la sécurité des opérations de forage et pour protéger les travailleurs et l'environnement contre les risques liés aux pressions excessives et aux blowouts. Les obturateurs sont composés de valves puissantes et robustes qui peuvent être actionnées manuellement ou à l'aide de systèmes hydrauliques. Lorsqu'une situation d'urgence se produit, telle qu'une pression anormale ou une éruption de gaz, les obturateurs sont activés pour sceller le puits et stopper la circulation des fluides. Les obturateurs, également connus sous le nom de blow out preventers (BOP), sont des dispositifs de sécurité essentiels installés à la surface du puits de forage. La figure I.8 montre un obturateur



Figure I. 8: monte un obturateur.

# **CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier**

## ✓ Equipements SCR :

Le système SCR (silicon controlled rectifier).

La figure I.9 montre une armoire contenant un système SCR qui a permis le développement d'un système de conversion AC/DC, où les moteurs DC sont entraînés par le courant redressé par le SCR, qui auparavant des plates-formes étaient des générateurs DC/DC, alimentés par un moteur diesel DC. Les moteurs DC pour grue, table rotative, pompe à boue, etc. SCR utilisés dans l'industrie du forage pour alimenter en électricité les moteurs des plates-formes de forage. Ils offrent une alimentation électrique régulée, une précision de contrôle et une efficacité énergétique élevée, et sont conçus pour fonctionner dans des environnements difficiles.



**Figure I. 9:** Système SCR.

## **I.4.5. Le matériel de fond :**

### **I.4.5.1 Les tiges de forage : (drill pipe) :**

Son rôle est de : transmettre le couple (Drilling torque) de la table de rotation ou de top drive jusqu'à l'outil les tiges sont creuses ce qui permet de bonne circulation du fluide de forage et de compléter le processus de pompage d'une manière efficace

Les tiges de forage sont généralement fabriquées en acier allié résistant à la corrosion et à haute résistance, ce qui leur permet de supporter les charges et les contraintes du forage en profondeur.



**Figure I. 10:** Les tiges de forage.

## **CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier**

Les tiges de forage sont fabriquées par souder les raccords (tool-joints) sur les Surépaisseurs (upsets) de tige, on distingue deux types de raccords :

- Un raccord mâle (pin tool-joint) : soudé sur l'une des extrémités de tube ;
- Un raccord femelle (box tool-joint) : soudé sur l'autre extrémité de tube.

Ces raccords permettent le vissage des tiges entre elles pour constituer un train de tiges qui forment la partie la plus longue de garniture de forage (drill string) et servent aussi comme points d'appui de ce train de tiges sur les parois du puits.

### **I.4.5.2 Les masses de tige : (drill collars) [8] :**

Les masses tige sont des tiges épaisses fabriquées en acier et caractérisées par son poids important, elles sont filetées par des raccords pour former un train de masses tiges qui constituent la partie inférieure de BHA.

Les masses de tige peuvent être utilisées individuellement ou en combinaison avec d'autres masses pour atteindre la masse totale souhaitée. Elles peuvent être ajoutées ou retirées du train de tiges de forage en fonction des besoins spécifiques du forage. montré à la figure I.11



**Figure I. 11:** les masses de tige.

### **I.4.5.3. L'outil de forage : (trépan) :**

L'outil de forage, également connu sous le nom de trépan, est l'élément responsable de la coupe et de la pénétration de la formation géologique lors du forage. Il est conçu pour être résistant, durable et adapté aux conditions de forage spécifiques. Son rôle est essentiel pour créer un trou de forage efficace et permettre l'extraction des ressources souterraines, les outils de forage sont classifiés en deux catégories



**Figure I. 12:** L'outil de forage.

✓ Elles ont pour rôles :

- Canaliser la boue de forage ;
- Atténuer les chocs et les vibrations lors de forages ;
- Procurer une certaine rigidité à proximité de l'outil de forage face à une compression énorme.

#### **I.4.5.4 Stabilisateurs : (stabiliser) :**

Les stabilisateurs sont des tubes de longueur faible installée au niveau des masses tiges pour stabiliser le BHA au centre du puits et guider la trajectoire de l'outil lors de forages.

Les stabilisateurs, également appelés stabilisateurs de forage, sont des outils utilisés dans le processus de forage pour maintenir la stabilité et l'orientation du trou de forage. Ils sont fixés à l'extrémité inférieure des tiges de forage, juste au-dessus de l'outil de forage (trépan).

Les stabilisateurs sont conçus avec un diamètre légèrement plus grand que celui des tiges de forage, ce qui permet de créer un trou de forage de diamètre constant et d'éviter l'élargissement non souhaité du trou. Ils sont généralement équipés de nervures ou d'ailettes en acier durci, qui aident à soutenir les parois du trou de forage et à prévenir les déviations indésirables le stabilisateur montre à la figure I.13

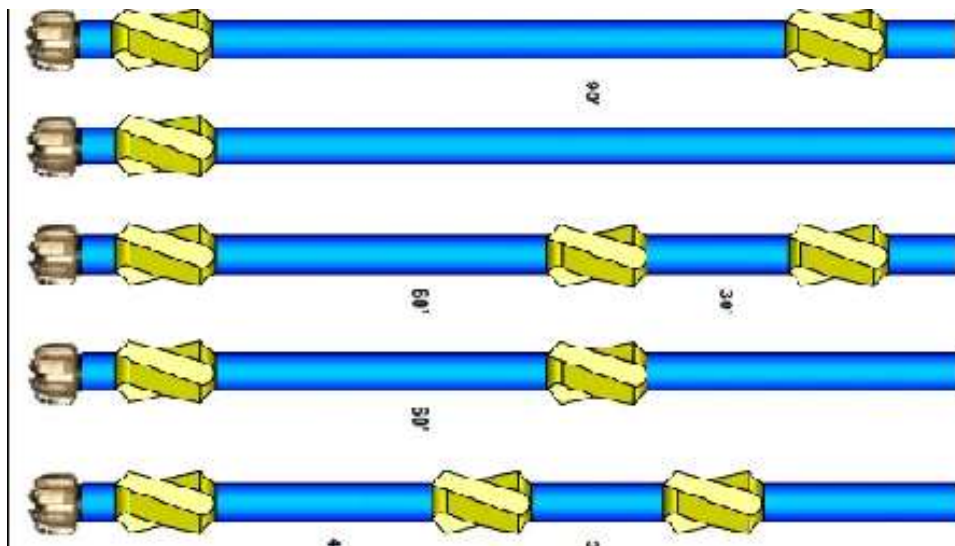


**Figure I. 13:** Les stabilisateurs

Les stabilisateurs sont des tubes de longueur faible installée au niveau des masses tiges pour stabiliser le BHA au centre du puits et guider la trajectoire de l'outil lors de forages.

### I.4.5.5 Le BHA (Bottom Hole Assembly):

Le BHA est l'ensemble d'outils et d'équipements situés à l'extrémité inférieure de la colonne de forage. Il est composé de stabilisateurs, d'outils de mesure, d'outils d'orientation, d'outils de forage directionnel et d'outils de fond de trou. Le BHA est spécifiquement conçu pour répondre aux besoins de chaque opération de forage et jouer un rôle essentiel dans le succès du forage. le figeur I.14 montre BHA.



**Figure I. 14:** le BHA

# **CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier**

## **Articlés de BHA**

L'outil et masses tiges, stabilisateurs, les tiges lourdes "HWDP"

(Des tiges plus épaisses et rigides, des tiges de forage), et autres accessoires utilisés lors du forage comme les aléseurs "reamers" (pour élargir le trou foré par l'outil), schocks subs (amortisseurs de chocs).

## **Les tiges de forage (DP)**

La garniture de forage combine toutes les fonctions de ses composantes :

- Fournir un poids sur l'outil
- Transmettre le couple de rotation (torque on bit) à l'outil
- La bonne circulation de fluide de forage et plusieurs autres fonctions
- Améliorer la stabilité et réduire les vibrations.



**Figure I. 15:** Les tiges de forage

## **I.5 Paramètres du Forage [10] :**

Plusieurs grandeurs physiques mesurées et enregistrées pendant le forage à l'aide de capteurs constituent les paramètres du forage. Ces derniers sont disposés dans divers endroits du RIG et leurs variations varient en fonction du terrain traversé.

**Il existe deux catégories de paramètres : à la fois mécanique et hydraulique**

# **CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier**

---

## **I.5.1 La pression (SPP) :**

Le niveau de pression (SPP) un capteur installé sur la colonne montante mesure en surface la pression à l'intérieur des tiges. Le débit de pompage détermine la pression.

- La perte de charge est principalement causée par les longueurs et les diamètres internes de la garniture
- La perte de charge au niveau de l'outil en raison du nombre et du diamètre des dents (TFA).

La boue en termes de viscosité, de densité.

## **I.5.2 WOB :**

Le WOB est le paramètre de forage qui mesure la force verticale appliquée sur le trépan ou le bit pendant le forage. Il est ajusté en fonction des conditions de forage pour assurer une pénétration adéquate et une efficacité maximale.

Le poids sur l'outil « Weight on Bit » représente le poids appliqué sur le trépan, calculé selon la formule suivante :

- 1)  $W_{HOL}$  = poids de la garniture ;
- 2)  $WOB = W_{OHL} - W_{OH}$  ;
- 3)  $W_{OHF}$  = poids de garniture durant le forage ;
- 4)  $W_{OHF}$  = poids garniture durant le forage.

## **I.5.3. RPM :**

Le RPM est le nombre de rotations complètes effectuées par le trépan ou le bit de forage en une minute. Il est ajusté pour optimiser la pénétration, la stabilité du trou de forage et l'efficacité globale du processus de forage, elle est en général comprise entre 50 et 300 tours par minute selon la dureté de la formation et déduite via un capteur placé sur la table de rotation.



# CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier

## I.5.4. Couple en Surface :

Le torque (couple) n'est pas un paramètre à optimiser, il représente la force opposée à la rotation, il est principalement fonction du poids sur l'outil (WOB), de la vitesse de rotation (RPM), et de la dureté de la formation traversée. Le couple en surface n'est pas transmis intégralement sur l'outil de forage, mais la mesure de surface est le seul possible actuellement. [3].

## I.5.5. ROP :

Le ROP correspond à la profondeur forée par heure (en mètres). L'optimisation du ROP est un aspect très important dans l'analyse du processus de forage car il est directement lié au temps passé sur une installation onshore ou offshore [11].

## I.6 Définition le phénomène stick slip :

Le stick-slip peut être décrit comme des surfaces alternées entre coller les unes aux autres et glisser les unes sur les autres, avec un changement correspondant de la force de frottement. Typiquement, le coefficient de frottement statique (un nombre heuristique) entre deux surfaces est supérieur au coefficient de frottement cinétique. Si une force appliquée est suffisamment importante pour surmonter le frottement statique, la réduction du frottement au frottement cinétique peut provoquer un saut soudain de la vitesse du mouvement. [12].

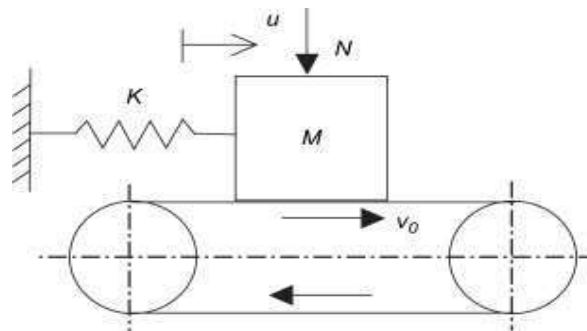


Figure I. 16: Schéma symboliquement un exemple de stick slip.

## I.7 Les Différents types de vibrations :

L'un des obstacles récurrents durant les opérations de forage est les vibrations de garniture, qui sont considérées comme un contributeur majeur à la fatigue ou l'usure prématurée du système de forage et de la réduction de la vitesse de progression (ROP), les modes de vibrations peuvent se produire simultanément lors du forage : vibrations axiales, latérales et les vibrations de torsion.

# **CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier**

---

## **I.7.1 la vibration de torsion**

Les vibrations de torsion sont des vibrations indésirables qui se produisent dans le système de forage rotatif. Elles peuvent avoir des effets négatifs sur le processus de forage et nécessitent des mesures d'atténuation appropriées pour assurer un forage efficace et sûr.

## **I.7.2 Les vibrations axiales :**

Elles correspondent au mouvement périodique de l'outil dans la direction de l'axe de garniture dû au changement de poids appliqué sur chaque taillant entraînant une variation de la profondeur de coupe. La rugosité des roches forées et la variation de pression de la boue sont aussi des causes principales de l'apparition de ce type de vibration le "Bit bounce" (rebond de l'outil) est la forme extrême des vibrations axiales, se produit quand l'outil est en contact discontinu avec le fond de formation et peut se propager facilement vers la surface et engendrer la résonance du système.

## **I.7.3. Les vibrations latérales :**

Elles se concentrent au niveau de l'outil et le BHA par des mouvements perpendiculaires à l'axe de garniture. Causées essentiellement par les variations du poids sur l'outil et l'interaction avec les parois du puits.

Quand l'amplitude de ces vibrations devient considérable elles provoquent une précession de l'axe de rotation de garniture donc en plus de tourner sur elle-même, elle tourne autour du puits, ce phénomène est appelé "Bit whirl" et il peut avoir des effets très dangereux sur l'outil et sur les éléments de la BHA.

## **I.7.4 Détection de vibration de Stick-Slip :**

- **À la surface**

L'apparition de vibrations de stick-slip peut être suivie de certains signes qui peuvent être détectés à la surface, par exemple, un couple de surface accru et irrégulier au calage supérieur du top drive, des problèmes de gestion et une perte d'outils, et une déductio ROP irrégulière [13].

# CHAPITRE I : Généralités sur le système de forage pétrolier

## • Fond de trou

Dans le forage, les indicateurs de ce type de vibrations sont :

- L'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil (Measurement While Drilling (MWD))
- Le nombre de tours du collier devient supérieur à celui de la surface ;
- Transmission ou perte intermittente du signal MWD et des données de fond.

En plus des évidences qui apparaissent lors du forage, il y a d'autres remarques qui confirment l'apparence et la gravité de ces vibrations, telles que les dommages des corps de forage, la déformation des couteaux de l'outil.

Meilleures pratiques pour protéger les équipements contre les dangers et les dommages sont résumées dans les étapes :

- Run Drilling Office / BHA: cette application de forage analyse le BHA et prédit les - évitez les mauvais régimes ; comparer les valeurs calculées avec les
- Exécutez toujours le châssis multi-vibrations (MVC) dans les outils MWD pour uneCommunication vibratoire en temps réel ;
- Utiliser des mesures contre- actives ;
- Optimiser les paramètres de forage — Wob, RPM, débit.



