

N°Ordre...../FHC/UMBB/2023

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université M'Hamed Bougara – Boumerdes**

**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

**Département Gisements Miniers et Pétroliers**



---

**Mémoire de Fin d'Etude**

**En vue de l'obtention du Diplôme**

**MASTER**

Présenté par

**Abderrahmane DAOUD**

**Aymen ZERARA**

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Forage des puits

---

**Développement d'un système intelligent pour la détection et l'atténuation  
du phénomène de stick-slip à l'aide des algorithmes d'apprentissage  
automatique**

---

Devant le jury composé de :

Mme. Nadjat AZIL	MAA	UMB-Boumerdes	Président
Mr. Zine El Abidine BOUBEKEUR	MAB	UMB-Boumerdes	Encadrant
Mr. Zakaria BELIMANE	MAB	UMB-Boumerdes	Examineur

**Année universitaire : 2022/2023**

## **Résumé**

La réussite d'un forage de puits de pétrole et/ou de gaz repose essentiellement sur le bon fonctionnement du train des tiges qui sont souvent sujettes à un phénomène de vibration appelé stick-slip. Ce phénomène entraîne de nombreux problèmes tels que l'usure de l'outil de forage, la détérioration des parois des puits et une réduction du taux de pénétration, entraînant ainsi une diminution des performances de forage et augmentation du temps non productif (NPT). Dans ce travail, nous avons développé un système intelligent visant à détecter automatiquement la présence du phénomène de stick-slip et à recommander la solution optimale pour atténuer son effet. Pour cela, plusieurs méthodes, notamment l'algorithme d'apprentissage automatique SVM et la méthode de SAX ont été utilisées. Ces approches nous ont permis de créer un système robuste qui utilise les données de surface pour soutenir l'équipe de forage. Les résultats obtenus en analysant les paramètres de forage tels que le poids sur le trépan (WOB) et la vitesse de rotation (RPM) à travers notre système, ont démontré que les techniques d'apprentissage automatique peuvent automatiser le processus de forage en temps réel, améliorant ainsi son efficacité et réduisant les effets néfastes liés au stick-slip.

*Mots clés* : Forage, stick-slip, apprentissage automatique, intelligence artificielle, paramètres de forage.

## **Abstract**

The success of oil and gas well drilling relies heavily on the proper functioning of the drill string. However, drill strings are constantly subjected to torsional vibration phenomenon known as stick-slip, which leads to various issues such as tool degradation, wellbore damage, and reduced penetration rate, significantly impacting drilling performance, particularly in terms of non-productive time (NPT). In this study, we have developed an intelligent system capable of automatically identifying the presence of stick-slip phenomenon and recommending optimal solutions to minimize its effects. To achieve this, we employed several methods, including the SVM machine learning algorithm and the SAX time series representation. These approaches facilitated the creation of a robust system that utilizes surface data to support the drilling team. The results obtained from analyzing drilling parameters such as Weight on Bit (WOB) and Revolutions Per Minute (RPM) using our system demonstrated that machine learning techniques can automate the real-time drilling process, thereby enhancing its efficiency.

*Keywords*: Drilling, stick-slip, machine learning, artificial intelligence, drilling parameters.

## الملخص:

يعتمد نجاح حفر آبار النفط و / أو الغاز بشكل أساسي على الأداء السليم لسلسلة الحفر التي غالبا ما تخضع لظاهرة اهتزاز تسمى الانزلاق اللاصق. تؤدي هذه الظاهرة إلى العديد من المشاكل مثل تآكل أداة الحفر، وتدهور جدران الآبار وانخفاض معدل الاختراق، مما يؤدي إلى انخفاض في أداء الحفر وزيادة في الوقت غير المنتج (NPT). في هذا العمل، قمنا بتطوير نظام ذكي يهدف إلى الكشف التلقائي عن وجود ظاهرة الانزلاق اللاصق والتوصية بالحل الأمثل للتخفيف من تأثيرها، لهذا تم استخدام عدة طرق، ولا سيما خوارزمية التعلم الآلي SVM وطريقة السلاسل الزمنية SAX. سمحت لنا هذه الأساليب بإنشاء نظام قوي يستخدم البيانات السطحية لدعم فريق الحفر، فقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال تحليل عوامل الحفر مثل الوزن (WOB) وسرعة دوران (RPM)، أن تقنيات التعلم الآلي يمكن التشغيل الآلي لعملية الحفر في الوقت الحقيقي، وبالتالي تحسين كفاءتها والحد من الآثار الضارة المتعلقة بالانزلاق اللاصق.