**Figure I. 17:** Détérioration du foret due aux vibrations saccadées dans les hydrocarbure algérien influence de (WOB/ROP)

## **I.8 Conclusion :**

Ce chapitre présente une vue d'ensemble du système de forage rotatif, en décrivant ses caractéristiques fondamentales, son mode de fonctionnement et ses composants essentiels. Nous avons également examiné les vibrations qui peuvent se produire pendant le forage, en mettant l'accent sur les vibrations de torsion causées par le frottement entre le trépan et la roche. En particulier, nous avons souligné l'importance du phénomène de stick-slip, caractérisé par des arrêts cycliques de l'outil et des risques de dommages.

Dans les chapitres suivants, nous nous concentrerons sur une modélisation approfondie du système de forage, en analysant attentivement les différents types de frottement qui affectent l'outil. Ensuite, nous explorerons différentes approches de contrôle visant à réduire de manière significative ces vibrations indésirables, avec pour objectif ultime de réduire leur impact de manière notable.



**Chapitre II**  
Modélisation du système  
de forage rotatif

**II.1 Introduction :**

Ce chapitre traite de la modélisation du forage rotatif. Il commence par une étude des modèles de frottement statique tels que Colomb, Steinbeck, etc., et des modèles de frottement dynamique tels que Dahle et Luger, suivie d'une analyse simple du phénomène de colles-glissé. Le modèle physique du système de forage rotatif, qui comprend l'induit, le train de tige et le BHA avec le trépan, est ensuite présenté dans le chapitre. Pour l'étude et l'analyse du système de forage rotatif, les équations mathématiques sous forme d'état sont utilisées pour les cas linéaires et non linéaires. Enfin, les résultats de la simulation des méthodes étudiées sont présentés, mettant l'accent sur le comportement du système non commandé.

**II.2 Modélisation des frottements :**

Le frottement est un phénomène naturel présent dans tous les systèmes mécaniques, qui se produit lorsque deux surfaces glissent l'une contre l'autre. Bien que le frottement soit une propriété utile qui permet des choses comme la marche et le freinage de la voiture, il peut également causer des effets indésirables tels que des erreurs dans l'état stable, des cycles limites et une mauvaise performance. Par exemple, dans le système de forage rotatif, le phénomène "stick-slip" se produit lorsque l'outil frotte contre les rochers, ce qui peut endommager le système. Il est donc important d'étudier avatur et de diagnostiquer les différents types de frottements afin de comprendre la dynamique du système et de le rendre plus efficace et adaptatif à ces facteurs.

**II.2.1 Les modèles statiques :**

Les modèles de Coulomb, Stiction, et de Stribeck sont parmi les modèles statiques les plus répandus dans la littérature [6].

**II.2.1.1 Frottements secs statiques :**

Les deux états de frottement statique et de lubrification limite peuvent être utilisés pour distinguer le frottement sec du frottement humide. En effet, ces deux situations se produisent lorsque la vitesse est trop faible pour permettre au fluide de circuler.

**II.2.1.2 Frottement de coulomb :**

Le frottement est calculé selon les modèles les plus simples en fonction de la différence de vitesse entre les surfaces de glissement. Le frottement de Coulomb est expliqué par [6].

$$F = F_c \operatorname{sgn}(v) = \mu F_n \operatorname{sgn}(v) \quad (\text{II.1})$$

La vitesse relative des surfaces est  $v$ , la force de frottement est  $F_c$ , la charge normale est  $F_n$  et le coefficient de frottement est  $\mu$ . La figure II.1.a présente ce modèle.

La force de frottement pour une vitesse nulle n'est pas indiquée par le modèle de frottement de Coulomb. Selon la définition de la fonction signe "sgn", il peut être nul ou prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle entre  $-F_c$  et  $+F_c$

### II.2.1.3 Frottement de visqueux :

La lubrification réduit les forces de frottement et l'usure, en empêchant le contact direct entre deux corps et en remplaçant ainsi les frottements secs par des frottements fluides. La force de frottement visqueux est normalement décrite comme :

$$F = F_v v \quad (\text{II.2})$$

Dans plusieurs applications, le frottement visqueux est combiné au frottement de Coulomb, voir la figure II.1.b. Comme la forme suivante :

$$F_{c,v} = F_c \operatorname{sgn}(v) + F_v v \quad (\text{II.3})$$

Une meilleure approximation des observations expérimentales est obtenue par une dépendance non linéaire à la vitesse :

$$F = F_v |v|^{\delta v} \operatorname{sgn}(v) \quad (\text{II.4})$$

Où  $\delta v$  dépend de la géométrie de l'application.

### II.2.1.4 Frottement de Stiction :

La stiction est le phénomène où une force de collage contrecarre les forces externes en dessous d'un certain niveau, permettant ainsi un mouvement relatif des surfaces fixes en contact.

Il est possible de considérer le modèle comme la composition de deux modèles : le premier est un modèle de frottement de Coulomb pour  $v=0$  et le second est un modèle de frottement de Coulomb pour  $v \neq 0$ .

Le modèle pour  $v=0$  dit que le frottement s'oppose au mouvement tant que la force appliquée est inférieure à la force de frottement  $F_s$ .

Le modèle avec Coulomb et frottement visqueux peut également être complété par un modèle de stiction comme illustré sur la figure II.1.

$$F = \begin{cases} F_e & \text{si } v=0 \text{ and } |F_e| < F_s \\ F_s \text{sgn}(F_e) & \text{si } v=0 \text{ and } |F_e| \geq F_s \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$F_e$  : la force appliquée au bloc.

$F_s$  : la force de frottement de stiction.

### II.2.1.5 Frottement de Stribeck :

Un modèle plus largement utilisé pour représenter le frottement a été utilisé, selon les recherches de Stribeck [6,7]. Cela permet d'améliorer la représentation de la réalité physique tout en éliminant le saut de la caractéristique frottement-vitesse :

$$\begin{cases} F(v) & \text{si } v \neq 0 \\ F_e & \text{si } v = 0 \text{ et } |F_e| < F_s \\ F_s \text{sgn}(F_e) & \text{si } v = 0 \text{ et } |F_e| \geq F_s \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$F(v)$  = Fonction arbitraire modélisant l'effet Stribeck ;

$F_s$  = Frottement statique maximal ;

$v$  = Vitesse de glissement entre les deux surfaces ;

$F_e$  = Composante tangentielle de la force externe appliquée.

Où  $F(v)$  est une fonction arbitraire qui peut prendre la forme de la courbe de la **figure II.1. d.**

Une forme courante de la non-linéarité est :

$$F(v) = F_c + (F_s - F_c)e^{-|v/v_s|^{\delta_s}} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$v_s$  : la vitesse de Stribeck



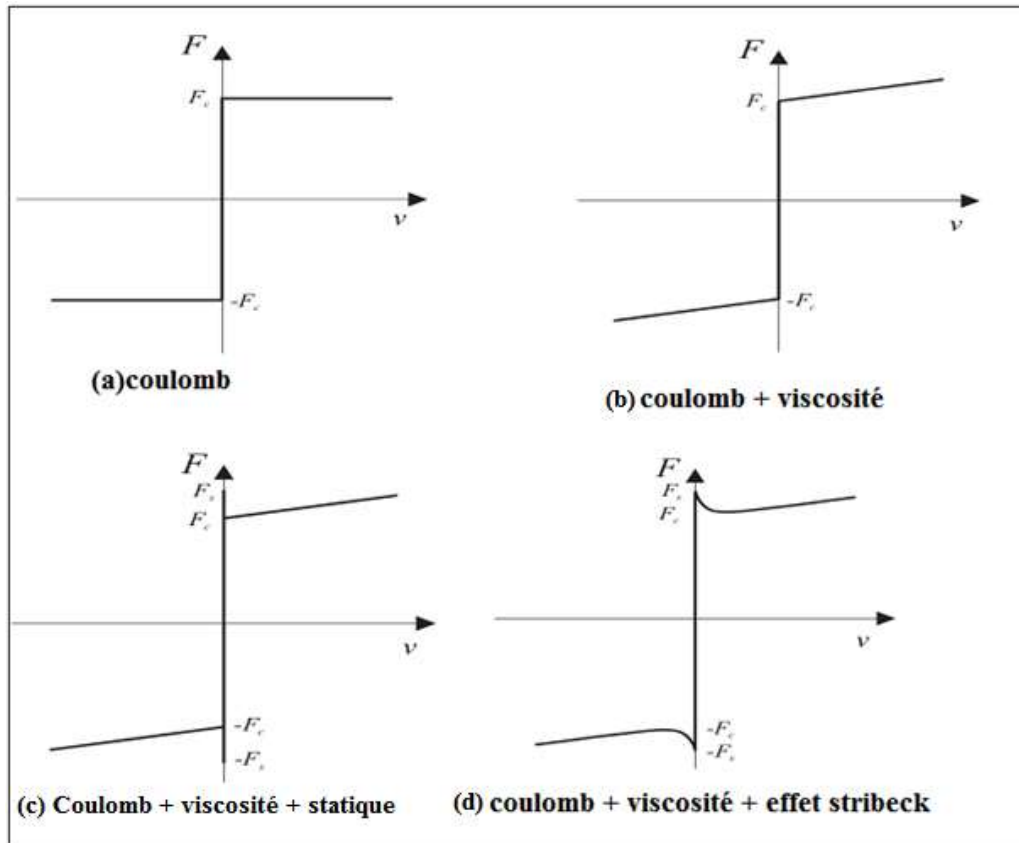


Figure II. 1: Les modes des frottements statiques.

### II.2.2 Les frottements dynamiques :

Le couple de frottement présent lorsque l'outil est déjà en mouvement est appelé frottement dynamique. Il n'a pas la même valeur que le couple de frottement statique.

Ce modèle est un mélange de différents modèles de frottements : le modèle de Bristle, le modèle de Bilmanetsorine, le modèle de LuGre, le modèle de Leuven et le modèle élasto-plastique qui présente la caractéristique de non dérive.

### II.3 Modélisation de la garniture :

Deux disques, d'inertie  $J_2$  et  $J_1$ , modélisent la table de rotation et ses composants d'un côté et la BHA de l'autre. Une raideur  $K$  représente l'ensemble des tiges.

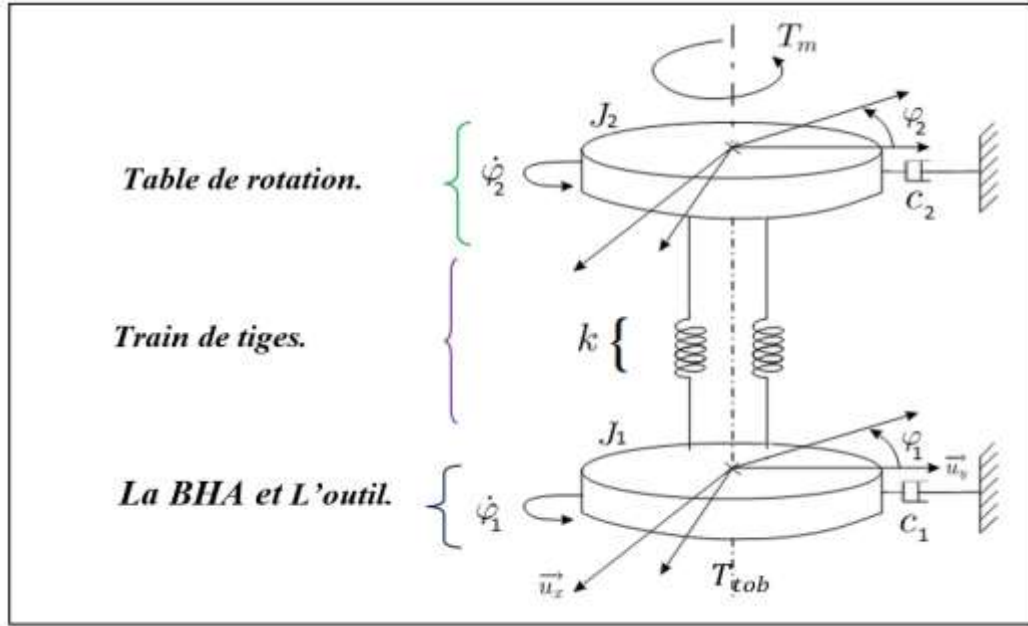


Figure II. 2: Model physique de forage rotatif (vibration de torsion) [18].

### II.3.1 Modèle Dynamique du Top drive :

L'équation de mouvement pour Top drive est donnée par la dérivation de l'équation :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dEC}{d\dot{\varphi}r} \right) + \frac{dEp}{d\varphi r} = \sum r_{ext} \quad (II.8)$$

$$jr\varphi + k(\varphi r - \varphi b) = Tm - C_2\dot{\varphi}r \quad (II.9)$$

$$\varphi r = \frac{1}{jr} (-k(\varphi r - \varphi b) - C_2\dot{\varphi}r + Tm) \quad (II.10)$$

### II.3.2 Modèle de train de tiges et le BHA :

L'équation d'évolution de ce sous-système tiges et BHA est alors :

$$J_1\Omega_1 + C_1\Omega_1 + k(\varphi_2 - \varphi_1) = T_{tob}(\Omega_1) \quad (II.11)$$

### II.3.3 Système d'induit :

#### II.3.2.1 Le moteur :

Le schéma électrique d'un moteur à courant continu (DC) à montage en série est illustré par la figure II.3

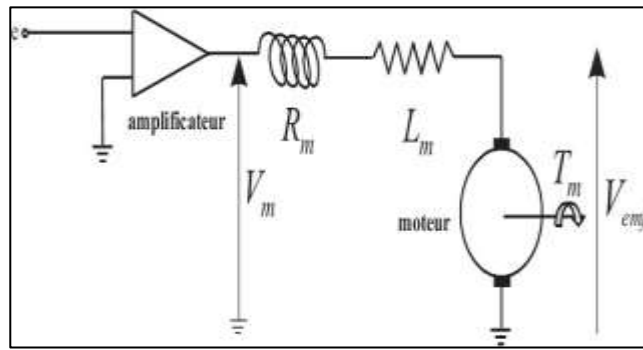


Figure II. 3: Schéma électrique de l'induit d'un moteur DC.