الكلمات المفتاحية: عوامل الحفر، اهتزازات، الانزلاق اللاصق، الذكاء الاصطناعي، التعلم الآلي.

## Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon dieu, **ALLAH**, le plus puissant et le miséricordieux, qui nous a donné la patience, la force et la foi pour mener à ce travail, ainsi que pour les défis que chaque jour qui nous ont permis d'accomplir ce modeste travail.

Nos remerciements les plus vifs et sincères vont à nos parents : **Mohamed DAOUD**, **Chahrazed BELKHEIR** et **Ahmed ZERARA** et **Dalila ALOUANE** pour leurs soutien permanent.

Ce travail a été rendu possible grâce au soutien, à la patience et à l'aide de notre encadrant Monsieur **Zine El Abidine BOUBEKEUR**. Nous le remercions tout particulièrement pour la confiance qu'il nous a accordé tout au long de ce mémoire, pour avoir suivi étape par étape le travail et était toujours à l'écoute. Nous sommes reconnaissants pour ses directives, ses remarques et ses suggestions ainsi que pour ses encouragements et sa disponibilité.

Nous tenons tout d'abord à remercier Mme **Nadjet AZRIL** pour les conseils qu'elle nous a prodigué pendant cette période, ainsi que pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à Mr **Zakaria BELIMANE** pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier également Madame **Chafia ALOUANE**, MAB à l'ENP-ALGER pour son soutien, ses conseils précieux et ses directives tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciements vont également à l'ensemble du personnel du département de Gisement Minier et Pétrolier, ainsi qu'à l'ensemble du personnel du département de Forage et au simulateur de l'Institut Algérien du Pétrole IAP et la division de production du gisement TFT.

Enfin, nous tenons à remercier vivement tous ceux qui ont participé de loin ou de près à l'élaboration de ce mémoire.

Nous terminerons en pensant, sans les nommer, à tous ceux que nous avons croisé sur notre chemin et qui ont contribué à rendre possible notre parcours.

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A la personne dont la présence dans ce jour spécial a été précieuse, à la femme de ma vie et mon exemple éternel, à la femme qui m'a toujours soutenu, forgé et protégé, à ma source de bonheur. J'espère avoir été à la hauteur de tes attentes. Tu as semé une graine de sagesse qui germe dans mon âme. Ce lien n'est pas question de sang mais celui qui te tient la main lorsque tu en as le plus besoin. En la mémoire de *ma grand-mère* disparue trop tôt, repose en paix.

A la personne qui peut remplacer tout le monde mais ne pourra jamais être remplacée, à la lumière de ma vie. Les mots ne suffisent pas pour exprimer ma gratitude, mon amour envers celle qui s'est sacrifiée pour me voir réussir et m'a encouragé tout au long de mes années d'études, *ma mère*, ma source d'efforts. Merci.

A mon *très cher père*, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien-être.

A mes chers oncles *Ali* et *Khaldi Brahim*, mes confidents, vous avez été toujours présents à mes côtés pour me reconforter lorsque c'était nécessaire. Je vous aime.

A mes chères tantes, *Fatima* et *Nadia*, je vous 'aime.

A ma très chère grand-mère : *Khadija MISSOUM*.

A mes chers frères : *Abdellah* et *Abdelmadjid*.

A mes très chères sœurs qui m'aiment sans intérêt : *Nour El Houda, Bouchra*.

A mes cousins et mes cousines, et en particulier à mes très chers : *Mohamed, Adrienne, Abdessamed, Ceryne, Nawfel*.

A mon binôme *Aymen ZERARA* pour sa patience ainsi qu'à mes très chers amis qui m'ont soutenu et encouragé au long de mon travail : *Adil, Younes, Bilal, Habib, Asmaa* et *Fatiha*.

A tous ceux qui m'ont sorti de l'ignorance et m'ont appris un mot, une phrase, une idée et une leçon dans ma vie.

A tous mes enseignants et en particulier : *Monsieur Z. BOUBEKEUR, Madame N. AZRIL* et *Monsieur Z. BELIMANE*.

*Abderrahmane DAOUD*

## Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

### *A MA TRESCHERE MERE*

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien-être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices.

### *A MON TRES CHER PERE*

Tu as été toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection. Que DIEU le comble de santé, de bonheur et de longue vie.

A mes frères, **Haythem** et **Loay**. Que DIEU les protège et leur accorde de bonheur et de réussite.

A la mémoire de mon cousin **Alla Din ALOUANE** qui nous a quitté trop tôt. Que DIEU lui accorde la paix éternelle.

A toute la famille

A toute la famille **ZERARA** et **ALOUANE** pour leurs encouragements.