L'équation électrique est :

$$L_m \frac{dI_m}{dt} + R_m I_m + V_{emf} = V_m \quad (\text{II.12})$$

Donc :

$$\begin{cases} V_{emf} = K_e \Omega_2 \\ T_m = K_c I_m \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

L'impédance d'armature  $Z_a$  est donnée par :

$$sL_m + R_m = Z_a \quad (\text{II.14})$$

$s$  : La variable de Laplace. L'équation mécanique est :

Alors :

$$J_m \Omega_m = T_m - F_v \Omega_m \quad (\text{II.15})$$

$$T_m = J_m \Omega + F_v \Omega_m \quad (\text{II.16})$$

Pour faciliter la lecture, la liste des symboles est indiquée ci-dessous :

### II.3.2.2 Le Réducteur :

Le moteur DC est généralement piloté par un convertisseur de puissance comme par exemple un pont de Graëtz ou encore un redresseur SCR Le réducteur utilisé (figure II.4) a pour rapport de transmission  $n$  :

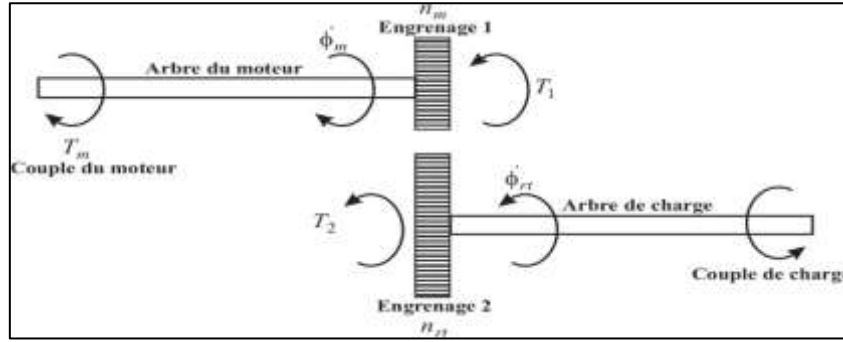


Figure II. 4: Réducteur.

Donc rapport de transmission est :

$$\eta = \frac{n_{rt}}{n_m} = \frac{\dot{\phi}_m}{\dot{\phi}_{rt}} \quad (\text{II.17})$$

Si on néglige les pertes dues aux frottements, on a

$$T_1 \dot{\phi}_m = T_2 \dot{\phi}_{rt} \quad (\text{II.18})$$

D'où

$$\eta = \frac{\dot{\phi}_m}{\dot{\phi}_t} = \frac{T_2}{T_1}$$

L'équation d'évolution de ce sous-système est :

$$J_2 \dot{\Omega}_2 + C_2 \Omega_2 + k(\varphi_2 - \varphi_1) = T_2 \quad (\text{II.19})$$

Commandeur est le couple **T2** exercé sur la table de rotation ( $u = T2$ ).

#### II.4 Mise sous forme d'état :

La mise sous forme d'état des équations précédentes est présentée ci-dessous. Le système est non linéaire à cause de la présence de la fonction discontinue  $T_{tob}(\Omega_1)$ . La fusion des sous- systèmes (2.11) et (2.19) en un seul système sous forme d'état donne :

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_1 &= \Omega_1 \\ \Omega_1 &= -\frac{k}{J_1} \varphi_1 - \frac{C_1}{J_1} \Omega_1 + \frac{k}{J_1} \varphi_2 + \frac{T_{tob}}{J_1} \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

$$\dot{\varphi}_2 = \Omega_2$$

$$\dot{\Omega}_2 = -\frac{k}{J_2} \varphi_1 - \frac{C_2}{J_2} \Omega_2 + \frac{k}{J_2} \varphi_2 + \frac{T_2}{J_2}$$

Les vibrations du train de tiges sont définies comme le déplacement relatif entre le trépan et la table de rotation. En définissant l'écart angulaire relatif entre la table de rotation et le trépan, il est possible de réduire ce système d'équations :

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (\text{II.21})$$

**II.4.1 Cas linéaire :**

L'équation d'état d'un système linéaire est :

$$\Sigma L = \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \dot{\varphi} \\ \Omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_1/J_1 & k/J_1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -k/J_2 & -C_2/J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \varphi \\ \Omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{tob}/J_1 \\ 0 \\ T_2/J_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Si on suppose que le couple non linéaire  $T_{tob}$  est constant ou nul, en l'absence de frottements, alors le système (2.27) est linéaire.

**II.4.2 Cas non linéaire :**

Le système considéré est à trois variables d'état. Le système est mis sous la forme suivante :

$$\Sigma NL = \begin{cases} \dot{X}(t) = f(X(t)) + g(X(t))u(t) \\ Y(t) = h(X(t)) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Où:  $x(t) \in \mathbb{R}^3$  est le vecteur d'état,  $y(t) \in \mathbb{R}^2$  est le vecteur de sortie, tel que :

$$X(t) = [\Omega_1 \quad \varphi \quad \Omega_2]^T \quad Y(t) = \Omega_1 \quad (\text{II.25})$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{k}{J_1} \varphi - \frac{C_1}{J_1} \Omega_1 + \frac{1}{J_1} T_{tob} \\ \Omega_2 - \Omega_1 \\ \frac{k}{J_2} \varphi - \frac{C_2}{J_2} \Omega_2 + \frac{1}{J_2} T_2 \end{bmatrix} \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

**II.5 Simulation de système non commandé :**

Le couple  $T_2$  exercé sur la table de rotation est la commande  $u$ . Le moteur DC fournit ce couple via la chaîne de transmission mécanique. Pour atténuer les oscillations du système, on retranche le terme  $C_2\Omega_{ref}$ . Pour un système proche de la réalité, on établit la relation suivante:

$$u = T_2 - C_2\Omega_{ref} \tag{II.27}$$

Reprenons le modèle non linéaire décrit dans la section (II.4) : Donc :

$$\dot{\Omega}_1 = -\frac{k}{J_1}\varphi_1 - \frac{C_1}{J_1}\Omega_1 + \frac{k}{J_1}\varphi_2 + \frac{T_{tob}}{J_1} \tag{II.28}$$

$$\dot{\varphi}_2 = \Omega_2 - \Omega_1$$

$\dot{\Omega}_2 = \frac{k}{J_2}\varphi_1 - \frac{C_2}{J_2}\Omega_2 - \frac{k}{J_2}\varphi_2 + \frac{T_2}{J_2}$  Pour réaliser les simulations nous avons utilisé les caractéristiques du système de forage rotatif reportées dans le tableau II.1

Paramètre	Description	Valeur	Unité
J1	Inertie de l'assemblage de fond + 1/3 de l'inertie de train des tiges	374	Kgm2
J2	Inertie de table de rotation + inertie de l'induit	2122	Kgm2
C1	Amortissement de l'assemblage de fond	0-50	Nms/rad
C2	Amortissement de la table de rotation	425	Nms/rad
k	Rigidité du train de tiges	473	Nm/rad
L	Inductance du moteur	0.005	H
R	Résistance du moteur	0.01	$\Omega$

**Tableau II. 1:** Valeurs numériques du système de forage.

## II.6 Résultats de la simulation

### II.6.1 Deux modèle de la simulation

#### II.6.1.1 Le premier modèles

Dans le premier modèles, le coefficient de rigidité  $K$  et le coefficient d'amortissement ( $C$ ) sont tous deux pris en compte. Nous avons obtenu de la Figure (II.5(a)) Lors de l'utilisation du premier modèle, on note que la phase de stick n'est pas visible et que la valeur du Top Drive et de la vitesse de l'outil reste les mêmes. Elle est stabilisée à 30 secondes avec une légère variation de la vitesse de l'outil, indiquant que la phase de glissement n'apparaît pas. En revanche, lorsque l'on augmente le poids sur l'outil à 70350 Nm, on remarque sur la Figure (II.5(b)), avec une valeur maximale de la vitesse de l'outil est d'environ 14 (rad / s). De ces résultats, on peut conclure que l'influence du coefficient d'amortissement  $C$  sur la réponse du système est négligeable, cela sera confirmé par la section suivante.

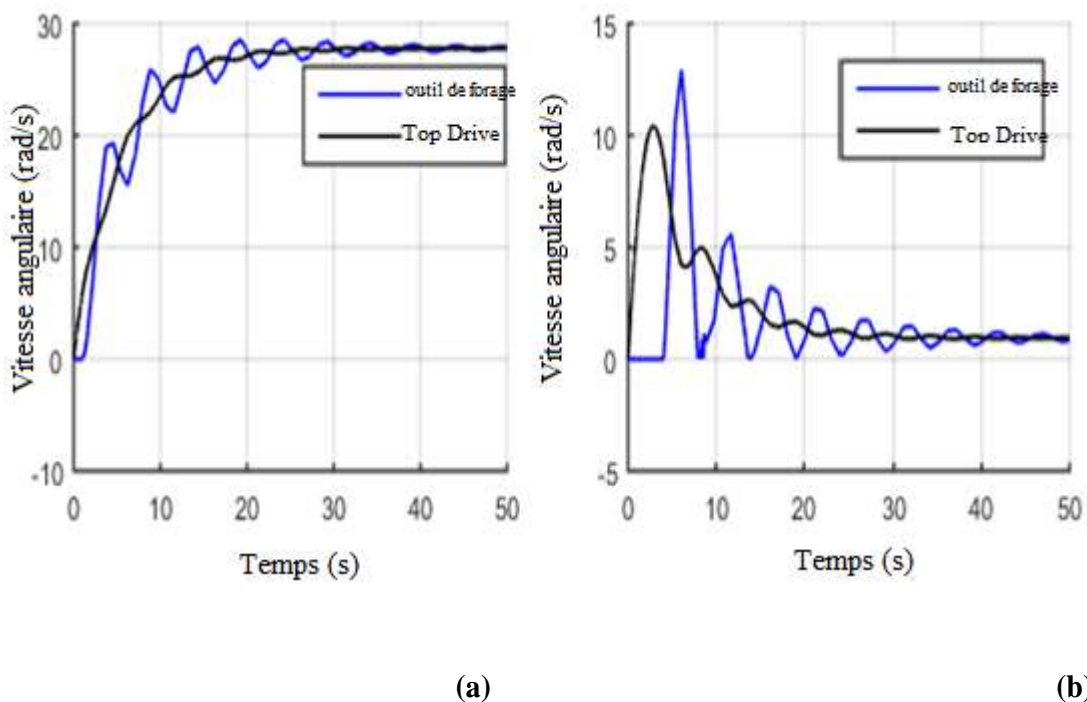
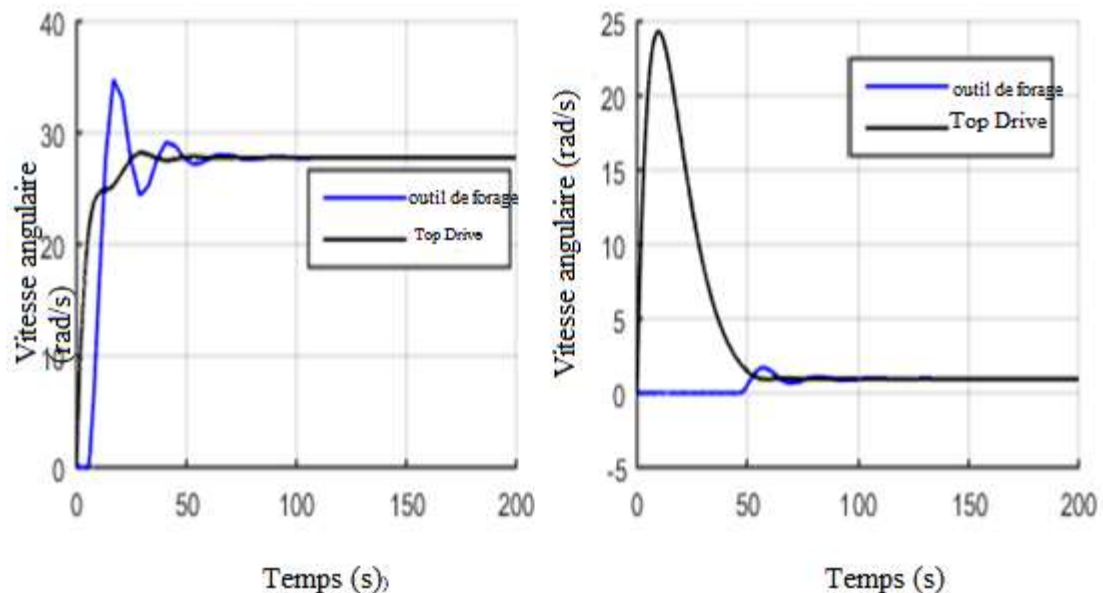


Figure II. 5: Réponses en boucle ouverte du premier modèle.

### II.6.1.2 Le deuxième modèle

Dans le deuxième modèle, il n'y a que le coefficient d'amortissement  $C$ . Sur la base de la Figure (II.6), nous pouvons dire que nous avons démontré à travers ce modèle que le coefficient d'amortissement  $C$  a une influence négligeable sur les vibrations de torsion car nous avons remarqué à partir de la Figure (II.6(a)). Que les vibrations de torsion ne sont pas apparentes, car la phase de stick et de glissement ne sont pas représentées, la réponse du système se stabilise en 50 secondes avec très peu de fluctuation de la vitesse de l'outil. Par contre, lorsqu'on augmente le poids sur l'outil à 70350 Nm, on remarque sur la Figure (II.6(b)) que la valeur maximale de la vitesse du Top Drive est d'environ 25 (rad / s), puis elle diminue à 1,7 (rad / s) et se stabilise à 60 s. De plus, la vitesse de l'outil est nulle "phase de stick" pendant une période de 40 s, après cet intervalle, elle augmente à 1,7 rad / s, et se stabilise à cette vitesse

Nous avons conclu que les vibrations de torsion n'apparaissent pas lors de la variation du coefficient d'amortissement mais cela ne veut pas dire que ce coefficient n'a pas d'influence sur la réponse de forage rotatif et la sévérité du phénomène de stick-slip.



(b)

**Figure II.6 :** Réponses en boucle ouverte du deuxième modèle pour : a)  $W_{ob} = 5350 \text{ N.m}$ ,  
b),  $W_{ob} = 70350 \text{ N.m}$ .



## **II.6 Conclusion :**

Le choix d'un modèle de friction pour mettre en œuvre une simulation dynamique n'est pas une tâche facile. Il est généralement nécessaire d'introduire un plus grand nombre de paramètres pour décrire complètement la physique des phénomènes de frottement. Parfois, ces paramètres sont obtenus expérimentalement, ce qui peut être un facteur important pour les approches de modélisation nécessitant la détermination de nombreux paramètres. Cependant, certains d'entre eux sont choisis d'une manière empirique, car ils ne peuvent pas être mesurés physiquement.

Sur la base de cette étude, nous concluons que, lorsque la viscosité est augmentée, le phénomène de stick-slip disparaît pendant un cycle mais il sera répété. Au fur et à mesure que le forage deviendra plus profond, la gravité des vibrations augmentera. D'autre part, l'augmentation de la longueur du BHA peut atténuer les vibrations à cause du poids supplémentaire

Enfin, nous nous appuyons sur le phénomène de vibration de torsion et les solutions proposées pour éliminer ce phénomène



**Chapitre III**  
Commande par mode  
glissant

### III.1 Introduction

Le contrôleur en mode glissant utilise la surface de glissement spécifique au phénomène du stick-slip pour maintenir le système de forage dans une zone où les oscillations du stick-slip sont minimisées. Cela améliore la stabilité du processus de forage, augmente la productivité, réduit les coûts d'entretien et améliore la sécurité globale de l'opération de forage. Dans le passé, les oscillations causées par les actionneurs de contrôle limitaient l'application pratique de la commande à structure variable cependant, de nombreuses méthodes ont été développées pour atténuer ces oscillations et réduire leur impact sur les grandeurs asservies du système. Ce chapitre présente un contrôleur en mode glissant qui répond aux spécifications préétablies, en utilisant la surface de glissement comme terme conventionnel pour les concepts fondamentaux de la commande à structure variable et de la technique de commande par mode de glissement.

### III.2 Système à structures variable

Un système à structure variable est capable de s'adapter et de modifier sa configuration interne pour répondre aux besoins changeants et exploiter les avantages spécifiques de chaque structure. La sélection de la structure et la logique de commutation sont des éléments essentiels pour optimiser les performances et les fonctionnalités du système. Dans ce processus, on peut utiliser des techniques d'optimisation, des modèles mathématiques, des simulations et des algorithmes avancés pour atteindre ces objectifs. [26].

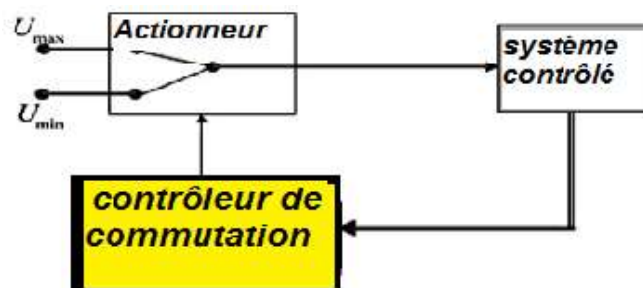


Figure III. 1: Système de réglage simple avec structure variable.

### III.3 Le principe de réglage de commande régime glissant

La méthode des modes glissants est une approche qui vise à conduire la trajectoire d'état d'un système vers une surface de glissement, puis à la faire commuter jusqu'au point d'équilibre, entraînant ainsi le phénomène de glissement [14].

Une forme courante de commande à structure variable est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{ll} U_i = U_{max} & \text{si } S_i(x) > 0 \\ U_i = U_{min} & \text{si } S_i(x) < 0 \end{array} \right\} \text{ avec } i = 1 \dots m \quad (\text{III.1})$$

$U_i (i=1, \dots, m)$  : les composantes du vecteur de commande

Parmi les propriétés des modes glissants :

- En mode de glissement, la trajectoire d'état du système se trouve sur une surface de dimension inférieure à celle de l'espace d'état. Cela implique que l'ordre des équations différentielles régissant le système en mode de glissement est réduit, ce qui facilite son analyse et sa modélisation.
- La théorie des modes glissants est particulièrement adaptée aux systèmes dont la commande est discontinue, c'est-à-dire des systèmes qui fonctionnent par intermittence ou avec des actions de contrôle non-continues.

La dynamique du système en mode de glissement est entièrement déterminée par le choix des coefficients de la surface de glissement. Ces coefficients jouent un rôle crucial dans la définition de la trajectoire de glissement et influencent le comportement du système

#### III.3.1 Fonction de commutation

La structure de commande est caractérisée par le signe d'une fonction vectorielle  $S(x) = 0$ , appelée fonction de commutation dans le cas des modèles linéaires, la fonction de commutation est choisie comme une fonction linéaire de l'état

$$S(x) = [S_1(x), S_2(x), S_m(x)] \quad C_x \text{ où } c = [C_1, C_2, \dots, C_m]$$

Chaque fonction scalaire commutation  $s_j(x)$  représente une surface linéaire  $s_j(x)$

#### III.3.2 Hyperplan de commutation

La surface de commutation associée au système de commande à structure variable défini

précédemment : Si  $S_j\{x \in R^n ; s_j(x) = 0\} = 0, j = 1, \dots, m$  est appelée hyper surface de glissement.

### III.4. Exploration de la dynamique de la surface en mouvement (Régime glissant)

Si pour tout vecteur d'état initial  $x(t_0) \in s$  la trajectoire d'état reste dans

L'hyper surface  $s_j, x(t) \in s, \forall t > t_0$  alors  $x(t)$  est un mode glissant pour le système.

#### III.4.1 Choix de la Surface de glissement

Le SMC est un processus de conception de contrôleur en deux parties :

La première partie s'associe à la conception d'une surface glissante de sorte que le mouvement de glissement satisfait aux spécifications de design traitées avec elle.

La deuxième partie se concentre sur la sélection d'une loi de contrôle qui fera que la surface de commutation attire l'état du système.

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x).u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Le problème de contrôle, qui minimise le problème de conduire le système à sa surface et de s'assurer qu'il reste sur cette surface tout le temps, est basé sur l'approche de Lyapunov [26].

Le choix de la surface glissante est généralement défini en fonction de l'ordre du système, tel qu'il est donné par les équations dynamiques du système. On choisit :

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.3})$$

La quantité  $e(x)$  : représente l'écart entre la variable à régler et sa valeur de référence.

$\lambda$ : Constante positive

$r$  : Le degré relatif.

### II.4.2 La condition d'existence

La convergence du régime de glissement est assurée sous les conditions suivantes :

$$\dot{s} \cdot s < 0 \quad (\text{III.4})$$

$$\dot{s} \cdot s < -k |s| \quad (\text{III.5})$$

Avec :  $k > 0$

Ces critères permettent aux états du système de converger vers la surface glissante, et les obligent à rester à proximité de la surface glissante.

La condition est donnée par (III.4) ; elle ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface glissante. Cependant, pour obtenir une convergence dans le temps fini, la condition (III.5) doit être vérifiée

### III.4.3 La fonction de Lyapunov :

La tâche consiste à créer une fonction scalaire positive pour les variables d'état du système ( $V(x) > 0$ ) et à sélectionner la loi de commutation qui fera décroître cette fonction ( $\dot{V}(x) < 0$ ).

Généralement, cette fonction est utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires.

Les conditions (III.3) et (III.4) sont dérivées de la méthodologie de **Lyapunov** où une fonction scalaire positive  $V(x) > 0$  est choisie comme [26] :

$$V(S) = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{III.6})$$

Son dérivé est calculé et étudié comme étant négatif ou au moins semi-négatif.

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (\text{III.7})$$

### Détermination de la loi du contrôle :

Cette loi est divisée en deux équations ; la première est la loi de commande équivalente  $U_{eq}$  qui est donnée par :

$$U = u_{eq} + u_d \quad (\text{III.8})$$

Ce qui représente la partie continue de l'entrée, obtenue par la dérivation des surfaces glissantes, et annulant tous les termes qui entravent la stabilité du système, physiquement, il peut être interprété comme la valeur moyenne de la commande réelle.

La deuxième équation est la loi discontinue  $u_d$ , qui est ajoutée dans le but d'éliminer le phénomène de chatter. Elle est souvent donnée par :

$$u_{d1} = -k \operatorname{sign}(s(x)) \quad (\text{III.9})$$

$$u_{d2} = K \operatorname{sat}(s(x)) \quad (\text{III.10})$$

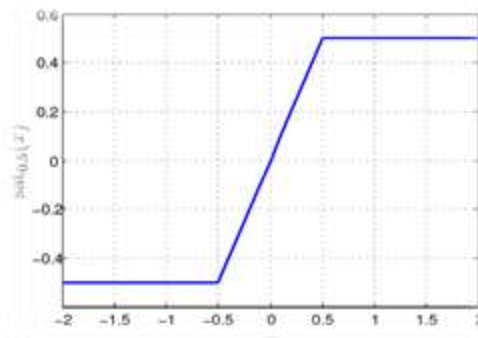
#### III.4.4 La fonction saturation

Le broutement qui peut survenir lors de l'utilisation de la fonction "signe" peut être réduit en utilisant une fonction de saturation appropriée pour filtrer les hautes fréquences il est possible de contrôler les valeurs extrêmes et de limiter les fluctuations dans une plage spécifique la figure III.2 montre la fonction de saturation

$$\operatorname{Sat} = \begin{cases} \frac{s}{\varphi} & \text{si } \frac{|s|}{|\varphi|} \leq 1 \\ \operatorname{Sign} \frac{s}{\varphi} & \text{si } \frac{|s|}{|\varphi|} \geq 1 \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$\varphi$ : Largeur du seuil de la fonction de saturation [26].

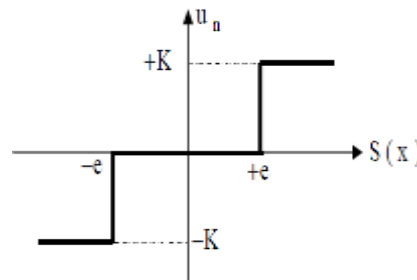


**Figure III. 2:** La fonction de saturation

**III.4.5 Commande avec un seul seuil**

Un seul seuil caractérise une commande avec un seul seuil et une commande discontinue est donnée par l'expression

$$\begin{aligned} u_n &= 0 & \text{si } |s| < e \\ u_n &= k \cdot \text{sing}(s) & \text{si } |s| > e \end{aligned} \tag{III.12}$$



**Figure III. 3:** La fonction signe de la commande avec un seul seuil.

**III.4.6 La commande utilisant l'approche de la loi d'arrivée**

Dans cette approche, la loi d'arrivée est formulée comme une équation différentielle qui décrit la dynamique de la fonction de commutation. Cette équation est asymptotiquement stable et est identique à la condition de glissement. La forme générale de la loi d'arrivée est la suivante :

$$\dot{S}(x) = -Q_{ref} \text{sign}(S(x)) - K S(x) \tag{III.13}$$

Où :

$$Q : \text{diag} [q_1, q_2, q_3 \dots \dots \dots q_m] \quad q_i \geq 0$$

$$\text{sgn}(s) = [\text{sgn}(S_1), \text{sgn}(S_2) \dots \dots \text{sgn}(S_m)]^T$$

$$K : \text{diag} [k_1, k_2, k_3 \dots k_m]^T, \quad k_i > 0$$

**III.5. Commande glissante (Sliding Mode Control)**

La méthode de commande glissante (SMC) est utilisée par les systèmes de contrôle pour garantir un suivi précis malgré les incertitudes et les perturbations. En particulier, il fonctionne bien dans les applications où les paramètres du système sont variables ou mal connus.

Le système d'un contrôle par mode de glissement est divisé en deux zones : une zone de



glissement et une zone de non-glissement. La surface de glissement, une fonction mathématique spécifique qui dépend des états du système, est utilisée pour déterminer la région de glissement. Le contrôle par mode de glissement vise à forcer le système à "glisser" le long de cette surface de glissement, ce qui garantit un comportement de suivi de référence précis. [16].

$$A(t) = \{x; s(x, t) \leq \varphi\} \quad (III.14)$$

On utilise  $\varphi > 0$

On applique à l'équation III.3 Pour notre cas  $r=1$  :

On trouve l'équation III.14 ;

$$s = e_1 + \lambda \int_0^t e_1 + \lambda \int_0^t e_2 d\tau \quad (III.15)$$

$$\text{Avec } e_1 = x_3 - Q_{ref} \text{ et } e_2 = x_3 - x_1 \quad (III.16)$$

Donc :

La surface de glissement proposée dans ce travail est donnée par

L'équation (III.17).

$$s(x) = (x_3 - Q_{ref}) + \lambda \left[ \int_0^t (x_3(\tau) - Q_{ref}) d\tau + \int_0^t (x_3(\tau) - x_1(\tau)) d\tau \right] \quad (III.17)$$

Où  $\lambda > 0$ , Si  $S$  est proche de zéro alors  $x_1$  se rapprochera de  $x_3$  qui s'approche également de  $Q_{ref}$ . Le but du contrôleur est de forcer  $s$  à s'approcher de zéro. la loi de surface de glissement

Est choisie comme :

$$S = d_2 x_1 - b_2 x_2 + a_2 x_3 + c_2 u + \lambda (x_3 - Q_{ref}) + \lambda (x_3 - x_1) \quad (III.18)$$

$$\lambda > 0$$

On pose :

L'équation de mouvement du système est donnée par l'équation, (III.19)

$$\begin{cases} x'_1 = a_1x_1 + b_1x_2 + d_1x_3 \\ x'_2 = x_3 - x_1 \\ x'_3 = d_2x_1 - a_2x_3 - b_2x_2 + c_2 U \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

### III.6 Les avantages de la commande en mode glissant sont les suivants

**Robustesse :** La commande en mode glissant est intrinsèquement robuste aux perturbations et aux variations paramétriques. Elle permet au système de maintenir une performance stable malgré les perturbations extérieures.

**Insensibilité :** En régime glissant, le système est insensible aux variations des paramètres du système et aux perturbations externes tant que les conditions du régime glissant sont respectées. Cela garantit une performance fiable et constante.

**Rapidité de convergence :** La commande en mode glissant permet une convergence rapide du système vers la surface de glissement. Cela permet d'atteindre rapidement l'état ou la solution souhaitée, ce qui est essentiel dans de nombreux systèmes de contrôle en temps réel.

**Adaptabilité :** La commande en mode glissant est capable de s'adapter aux variations du système en ajustant dynamiquement la surface de glissement. Cela permet d'obtenir une performance optimale même dans des conditions changeantes.

**Simplicité de conception :** La conception d'un contrôleur en mode glissant est généralement simple et intuitive par rapport à d'autres techniques de contrôle plus complexes. Cela facilite la mise en œuvre pratique et la compréhension du système.

### III.7 Relation entre phénomène stick-slip et mode glissement

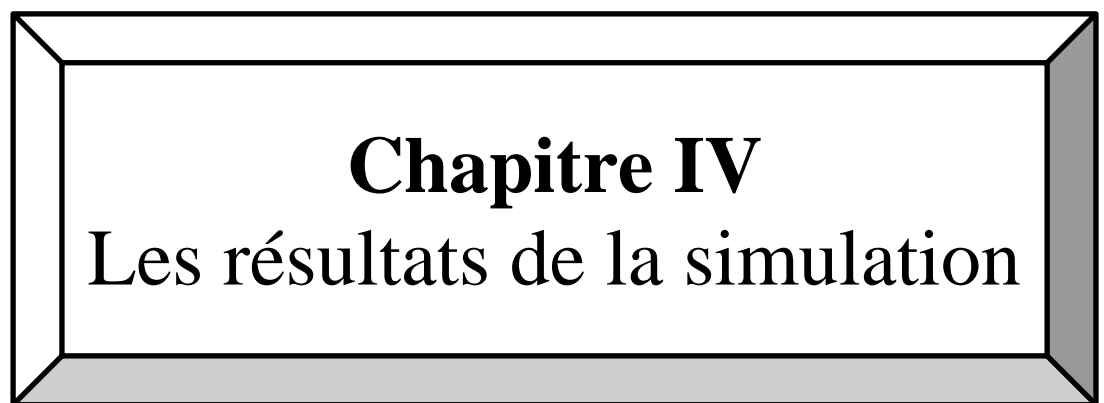
La relation entre le glissement d'adhérence (glissement d'adhérence) et le mode de glissement est que le mode de glissement peut être utilisé pour réduire ou éliminer le phénomène d'adhérence dans certains systèmes. Le stick-slip se produit lorsque le système est soumis à des forces de frottement statiques, ce qui provoque des mouvements irréguliers ou saccadés. Les forces de frottement statiques peuvent être compensées en forçant le système à "glisser" le long de la surface d'avec un contrôle par mode de glissement.