A ma tante **Chafia ALOUANE** pour ses précieux conseils et ses directives tout au long de ce travail. Je vous suis profondément reconnaissant.

A mon cher binôme **Abderrahmane DAOUD** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce travail.

A mes chers amis : **Ghoulam AMRANI**, **Aymen HACINI**, **Mehdi KHAMKHAM**, **Achref AYACHI**, **Raid BOURKAIB Rafik LAKHZOUM** et **Abd Elmouine TRABELSI**.

A tous les enseignants qui m'ont accompagné tout au long de mon cursus.

*Aymen ZERARA*

## Liste des figures

Figure I. 1 : Installation offshore et onshore en Algérie.....	3
Figure I. 2 : Système de forage.....	6
Figure I. 3 : Equipements de levage [8] .....	7
Figure I. 4 : Mat de l'appareil de forage.....	7
Figure I. 5 : Le treuil de forage.....	8
Figure I. 6 : Tambour de manœuvre.....	9
Figure I. 7 : les freins mécaniques.....	9
Figure I. 8 : Le système de mouflage .....	10
Figure I. 9 : Le moufle fixe. ....	11
Figure I. 10 : le moufle mobile.....	11
Figure I. 11 : Tige d'entraînement.....	12
Figure I. 12 : Table de rotation.....	13
Figure I. 13 : Tête d'injection.....	13
Figure I. 14 : Circulation de la boue.....	14
Figure I. 15 : Groupe électrogène.....	15
Figure I. 16 : Bloc obturateur du puits. ....	16
Figure I. 17 : (a)Train de tiges, (b) Tool joint. ....	17
Figure I. 18 : Assemblage du fond. ....	17
Figure I. 19 : Figure outils tricônes. ....	18
Figure I. 20 : Les outils monobloc ou à diamants. ....	19
Figure I. 21 : Types des Stabilisateurs.....	20
Figure I. 22 : Géométrie D'un PDM .....	21
Figure I. 23 : Image représente les Composants du l'outil MWD.....	22
Figure I. 24 : Image représente un outil LWD. ....	23
Figure II. 1 : les modes de vibration de garniture de forage.....	27
Figure II. 2 : Vibration axiale [25]. ....	28
Figure II. 3 : Vibration latérale[25]. ....	29
Figure II. 4 : Vibration de torsion [25]. ....	30
Figure II. 5 : Enregistrement des RPM, ROP et WOB basé sur la profondeur d'un puit vertical foré par trépan du type PDC. ....	31
Figure II. 6 : L'état de l'outil ayant subi des vibrations sévères. ....	32
Figure II. 7 : Le phénomène du Stick-Slip d'une tige de forage. ....	32
Figure II. 8 : (a) Rupture d'un outil, (b) Dents d'outil PDC endommagé et (c) Tige ayant subi des vibrations Sévères.....	33
Figure II. 9 : Plages des vibrations en fonction des paramètres de forage. ....	34
Figure II. 10 : Réamère à rouleaux (Roller Reamers) [37].....	37
Figure II. 11 : Angle de coupe arrière (Back-rake Angle) [38]. ....	38
Figure II. 12 : Limiteurs de profondeur de coupe (Depth of cut limiters).....	38
Figure II. 13 : (1) Outil rouleur avec embouts insérés. (2 ) Outil PDC. ....	39
Figure II. 14: Anti Stick-slip Tools ASST.....	40
Figure II. 15 : Etat des dents de PDC (a) sans ASST et (b) avec ASST. ....	40
Figure II. 16 : Evolution des paramètres de forage avec et sans ASST.....	41
Figure III. 1 : Principe de SAX. ....	44

Figure III. 2 : Une série temporelle (en bleu) représentée par PAA (en rouge) [43].....	46
Figure III. 3 : La discrétisation de la représentation PAA d'une série temporelle [44]. .....	47
Figure III. 4 : Les différentes étapes de SAX [42]......	47
Figure III. 5 : Importation des données de séries temporelles [45]. .....	48
Figure III. 6 : Normalisation des données de séries temporelles [46]. .....	49
Figure III. 7 : Transformation de la série temporelle en une représentation PAA [46].....	50
Figure III. 8 : Transformation de la représentation PAA en chaîne symbolique [46]. .....	50
Figure III. 9 : Illustration de la classification supervisée [48]......	55
Figure III. 10 : Exemple de concept des deux types d'apprentissage [49]. .....	55
Figure III. 11 : Infinité d'hyperplans séparent les deux classes : points négatifs et points positive [51]. .....	57
Figure III. 12 : Arbre de décision. Inspiré de [53].....	59
Figure III. 13 : Représentation de la fonction d'entropie dans le cas d'une classification binaire [54]	62
Figure IV. 1 : Représentation de la variation de l'indice SSI.....	68
Figure IV. 2 : Flux de travail de représentation d'une série temporelle du WOB.....	69
Figure IV. 3 : Evolution du paramètre correspond à chaque chaîne symbolique.....	72
Figure IV. 4 : Procédure suivie dans cette étude pour détecter et éliminer le stick-slip.....	74
Figure IV. 5 : Exemple d'une détection et atténuation d'événement stick slip. ....	78



## Liste des tableaux

Tableau I. 1 : les avantages et les inconvénients de forage rotary.....	5
Tableau III. 1 : Echantillon représentant une série temporelle.....	51
Tableau III. 2 : La série après normalisation.....	52
Tableau III. 3 : La série après application de PAA. ....	53
Tableau III. 4 : la série temporelle après application de l’algorithme SAX. ....	53
Tableau IV. 1 : Description de la section de la section intermédiaire. ....	65
Tableau IV. 2 : Les plages des paramètres. ....	66
Tableau IV. 3 : Échantillon de données générées pour l’apprentissage du classifieur SVM. ....	70
Tableau IV. 4 : Solutions recommandées par le système pour éliminer le stick-slip selon l’évolution de RPM et WOB. ....	75

## Liste des abréviations

**WOB** : Weight On Bit (Le poids sur l'outil)

**TOB** : Torque On Bit (Le couple sur l'outil)

**ROP** : Rate Of Penetration (le taux de pénétration)

**NPT** : Non Productive Time (le temps non productif)

**PDC** : Polycrystalline Diamond Compact

**BHA** : Bottom Hole Assembly (assemblage du fond)

**MWD** : Measurement While Drilling (les mesures instantanées durant le forage)

**RPM** : Revolution Per Minute (la vitesse de rotation)

**BOP**: Blow Out Preventer

**TJ**: Tool-Joint

**HWDP**: Heavy Weight Drill Pipe (Tiges lourde)

**API**: American Petroleum Institute

**PDM**: Positive Displacement Motor

**LWD**: Logging While Drilling (Logging pendant le forage)

**SPM**: Strokes Per Minute (coup par minute)

**ASST**: Anti Stick-slip Tools

**SAX** : Symbolic Aggregation Approximation (méthode d'approximation par agrégats symboliques)

**PAA**: Piecewise Aggregate Approximation

**ML** : Machine Learning

**SVM** : Séparateur à Vaste Marge

**SSI** : **Stick-slip** index

# Sommaires

**Remerciements**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des abréviations**

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Principe et description d'un système de forage</b> .....	3
Introduction .....	3
1. Historique de forage.....	3
2. Définition de forage .....	4
3. Définition de forage pétrolier.....	4
4. Principe de forage rotary .....	5
5. Equipements de forage (appareils de forage).....	6
5.1. Installation de forage .....	6
5.1.1. Les équipements de levage.....	6
5.1.2. Equipements de rotation .....	12
5.1.3. Equipements de pompage et de circulation.....	14
5.1.4. Equipements de production de l'énergie .....	14
5.1.5. Poste de contrôle .....	15
5.1.6. Equipement de sécurité (Blow Out Preventer).....	15
5.2. La garniture.....	16
5.2.1. Train des tiges .....	16
5.2.2. Assemblage du fond (Bottom Hole Assembly).....	17
5.2.3. Coulisses de battage .....	20
5.3. Equipements spécifiques au forage .....	21
5.3.1. Moteurs volumétrique (hydraulique ou à déplacements positifs) PDM.....	21
5.3.2. Equipements de mesure.....	21
6. Les paramètres de forage .....	23
6.1. Les paramètres mécaniques .....	23
6.1.1. Le poids sur l'outil WOB .....	23
6.1.2. La vitesse de rotation RPM .....	24
6.1.3. Le couple exercé sur l'outil TOB .....	24
6.1.4. La vitesse d'avancement ROP.....	24