### III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré la commande par mode glissant, une méthode robuste largement utilisée dans les systèmes de contrôle pour assurer un suivi précis malgré les incertitudes et les perturbations. Cette approche permet au système de suivre de manière précise les références de contrôle en le guidant le long d'une surface spécifique. Le contrôle par mode glissant offre une grande flexibilité et est particulièrement efficace lorsque les paramètres du système sont mal connus ou variables.

Il permet également d'atténuer ou d'éliminer le phénomène de stick-slip, qui se produit lorsque le système est soumis à des forces de frottement statiques.

La conception de la commande par mode glissant vise à éviter une discontinuité réelle tout en préservant les propriétés principales du système. Dans le prochain chapitre, nous aborderons l'application de cette commande sur le modèle de forage rotatif. En utilisant des outils tels que Simulink et les boîtes à outils spécifiques au contrôle par mode glissant dans Matlab, nous pourrions concevoir des surfaces de glissement, simuler le comportement du système, analyser les performances de contrôle et les améliorer si nécessaire.



**Chapitre IV**  
Les résultats de la simulation

## **IV.1 Introduction :**

Les vibrations de torsion ont un impact sur le fonctionnement du forage, ce qui peut réduire la qualité du forage ainsi que le taux de pénétration, et mettre en danger l'équipement. Afin de contrôler le mode de glissement, un modèle de forage rotatif sera utilisé. Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats obtenus en utilisant le modèle (eq.II.22) après son implémentation dans MATLAB. Les résultats seront présentés en deux parties : les résultats en boucle ouverte (linéaire et non-linéaire) et les résultats en boucle fermée en utilisant la commande en mode glissant. La première partie des résultats concerne les résultats en boucle ouverte. Dans cette configuration, les vibrations de torsion sont mesurées sans qu'un contrôle actif ne soit appliqué. Nous avons obtenu des résultats linéaires et non-linéaires pour le modèle de forage rotatif. Les résultats linéaires ont montré une réponse fréquentielle bien définie, tandis que les résultats non-linéaires ont montré une réponse complexe en fonction de la vitesse de rotation. Les résultats en boucle fermée utilisant la commande en mode glissant ont également été obtenus. Cette commande permet de réduire les vibrations de torsion en appliquant une force de friction entre le mandrin et le foret. Les résultats ont montré une réduction significative des vibrations de torsion et une amélioration du taux de pénétration

## **IV.2 Les résultats de la simulation en boucle ouverte :**

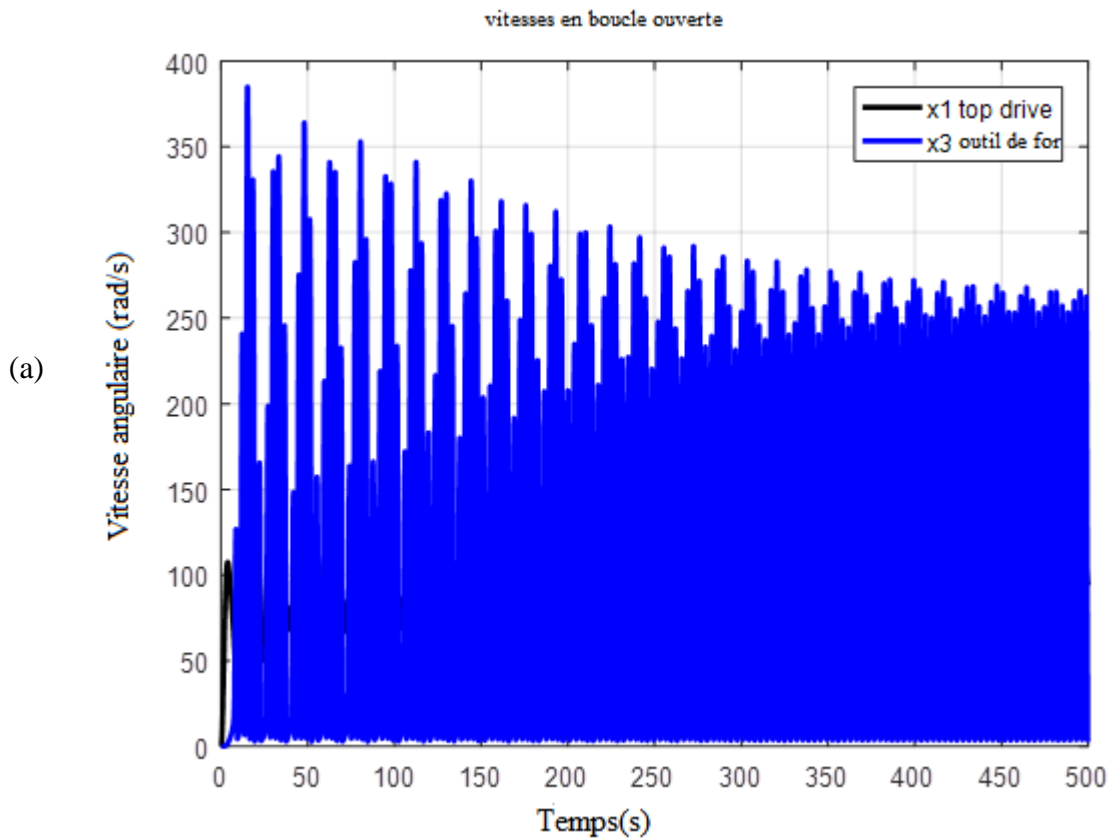
Nous examinerons d'abord la réponse de notre modèle dans le cas linéaire, où le couple sur l'outil est soit constant, soit égal à zéro, afin d'étudier l'influence des deux modèles de contact outil-roche. Nous étudierons la réponse du modèle de forage en fonction de la force axiale appliquée sur l'outil si le couple sur l'outil est constant. Nous examinerons également la réponse de l'outil en fonction de sa vitesse de rotation et de son avancement. Nous étudierons la réponse du modèle en fonction de la force axiale appliquée sur l'outil et de la vitesse de rotation de l'outil si le couple sur l'outil est nul. Ensuite, nous comparerons les résultats des deux modèles de contact outil-roche pour

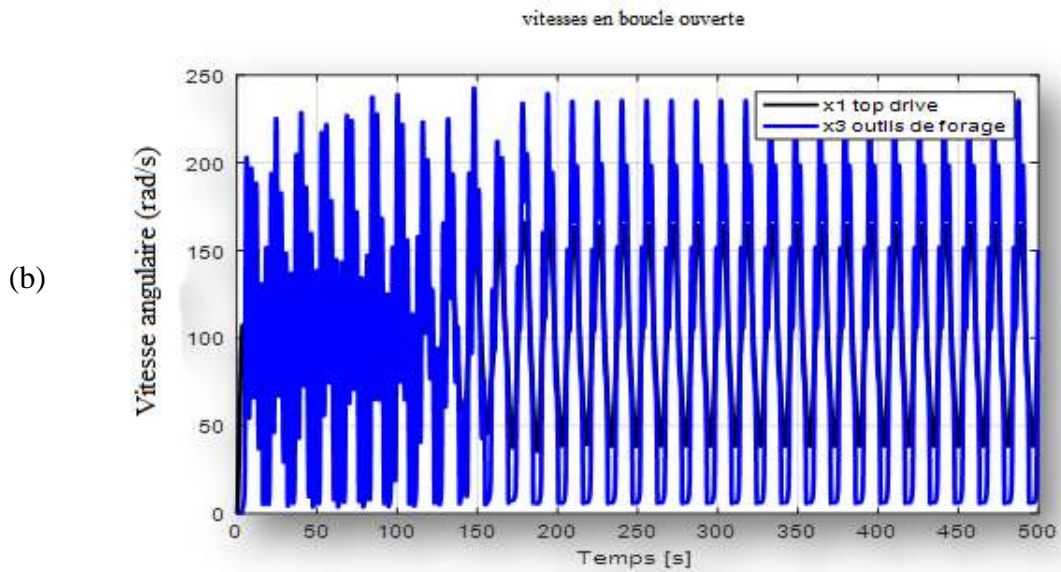
La vitesse angulaire de l'outil et du top drive est illustrée en bleu et noir à la Figure IV.1.a Lorsque l'entrée est fixée à 250 rad/s, la vitesse de l'outil présente de légères oscillations pendant 0 à 500 secondes, puis les deux vitesses de l'outil et le top drive se stabilisent à 230 rad/s.

Les vitesses erratiques de l'outil sont illustrées à la figure IV.1. b On peut également remarquer que pendant la phase de stick, la vitesse de l'outil diminue considérablement, tandis

que la vitesse du top drive augmente légèrement. Après environ 500 secondes, les deux vitesses se stabilisent avec des oscillations occasionnelles.

Ces résultats sont importants car ils montrent clairement l'impact du poids sur l'outil sur le phénomène de stick-slip et les vitesses angulaires du top drive et de l'outil. Ils confirment également l'importance de prendre en compte le phénomène de slip-slip dans la modélisation et la commande des systèmes de forage rotatif. En ajustant les paramètres du système en fonction de ces informations, la performance et la sécurité du forage rotatif peuvent être améliorées.

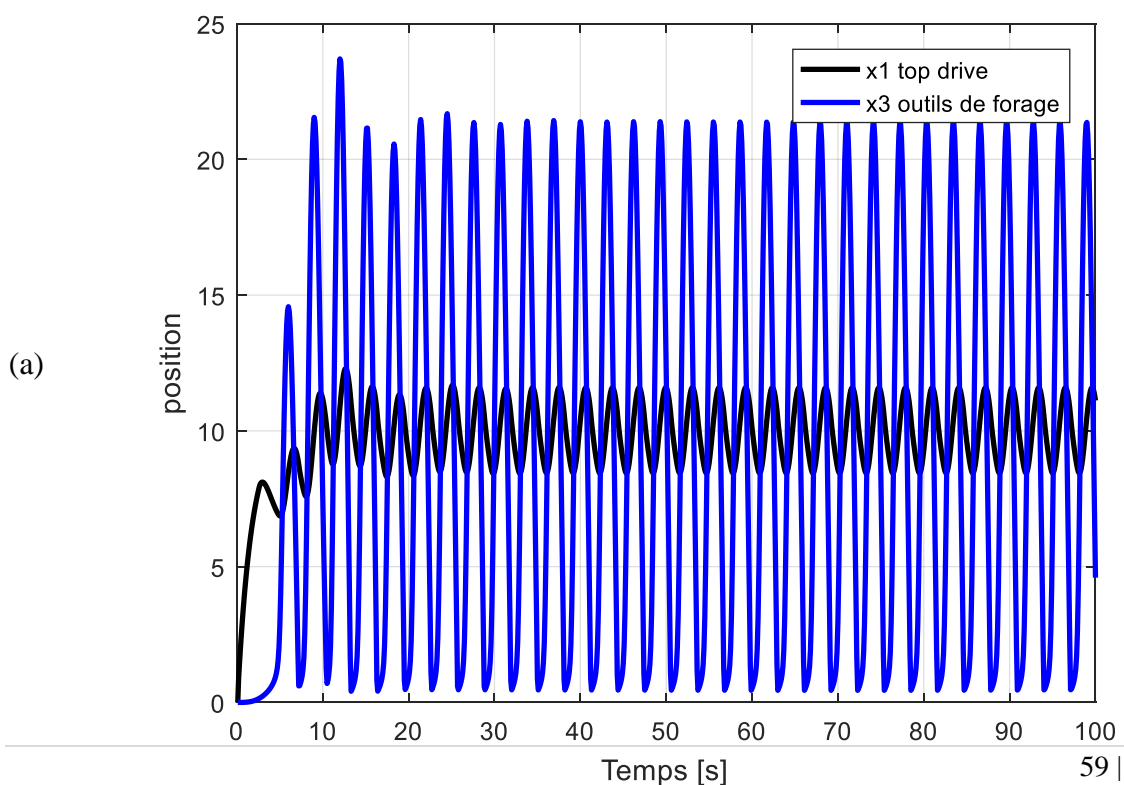


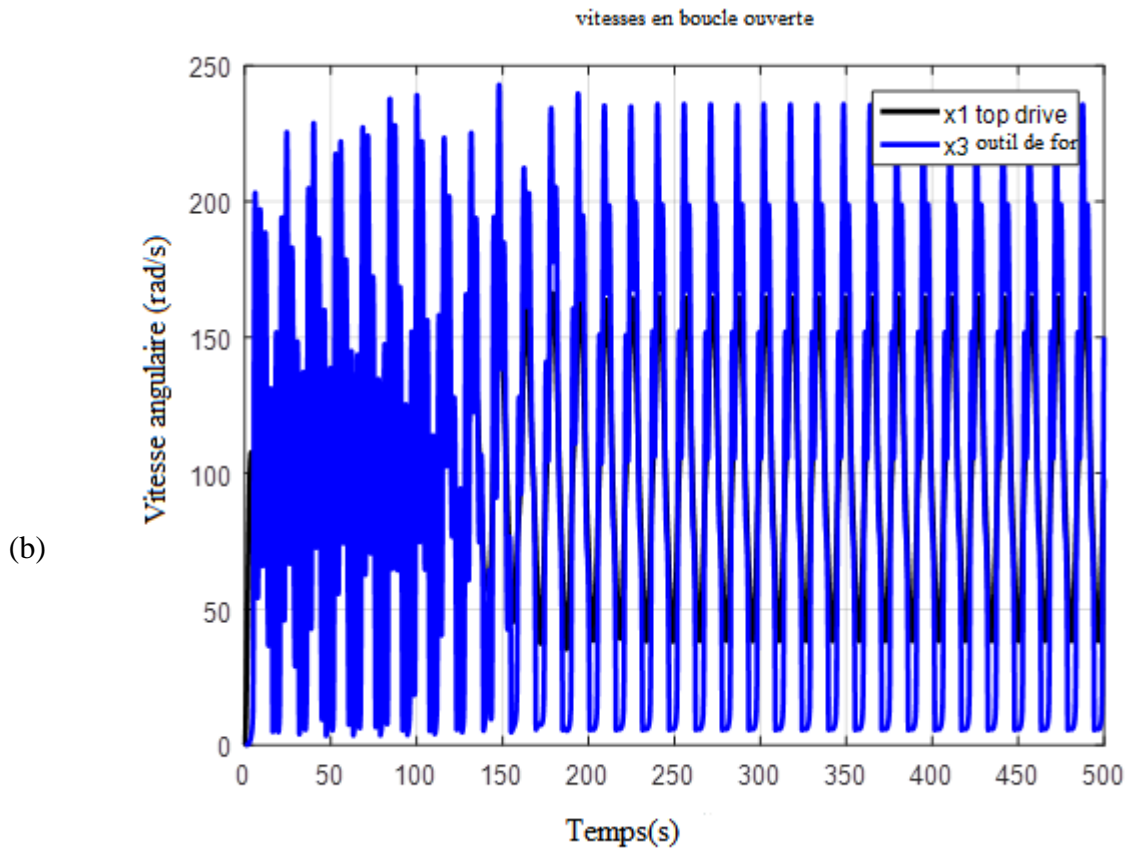


**Figure IV. 1:** Les réponses en boucle ouverte des systèmes de forage rotatif du modèle généralisé.

**Fixez la valeur Wob à 30 N et modifiez l'entrée :**

Les vitesses angulaires de l'outil et du top drive obtenues à l'aide du modèle général après une augmentation de l'entrée à 200 rad/s sont illustrées à la figure IV.2 a Comme le montre la figure IV.2.b le phénomène de stick-slip est bien présent. Le top drive a une vitesse angulaire de 100 rad/s tandis que l'outil a une vitesse angulaire de 250 rad/s, et les deux restent oscillantes même après une durée de 500.