6.2.	Les paramètres hydrauliques .....	24
6.2.1.	Type de boue de forage (fluide de forage) .....	24
6.2.2.	Débit (Flow in) .....	25
6.2.3.	Pression hydraulique .....	25
6.2.4.	Densité de boue .....	25
	Conclusion.....	25
	<b>Chapitre II : Vibration des garnitures de forage</b> .....	26
	Introduction .....	26
1.	Les vibrations de trains de tiges.....	26
2.	Les modes de vibrations des garnitures de forage .....	27
2.1.	Vibrations axiales ou longitudinales.....	27
2.2.	Vibrations latérales .....	28
2.3.	Vibration de torsion .....	29
3.	Phénomène de stick-slip .....	30
3.1.	Détection de vibration de Stick-Slip.....	33
3.1.1.	À la surface.....	33
3.1.2.	Fond de trou .....	33
3.1.3.	Preuve après exécution.....	34
3.2.	Paramètres affectant les vibrations de torsion .....	34
3.2.1.	Effet des paramètres de forage .....	34
3.2.2.	Effet de type de l'outil.....	35
3.2.3.	Effet du puits .....	35
4.	Conséquences des vibrations .....	35
4.1.	Endommagement des outils de forage.....	35
4.2.	Défaillance des équipements de fond .....	35
4.3.	Augmentation du temps non productif .....	35
5.	Mesure des vibrations en cours de forage.....	35
6.	Gestion des vibrations en temps réel .....	36
7.	Atténuation du Stick & Slip.....	36
7.1.	Les méthodes passives.....	36
7.1.1.	L'optimisation de l'assemblage de fond (BHA) .....	36
7.1.2.	Le choix du trépan.....	37
7.1.3.	L'utilisation des équipements de fond. ....	39

7.2.	Les méthodes actives .....	41
7.2.1.	Paramètres de forages.....	41
7.2.2.	Nettoyage du puits.....	42
7.2.3.	Relever hors du fond (Pick up off bottom) .....	42
7.2.4.	La lubrification de la boue.....	42
	Conclusion.....	42
<b>Chapitre III : Représentation des séries temporelles et apprentissage automatique</b>		
<b>_____ Une revue des algorithmes et leurs implémentations en python.....</b>		
	Introduction .....	44
1.	La méthode d'approximation par agrégats symboliques (SAX) .....	44
1.1.	Principe de l'algorithme .....	44
1.2.	Normalisation .....	45
1.3.	Algorithme PAA (Piecewise Aggregate Approximation).....	45
1.4.	Comment obtenir la représentation en SAX.....	46
1.5.	Implémentations de la méthode SAX en python .....	48
1.5.1.	Importation des données de séries temporelles .....	48
1.5.2.	Normalisation .....	48
1.5.3.	Transformation de la série temporelle en une représentation PAA.....	49
1.5.4.	Transformation de la représentation PAA en une chaîne symbolique .....	50
1.6.	Exemple d'application.....	51
2.	L'apprentissage automatique .....	53
2.1.	Définition.....	53
2.2.	Types d'apprentissage automatique .....	54
2.2.1.	Apprentissage supervisé.....	54
2.2.2.	Apprentissage non supervisé.....	55
3.	Les algorithmes d'apprentissage supervisé.....	55
3.1.	Les Algorithmes de classification.....	56
3.1.1.	Les machines à vecteurs support SVM .....	56
3.1.2.	La prédiction avec SVM .....	56
3.1.3.	Implémentation de SVM en Python .....	58
3.2.	L'arbre de décision .....	59
3.2.1.	Définition .....	59
3.2.2.	Les avantages et les inconvénients des arbres de décision.....	60

3.2.3.	Les principaux composants d'un arbre de décision .....	60
3.3.	Entropie et gain d'informations .....	61
3.3.1.	Le concept d'entropie .....	61
3.3.2.	Cas de deux classes .....	61
3.3.3.	Gain d'informations .....	62
3.3.4.	Rapport de gain .....	62
3.3.5.	Indice de Gini .....	62
3.4.	Algorithmes d'induction d'arbres de décision.....	63
3.4.1.	Algorithme ID3 (Itérative Dichotomiser 3) .....	63
3.4.2.	Algorithme C4.5 .....	63
3.4.3.	Algorithme CART .....	64
3.5.	Élagage des arbres .....	64
Conclusion.....		64
<b>Chapitre IV : Élaboration d'un système intelligent pour la détection et l'atténuation du phénomène stick-slip.</b> .....		65
Introduction .....		65
1.	Description et traitement des données .....	65
2.	Détection du phénomène stick-slip en utilisant l'indice SSI .....	66
3.	Détection automatique de l'évolution du WOB et RPM pendant un évènement du stick-slip .....	68
3.1.	Représentation des séries temporelles par la méthode SAX .....	68
3.2.	Classification des représentations des séries temporelles par l'algorithme SVM... ..	70
3.2.1.	Génération des données d'apprentissage.....	70
3.2.2.	Application du SVM pour la classification des représentations SAX .....	73
4.	Les solutions recommandées par le système pour éliminer le stick slip suivant l'évolution de WOB et RPM .....	74
5.	Expériences numériques .....	77
Conclusion.....		79
<b>Conclusions générales</b> .....		80
<b>Perspectives</b> .....		82
<b>Références bibliographiques</b> .....		83
<b>Annexe 1</b>		
<b>Annexe 2</b>		
<b>Annexe 3</b>		

## **Introduction générale**

Le forage qui consiste à creuser un trou, généralement vertical, de diamètre centimétrique à décimétrique, est une opération essentielle dans l'industrie pétrolière. Cette dernière a connu ces dernières décennies une recherche intensive visant à réduire le coût et à améliorer les performances globales du forage. L'amélioration des performances de forage est essentielle pour optimiser les coûts et garantir le succès de processus de forage et de l'extraction du pétrole et/ou du gaz. Des recherches d'optimisation ont permis d'augmenter l'efficacité des opérations de forage, réduisant ainsi les délais et les coûts associés. En outre la sécurité opérationnelle est devenue une priorité absolue visant à prévenir les incidents indispensables pour garantir le succès des projets, car le perfectionnement des opérations de forage représente un enjeu économique crucial.

En Algérie, le coût estimé par puits varie entre 8 et 15 millions de dollars selon les chefs de projet de Sonatrach. Ce coût a connu une augmentation significative. Cette hausse est principalement attribuée à la survenue de divers problèmes lors des opérations de forage, entraînant une augmentation du temps non productif et une diminution du taux d'avancement. Parmi ces problèmes, les vibrations qui jouent un rôle majeur lors du processus. Pendant le forage rotatif, plusieurs modes de vibrations, tels que les vibrations latérales, axiales et de torsion, peuvent se produire simultanément. Les vibrations de torsion, en particulier celles du stick-slip, qui résultent du frottement non linéaire entre l'outil et la roche, sont les plus violentes et peuvent avoir des conséquences néfastes, telles qu'une usure excessive de l'outil, une réduction de l'efficacité de coupe et des dommages aux équipements.

En outre, la compréhension et la gestion des vibrations de torsion sont essentielles pour améliorer l'efficacité du forage, réduire les coûts et assurer des opérations sûres. La recherche se concentre sur la détection et la modélisation de ce phénomène complexe, qui implique un grand nombre de variables et de paramètres, ainsi que sur l'atténuation de ces vibrations en utilisant des méthodes avancées telles que l'apprentissage automatique et l'analyse des données de forage.

Dans ce contexte-là, ce travail a été réalisé. Il a comme objectif de développer un système intelligent capable de détecter la présence des vibrations de torsion en se basant sur les données de forage, et de recommander des ajustements des paramètres de forage pour atténuer le phénomène du stick-slip. Pour cela, les algorithmes d'apprentissage automatique tels que les machines à vecteurs support (SVM) et la méthode d'approximation par agrégats symboliques (SAX) ont été appliqués. Notre méthodologie consiste d'abord à détecter la présence du stick-slip, puis à convertir une série temporelle des paramètres de forage en une chaîne symbolique à l'aide de la méthode SAX. Cette chaîne symbolique est ensuite traduite par un classificateur SVM pour reconnaître l'évolution des paramètres de forage. En se basant sur cette évolution, le système intelligent recommande au foreur des ajustements des paramètres de forage afin d'atténuer le phénomène du stick-slip.

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres dont :

- Le premier chapitre du manuscrit est consacré à une présentation générale du concept fondamental du forage, en détaillant les composants essentiels de l'ensemble de forage qui se subdivisent en équipements de surface et équipements de fond. De plus, il examine les paramètres de forage qui exercent une influence sur les performances du processus de forage, ainsi que leurs différentes catégories ;
- Le second chapitre présente les modes de vibration de la garniture de forage, en mettant en évidence les trois modes existants. Il présente également le phénomène principal étudié, le "stick & slip", et examine sa détection à la fois en surface et au fond du puits. Les paramètres influençant les vibrations de torsion, en particulier le stick-slip, sont également définis comme l'objectif principal de ce travail. Les conséquences des vibrations sur l'assemblage de fond et l'outil sont analysées, ainsi que les méthodes de mesure de ces vibrations pendant le forage. Enfin, la procédure de gestion en temps réel des vibrations et les méthodes d'atténuation de ce phénomène sont abordées.
- Le troisième chapitre présente une revue détaillée des algorithmes d'apprentissage automatique utilisés dans le cadre de notre étude. Cette section met en évidence les éléments fondamentaux, les étapes clés, ainsi que les implémentations en Python de ces algorithmes. Les méthodes d'apprentissage automatique que nous avons utilisées comprenant les machines à vecteurs de support (SVM), la méthode d'approximation par agrégats symboliques (SAX) et les arbres de décision. Ces techniques ont été choisies spécifiquement pour recommander des ajustements visant à détecter et atténuer le phénomène du stick-slip. Explorons en détail chaque algorithme, en examinant leur fonctionnement, leurs avantages et leurs limitations. De plus, nous discuterons de leur mise en œuvre pratique en utilisant le langage de programmation Python.
- Le quatrième chapitre est consacré au développement d'un système intelligent visant à détecter et à atténuer le phénomène du stick-slip.