**Figure IV. 2:** Les réponses en boucle ouverte des systèmes de forage rotatif du modèle généralisé.

### IV.3 Les résultats de la simulation en boucle fermée :

Cette section est divisée en deux sections distinctes. La première section contient les résultats obtenus avec la commande en mode glissant du modèle général, tandis que la seconde partie utilise le modèle stribeck. En conclusion, cette section démontre que les vibrations de torsion ont été réduites au minimum en un temps record.

#### IV.3.1. La fonction générale est la suivante :

##### IV.3.1.1 Première simulation :

Sur les figures IV.3 a, IV.3.b et IV.3.c, l'évolution des vitesses angulaires de commande et de surface de glissement est illustrée. Les résultats suivants peuvent être observés lorsque la commande en mode glissant est utilisée avec les paramètres  $\lambda= 0,3$  et  $K= 0,6$  :

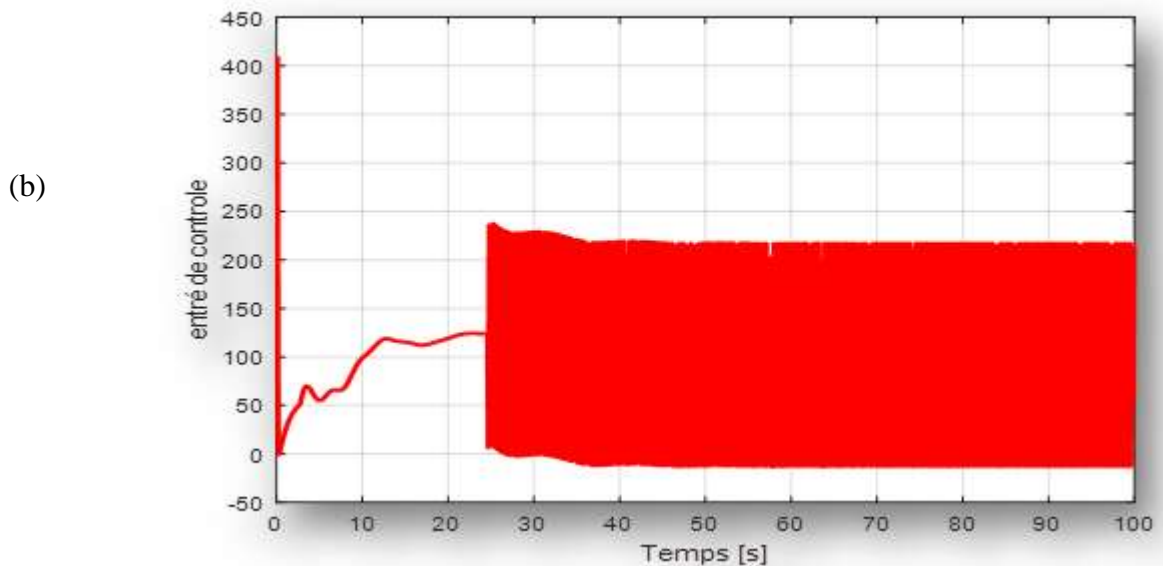
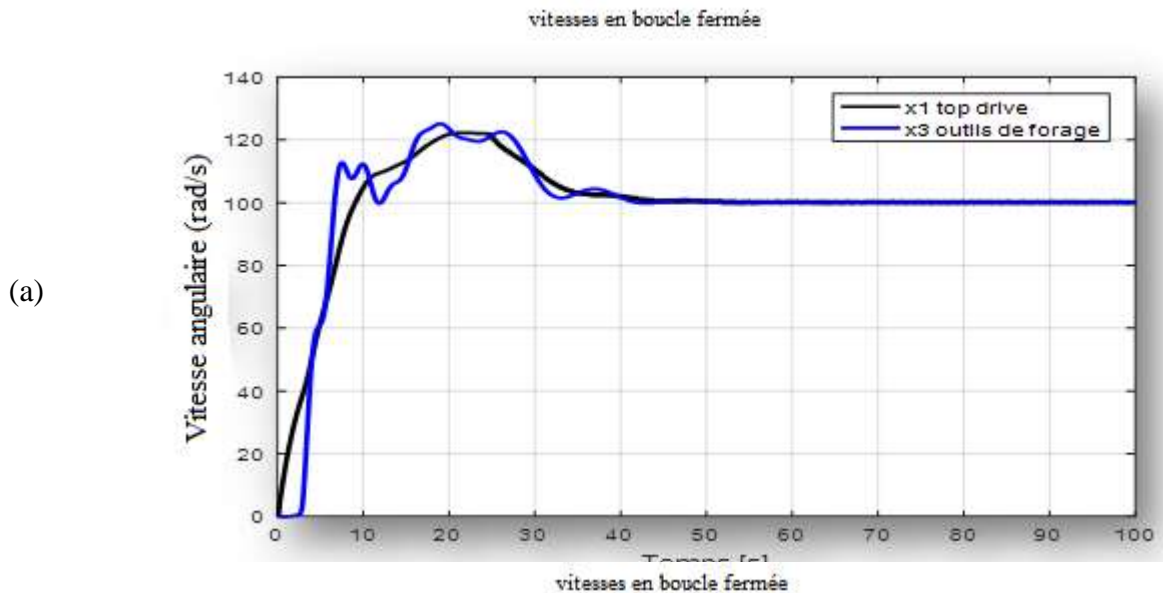
a) Les vitesses de l'outil et du top drive augmentent légèrement avec de petites oscillations jusqu'à 120 rad/s. En raison de la présence du terme discontinu, un phénomène de broutement (les deux vitesses oscillent autour de la valeur de consigne) se produit après 50 s lorsque les



deux vitesses se stabilisent à la valeur de consigne ( $Q_{ref}$ ) de 20 rad/s

b) La courbe de commande (figure IV.3b) montre clairement le phénomène de broutement à partir de  $t=25$  s, lorsque la valeur de commande augmente de 55 rad/s jusqu'à 240 rad/s, puis continue à varier jusqu'à  $t=25$  s, où le broutement apparaît clairement. Le broutement peut entraîner un certain nombre d'effets indésirables qui affectent la praticité des contrôleurs à mode glissant et peuvent endommager les composants du système (outil, top drive, etc.) tout en réduisant la précision du contrôle.

c) L'objectif de la commande est que la surface de glissement augmente de -20 rad/s jusqu'à ce qu'elle s'annule à  $t=25$  s.



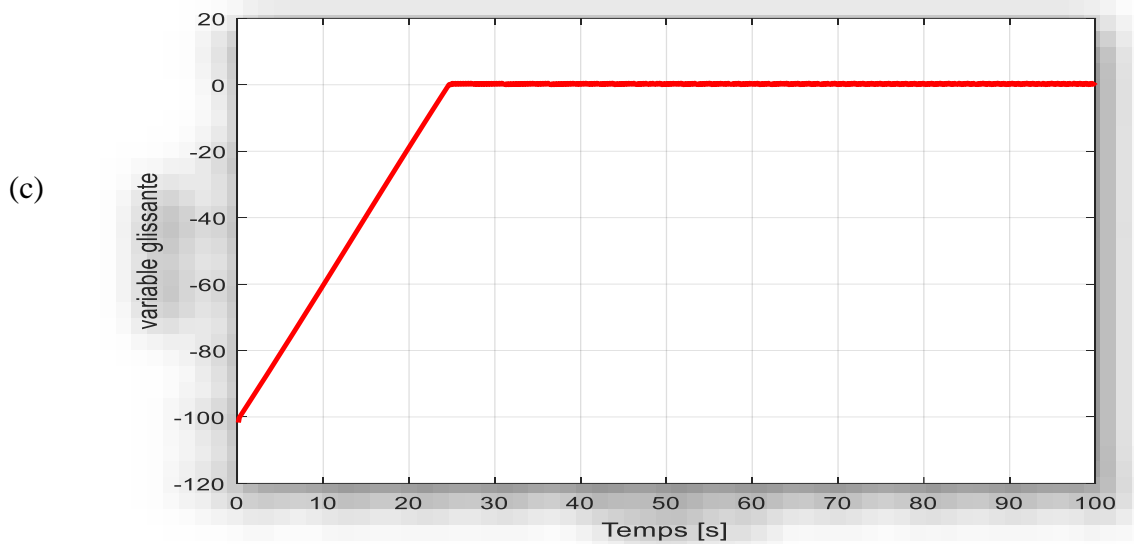
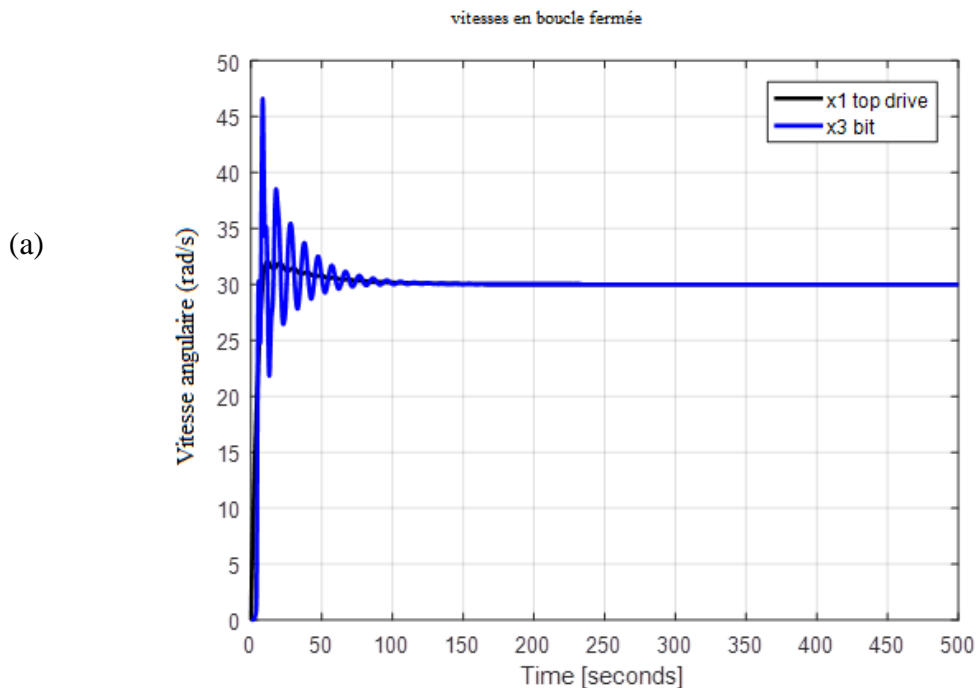


Figure IV. 3: Les réponses par l'utilisation du contrôle en mode glissant.

#### IV.3.1.2 Deuxième simulation :

Le broutement, également appelé bavardage, provoque une perte d'énergie et peut avoir un impact sur l'efficacité globale du système en empêchant la stabilisation précise de la vitesse souhaitée. Nous avons utilisé la fonction saturation plutôt que la fonction signe pour éviter ce phénomène. L'élimination du phénomène de broutement est la seule différence entre l'utilisation de la fonction signe et de la fonction de saturation, comme le montre la figure IV.4. La progression des vitesses angulaires est comparable à celle illustrée à la figure IV.3.a. Par conséquent, la fonction de saturation résout le problème de broutement.