Enfin, le manuscrit se termine par la présentation de conclusions générales et perspectives qu'ouvre ce travail.



## Chapitre I : Principe et description d'un système de forage

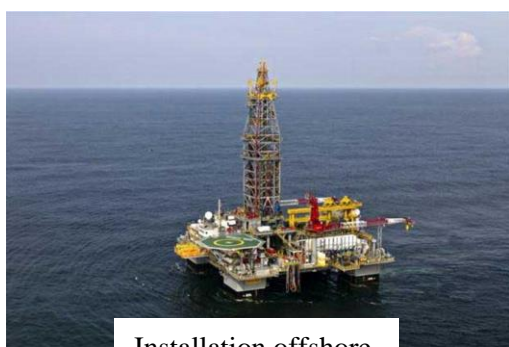
### Introduction

La prospection et l'exploration pétrolière ou gazière consistent, en premier lieu, à la recherche des gisements d'hydrocarbures dans des milieux de plus en plus profonds conduisant, par la suite, au processus de forage pour atteindre les réservoirs d'hydrocarbures et extraire la matière. On distingue l'exploration (Figure I.1) en mer (offshore) ou sur terre (onshore).

L'exploration des hydrocarbures exige de connecter leurs réservoirs à la surface à l'aide des tubes reliés à des systèmes de pompage et de circulation. La production des hydrocarbures passe par le fonctionnement d'un processus de forage dont le plus répandu dans l'industrie pétrolière est le forage rotary vu ces avantages et qualités.

La progression du forage nécessite la circulation continue et en boucle fermée d'un fluide appelé boue de forage dont l'un des objectifs consiste à évacuer les déblais ou les copeaux générés, au cours de forage, vers la surface. Cela rend graduel le forage durant lequel plusieurs phases, séparées par la remontée à la surface de la garniture, sont nécessaires. Ces étapes ont pour but de favoriser la maintenance du processus et d'effectuer le tubage et la cimentation de la partie forée. Lorsque les poches contenant les hydrocarbures sont atteintes, les oléoducs ou les gazoducs sont installés afin d'acheminer le pétrole ou le gaz vers la surface [1].

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur le forage pétrolier tout en expliquant, brièvement, le principe de forage rotary, les différents équipements utilisés et les paramètres de forage pétrolier.



Installation offshore



Installation onshore

Figure I. 1 : Installation offshore et onshore en Algérie.

### 1. Historique de forage

Avant plusieurs décennies, les puits ont été creusés pour exploiter de l'eau, pas du pétrole ou du gaz. En fait, les foreurs ont été vraiment ennuyés lorsqu'ils ont trouvé accidentellement du pétrole ce qui pollueait l'eau. Les premiers puits ont été creusés pour rechercher de l'eau potable, pouvant être utilisée pour le lavage et l'irrigation, et pour rechercher de la saumure (l'eau salée), dont le but est d'extraire du sel. Ce n'est qu'au 19<sup>ème</sup> siècle que les

forages d'exploration pétrolière se sont développés pour répondre aux besoins croissants en produits pétroliers, nés de l'industrialisation.

Le premier forage pétrolier, à une profondeur de vingt-trois mètres (23 m), a été effectué le 27 Août 1859 par le colonel E.L. Drake près de Titusville en Pennsylvanie (U.S.A). La seule technique connue pour le forage à cette époque-là, s'appelle « *le battage* » dont il employa le système de forage par battage au câble qui utilise, pour attaquer le terrain, l'impact d'un lourd trépan suspendu au bout d'un câble qui lui transmet, depuis la surface, un mouvement alternatif créé par un balancier. En 1901, J.F.LUCAS a foré au moyen d'un appareil de forage rotatif le premier puits dans le champ de Spindletop près de Beaumont (Texas). Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, Anthony Francis Lucas ingénieur en génie pétrolier démontra au monde l'efficacité du forage rotatif [2].

Une grande évolution afin de résoudre les nombreux problèmes rencontrés lors du forage en utilisant la combinaison d'un outil rotatif et l'injection continue de boue. Depuis ce jour, cette technique est universellement utilisée et a profité des améliorations apportées par le progrès technique [3].