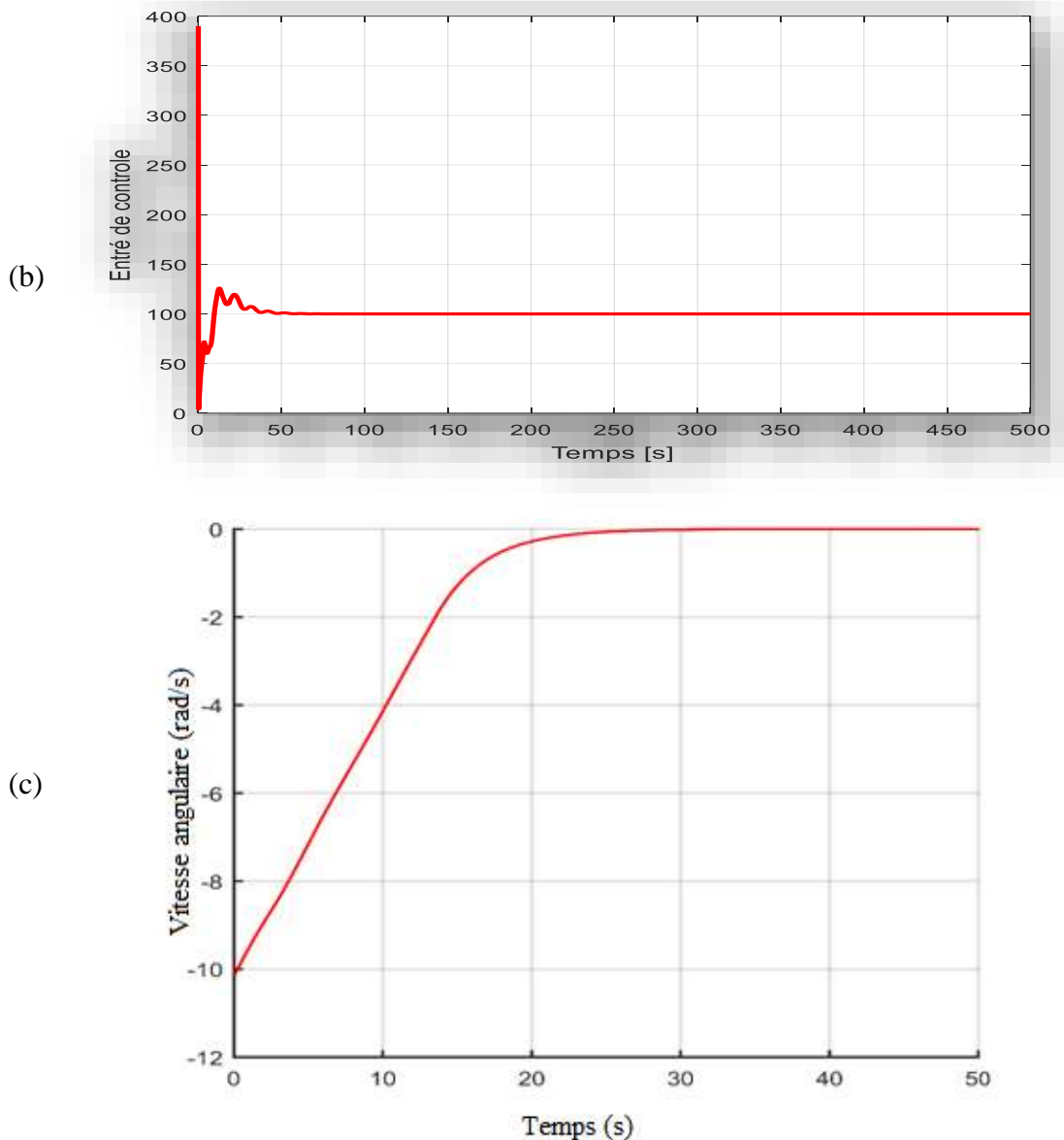


Figure IV. 4: Les réponses par l'utilisation du contrôle en mode glissant

#### IV.3.1.3 Troisième simulation :

Comme le montre la figure IV.5 nous avons réduit la valeur de  $K$  à 0,02 tout en fixant  $\lambda$  à 0,3 et  $\varphi$  à 2,5 afin d'améliorer les performances et le temps de réponse du système. Au cours des 50 premières secondes, les vitesses angulaires oscillent légèrement, puis se stabilisent sans dépasser la valeur de consigne  $Q_{ref}$  de 130 rad/s. Ainsi, les performances et le temps de réponse du système ont été améliorés grâce à ces paramètres.

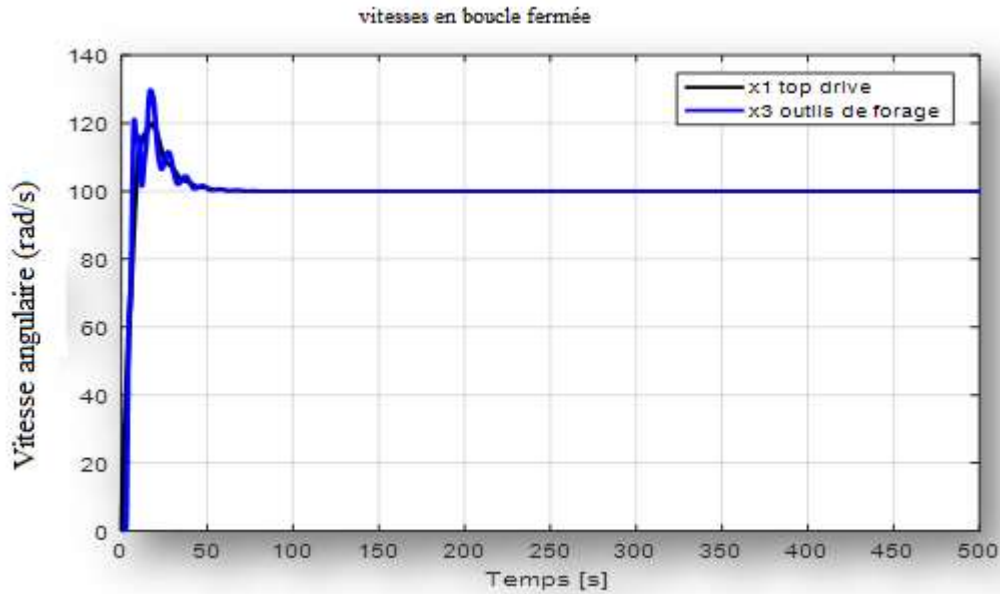


Figure IV. 5: Les réponses de la vitesse angulaire par l'utilisation du contrôle en mode glissant.

### IV.3.2. La fonction stribeck

#### IV.3.2.1 Première simulation :

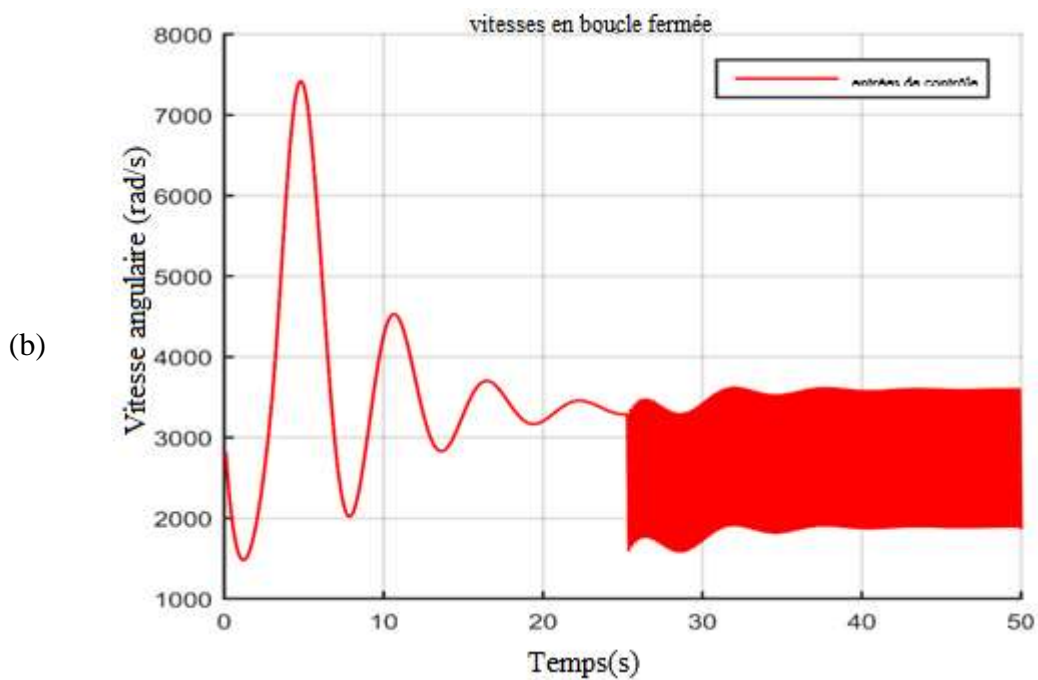
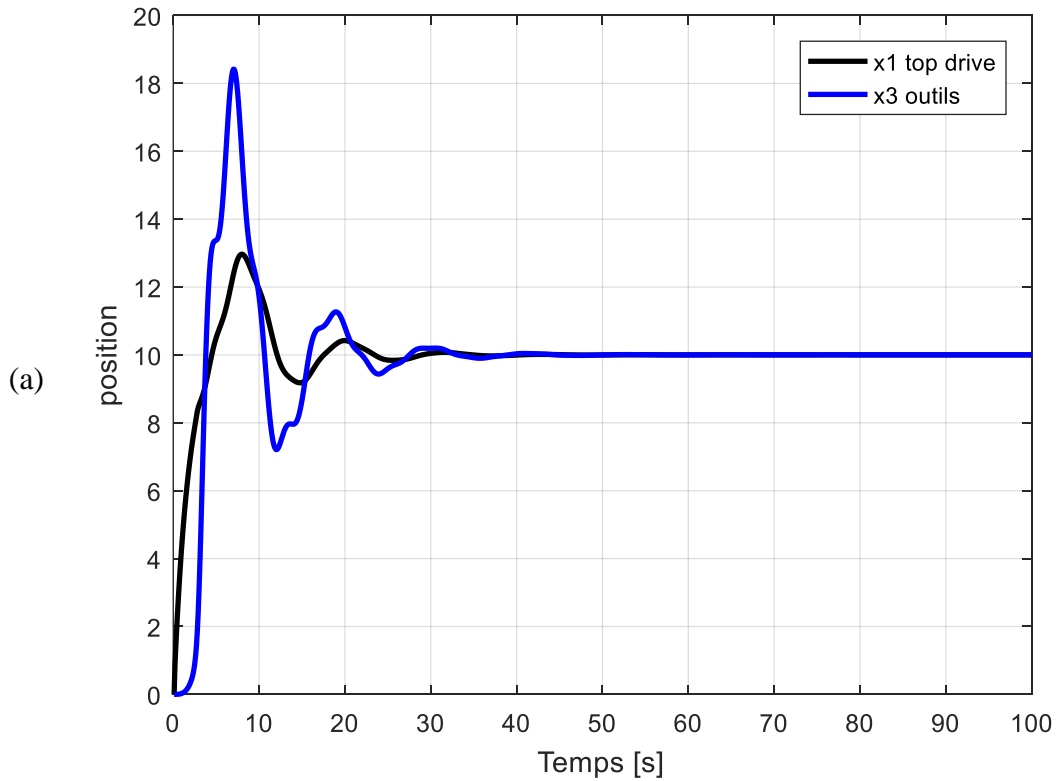
L'évolution des vitesses de rotation de l'outil et du top drive en boucle fermée est illustrée par les courbes bleues et noires, respectivement, à la figure IV.6.a. La figure IV.6.b utilise une couleur rouge pour montrer la commande, tandis que la figure IV.6.c utilise une courbe rouge pour montrer la surface de glissement. Les vitesses de rotation de l'outil et du top drive convergent rapidement vers la valeur de consigne sans dépassement, et la surface de glissement converge également vers zéro. Ces résultats indiquent que le système est bien contrôlé et qu'il fonctionne correctement.

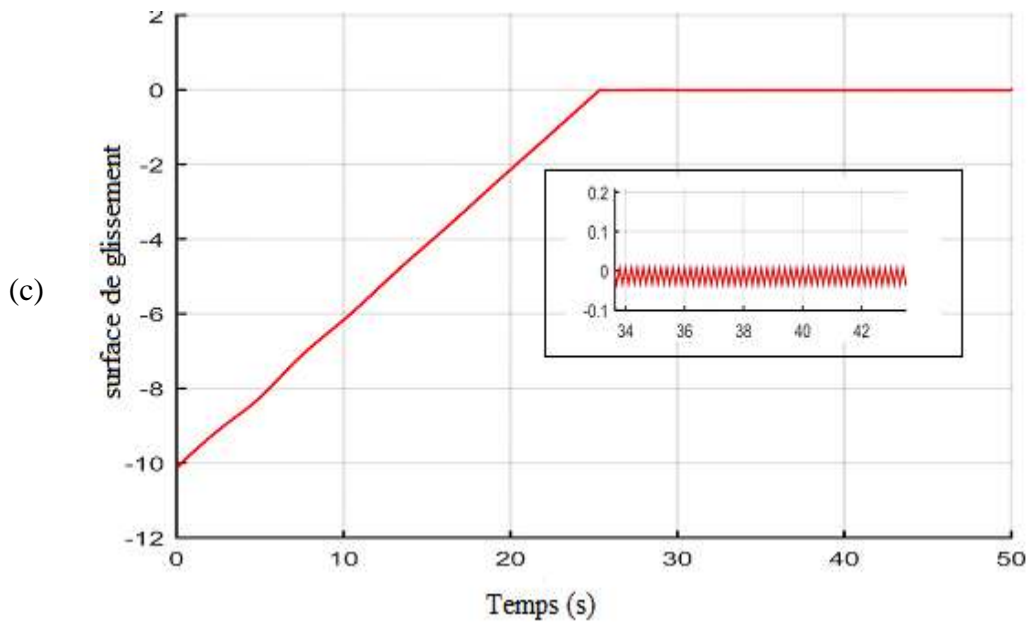
Lorsque  $\lambda$  est fixé à 0,3, K à 0,4 et Wob à 40 N, on observe :

- La présence d'une boucle de rétroaction dans le système a réduit le phénomène de stick-slip et stabilisé les vitesses de top drive et d'outil à 100 rad/s après une période de 30 s. Cela permet des performances plus précises et plus constantes au fil du temps.
- Dans un temps de 25 s, les oscillations de la courbe d'évolution de l'entrée de la commande ont été atténuées en réduisant la valeur de K à 0,02. Cependant, à cause de la discontinuité de la commande, l'utilisation de la fonction "signe" a entraîné un phénomène de broutement ou de bavardage. Cela pourrait avoir un impact sur la stabilité du système et l'efficacité

énergétique.

c) La surface de glissement a augmenté de  $-10 \text{ rad/s}$  à  $t=25 \text{ s}$  avant de s'annuler. Ce changement peut être le résultat d'une modification des conditions de fonctionnement du système ou d'une modification de la commande pour maintenir les vitesses à la valeur de consigne. La surface de glissement est un indicateur important de l'interaction entre les différentes parties du système et peut être utilisée pour évaluer les performances globales du système.





**Figure IV. 6:** Les réponses par l'utilisation du contrôle en mode glissant pour les paramètres  $\lambda=0.3$  ;  $K=0.4$  a) les vitesses angulaire b) les vitesses angulaire c) la surfaces de glissement

#### IV.3.2.2 Deuxième simulation :

Comme illustré dans la figure IV.7 il est noté dans ce paragraphe que la fonction de saturation sera utilisée au lieu de la fonction signe pour éviter le phénomène de bavardage.

Nous utiliserons les mêmes paramètres que dans la figure IV.6, avec la seule différence que nous avons ajouté  $\phi$  égal à 2,5, comme on peut le voir :

a) Après 50 s, les vitesses angulaires se stabilisent à la valeur de consigne  $Q_{ref}=100$  rad/s, et un dépassement initial de 20 % est observé à  $t=7$  s. La valeur A La consigne est atteinte de manière fiable et stable.

b) Après 40 s, les vitesses angulaires se stabilisent à la valeur de consigne  $Q_{ref}=100$  rad/s, et un dépassement initial de 20 % est observé à  $t=7$  s. La valeur A Lorsque la surface de glissement s'annule après 50 s, l'entrée de la commande se stabilise à 100 rad/s. Grâce au remplacement de la fonction signe par la fonction de saturation et à un bon choix du paramètre " $\phi$ ", le phénomène de bavardage a été évité.

c) Après 40 s, les vitesses angulaires se stabilisent à la valeur de consigne  $Q_{ref}=10$  rad/s, et un dépassement initial de 20 % est observé à  $t=7$  s. La valeur A Avec un temps de 40 s, l'annulation de la surface de glissement se produit plus lentement, mais cela a permis d'éliminer la discontinuité de la commande et de réduire le bruit.

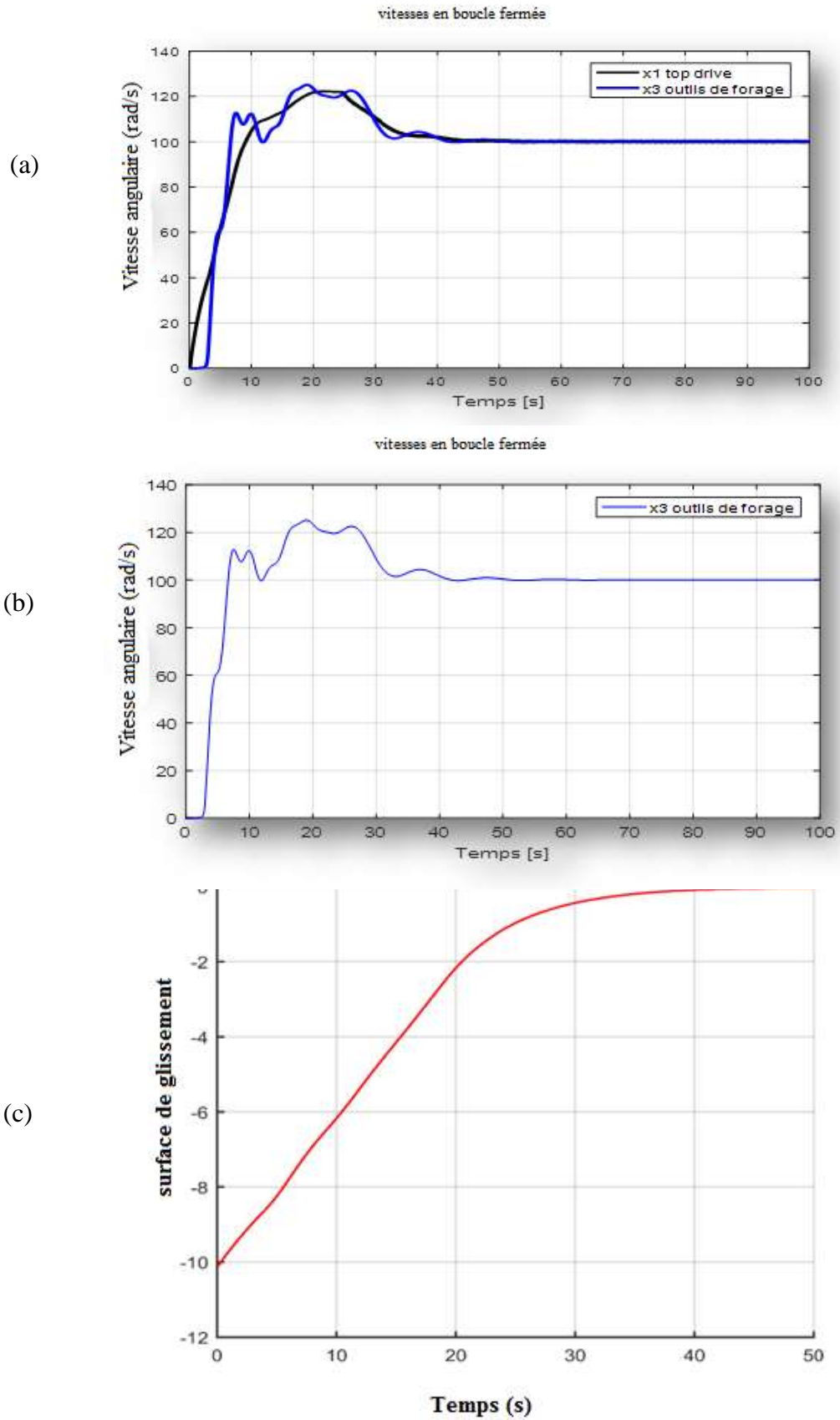


Figure IV. 7: Les réponses par l'utilisation du contrôle en mode glissant.

IV.3.2.3 Troisième simulation :

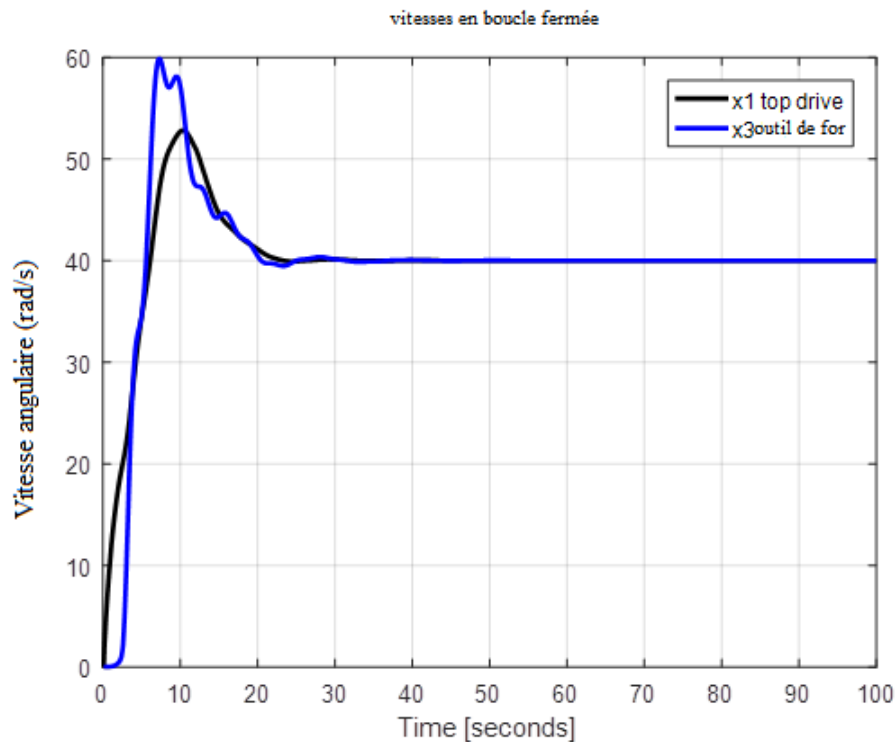


Figure IV. 8: Les réponses de la vitesse angulaire par l'utilisation du contrôle en mode glissant.

La figure IV.8 présente les courbes de :

Le paragraphe décrit les vitesses de rotation en boucle fermée de l'outil et de l'entraînement supérieur, représentées respectivement par les courbes bleue et noire, sous certains paramètres. Plus précisément, lorsque  $\lambda$  est égal à 0,3, K est égal à 0,001,  $\phi$  est égal à 2,5 et le poids sur le trépan ( $Wob$ ) est égal à 20 N, on observe que le temps de stabilisation des vitesses de rotation de l'outil et de l'entraînement supérieur passe à 30 s lorsque la valeur de K est réduite. De plus, le premier dépassement est diminué à 10% à  $t=7$  s.

Une étude comparative :

#### IV.4 Etude comparative

Le paragraphe compare les résultats de deux séries de chiffres. La première comparaison est entre la Fig. IV.5 et la Fig. IV.1, qui montre que les vitesses en boucle ouverte sont éloignées de l'entrée et se stabilisent à une valeur constante de 200 rad/s après 500 s, tandis que les vitesses en boucle fermée réussissent à éliminer la torsion vibrations en 20 s.

La deuxième comparaison est entre la Fig. IV.8 et la Fig. IV.2, où les simulations en



boucle ouverte (avec  $Wob = 20$  N) montrent un ralentissement ou un arrêt cyclique de l'outil, et les deux vitesses oscillent jusqu'à  $t = 500$ s, ce qui est très élevé et pourrait endommager le réservoir. Cependant, l'utilisation du contrôleur donne de bons résultats sans dépassement, et le temps de stabilisation est très acceptable à  $t = 30$  s.

### **IV.5 Conclusion :**

Ce chapitre traite de la réduction des vibrations de torsion dans un délai minimal en utilisant la commande en mode glissant. Pour ce faire, deux modèles de contact d'outil et de roche (généralisé, Stribeck) ont été utilisés en boucle ouverte pour montrer l'importance des vibrations de torsion. Ensuite, la commande en mode glissant a été appliquée à ces deux modèles de contact outil-roche, ce qui a permis de minimiser les vibrations en un temps de 40 ou 30 secondes pour le premier modèle et en un temps de 20 secondes pour le deuxième modèle, sans dépasser les limites. Ce chapitre démontre donc l'efficacité de la commande en mode glissant pour minimiser les vibrations de torsion dans les systèmes d'outil-roche.



# **Conclusion générale**

### **Conclusion générale :**

La conception d'un contrôleur avancé pour atténuer les vibrations de stick-slip dans les systèmes de forage rotatifs en Algérie est un enjeu crucial dans l'industrie du pétrole et du gaz. Les vibrations de torsion et le phénomène de stick-slip peuvent endommager les outils de forage et entraîner une baisse de la performance du système de forage. Pour résoudre ce problème, plusieurs méthodes de contrôle non linéaires ont été proposées. Dans ce mémoire, la commande par mode glissant a été choisie comme méthode de contrôle

En utilisant cette méthode, un contrôleur efficace a été développé pour éliminer les vibrations de torsion et stabiliser les vitesses de rotation à une valeur de référence souhaitée. Le modèle utilisé pour la modélisation du système a pris en compte les phénomènes pertinents du forage rotatif tout en gardant une complexité raisonnable pour l'analyse et le contrôle.

En conclusion, la conception d'un contrôleur avancé par mode glissant pour atténuer les vibrations de stick-slip dans les systèmes de forage rotatifs est une avancée importante pour l'industrie pétrolière et gazière en Algérie. Ce contrôleur offre une solution efficace pour améliorer la performance du système de forage tout en assurant la robustesse du système. Ce travail de recherche peut être poursuivi pour développer des méthodes encore plus avancées pour la suppression des vibrations de stick-slip dans les systèmes de forage. La mise en œuvre de ce contrôleur dans les systèmes de forage rotatifs en Algérie permettra d'améliorer la qualité et la sécurité des opérations de forage, réduire les coûts d'entretien et prolonger la durée de vie des outils de forage. Il peut également être adapté à d'autres applications dans le domaine industriel pour atténuer les vibrations et améliorer la performance des systèmes. En somme, la commande par mode glissant est une technique de contrôle non linéaire prometteuse pour résoudre les problèmes de vibrations dans les systèmes de forage rotatifs en Algérie, et cette étude contribue à l'avancement des connaissances dans ce domaine.



# **Bibliographies**

**Bibliographies :**

- [1]. Kessai, I.; Benammar, S.; Doghmane, M.Z.; Tee, K.F. Drill Bit Deformations in Rotatif Drilling Systems under Large-Amplitude Stick-Slip Vibrations. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 6523. <https://doi.org/10.3390/app10186523>
- [2]. Doghmane Mohamed Zinelabidine; Madjid, Kidouche, Decentralized Controller Robustness Improvement Using Longitudinal Overlapping Decomposition - Application to Web Winding System, *Electronics & Electrical Engineering* . **2018**, Vol. 24 Issue 5, p10-18. 9p.
- [3]. R. Riane, M. Kidouche, R. Illoul & M. Z. Doghmane (**2022**) Unknown Resistive Torque Estimation of a Rotatif Drilling System Based on Kalman Filter, *IETE Journal of Research*, 68:4, 2640-2651, DOI: [10.1080/03772063.2020.1724834](https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1724834)
- [4]. Mendil, C., Kidouche, M., Doghmane, M.Z. (**2021**). A Study of the Parametric Variations Influences on Stick-Slip Vibrations in Smart Rotatif Drilling Systems. In: Hatti, M. (eds) *Artificial Intelligence and Renewables Towards an Energy Transition. ICAIRES 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 174. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63846-7\\_67](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63846-7_67)
- [5]. Mendil, C., Kidouche, M., Doghmane, M.Z. (**2021**). Modeling of Hydrocarbons Rotatif Drilling Systems Under Torsional Vibrations: A Survey. In: Hatti, M. (eds) *Artificial Intelligence and Renewables Towards an Energy Transition. ICAIRES 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 174. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63846-7\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63846-7_24)
- [6]. C. Mendil, M. Kidouche and M. Z. Doghmane, "Automatic control of a heat exchanger in a nuclear power station: The classical and the fuzzy methods," **2019** International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), Algiers, Algeria, 2019, pp. 1-6, DOI: [10.1109/ICAEE47123.2019.9014661](https://doi.org/10.1109/ICAEE47123.2019.9014661)
- [7]. M. Z. Doghmane, M. Kidouche, H. Habbi, A. Bacetti and B. Bellahcene, "A new decomposition strategy approach applied for a multi-stage printing system control optimization," 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Boumerdes, Algeria, **2015**, pp. 1-6, DOI: [10.1109/INTEE.2015.7416751](https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416751)
- [8]. M. Z. Doghmane, Conception de commande décentralisée des systèmes complexes en utilisant les stratégies de décomposition et optimisation par BMI, Doctoral thesis, University M'hamed Bougara of Boumerdes, **2019**.
- [9]. M. Z. Doghmane, M. Kidouche & A. Ahriche (**2021**) Decentralized Overlapping Control Design with Application to Rotatif Drilling System, *IETE Journal of Research*, DOI: [10.1080/03772063.2021.1886602](https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1886602)

- [10]. M. Z. Doghmane, Optimal decentralized control design with overlapping structure, magister thesis, University M'hamed Bougara of Boumerdes, **2011**.
- [11]. Doghmane, M.Z., Kidouche, M., Eladj, S., Belahcene, B. (2021). Design of Optimal Decentralized Controller Using Overlapping Decomposition for Smart Building System. In: Hatti, M. (eds) Artificial Intelligence and Renewables Towards an Energy Transition. ICAIRES 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 174. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63846-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63846-7_16)
- [12]. Chafiaa Mendil , Madjid Kidouche , Mohamed Zinelabidine Doghmane, Hybrid sliding PID controller for torsional vibrations mitigation in rotatif drilling systems, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 22, No. 1, April **2021**, pp. 146~158
- [13]. Doghmane, M.Z., Belahcene, B., Kidouche, M. (2019). Application of Improved Artificial Neural Network Algorithm in Hydrocarbons' Reservoir Evaluation. In: Hatti, M. (eds) Renewable Energy for Smart and Sustainable Cities. ICAIRES 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 62. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04789-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04789-4_14)
- [14]. C. Mendil, M. Kidouche & M. Z. Doghmane (2021) Hybrid Backstepping Sliding Mode Controller for Stick–slip Vibrations Mitigation in Rotatif Drilling Systems, IETE Journal of Research, DOI: [10.1080/03772063.2021.1919217](https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1919217)
- [15]. AMGHAR Billal ; HEDID Abdelkader " Commande par Fuzzy Sliding Mode d'un variateur de vitesse hydrodynamique " Mémoire d'Ingéniorat Ecole Nationale Polytechnique2007.