## 2. Définition de forage

On appelle forage l'ensemble des opérations permettant le creuser de puits, généralement verticaux. L'utilisation principale des forages est la recherche et l'exploitation des gisements de pétrole ou de gaz naturel. Les autres utilisations, qui sont nombreuses, comprennent notamment [4].

- Les forages géologiques ou géophysiques pour la recherche des gisements de minerais ;
- Les forages destinés à la recherche des nappes d'eau profondes, au drainage du gaz ou de l'eau dans les exploitations minières ;
- Les forages permettant l'injection de gaz dans des formations poreuses et perméables, pour réaliser des stockages souterrains ;
- Les forages réalisés dans des dômes de sel, agrandis ensuite par injection d'eau douce et permettant le stockage de gaz liquéfiés comme le propane.

## 3. Définition de forage pétrolier

On appelle "forage pétrolier" l'ensemble des opérations permettant d'atteindre les roches poreuses et perméables du sous-sol, susceptibles de contenir des hydrocarbures fluides (liquides ou gazeux). L'implantation d'un forage pétrolier est décidée à la suite des études géologiques et géophysiques effectuées sur un bassin sédimentaire. Ceci nous permet de nous faire une idée de la constitution de sous-sol et des possibilités de gisements. L'opération de forage peut alors confirmer les hypothèses faites et mettre en évidence la nature des fluides contenus dans les roches [3, 4].

Le procédé essentiel de *l'exploration* et de *l'exploitation* des gisements pétrolifères reste le forage rotatif qui permet d'atteindre de grandes profondeurs dans de bonnes conditions techniques et de sécurité.

Le forage rotary est une technique qui assure l'extraction de pétrole et autres champs (gaz et eau).

#### 4. Principe de forage rotary

La technique du forage rotary consiste à mettre en rotation, au fond du trou, un outil (appelé trépan) sur lequel on applique une poussée ou une force orientée dans la direction d'avancement de l'outil. Le trépan permet de détruire la roche sous l'effet du poids et de la rotation. La rotation est générée depuis la surface par la table de rotation et transmise jusqu'au fond du puits (pétrole ou gaz) par l'intermédiaire des trains de tiges qui permet de creuser un trou de rayon égal à celui de l'outil. Le poids est assuré par un ensemble de tiges lourdes et creuses, assemblées en un train, qui achemine sous pression les boues de forage. Celles-ci refroidissent l'outil et assurent le déblaiement du trou. L'avantage de cette technique est de pouvoir injecter en continu un fluide au niveau de l'outil destructif de la formation pour emporter les débris hors du trou grâce au courant ascensionnel de ce fluide vers la surface cette technique est inventée par M.FAUVELLE en 1845 [5]. Autour des parois du forage, des tubes sont descendus et du ciment est injecté afin de garantir la tenue, à long terme, des parois du puits, les préserver, et les protéger contre la corrosion. Cela assure aussi la protection des nappes d'eau souterraines et leur isolation thermique [6]

Le forage rotary joue un rôle primordial dans l'ingénierie de forage à cause de son utilisation la plus vaste. Il présente, comme toutes techniques de forage, des avantages et des inconvénients qui sont groupés dans le *tableau I.1*.

Tableau I. 1 : les avantages et les inconvénients de forage rotary

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La profondeur du forage peut être très importante (plus que 2000 m)</li> <li>➤ La vitesse d'avancement important (jusqu'à 100 m/jour)</li> <li>➤ La formation n'est pas affectée par les terrains peu stables ou plastiques, sous réserve de l'utilisation d'un fluide de forage approprié</li> <li>➤ On peut bien contrôler les paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité et débit d'injection de la boue) en fonction des formations percé</li> <li>➤ Le forage rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake</li> <li>➤ Minimiser le risque de rupture de la garniture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Colmatage possible des formations aquifères par utilisation de certaines boues (bentonite)</li> <li>➤ Difficulté d'observation des cuttings (la présence de tamis vibrants en circuit retour diminue sensiblement cet inconvénient)</li> <li>➤ Le fluide de forage obscurcit la vision de puits</li> </ul>

## 5. Equipements de forage (appareils de forage)

Le système de forage est constitué d'un ensemble d'équipements permettant les fonctions de levage, de rotation et de pompage afin de réaliser le sondage. Des équipements de sécurité et de protection font partie ce système, particulièrement, ceux destinés à la mise en sécurité des puits en cas de venue du gaz.

On distingue deux familles essentielles : l'installation de forage et la garniture, comme le montre la figure ci-dessous.

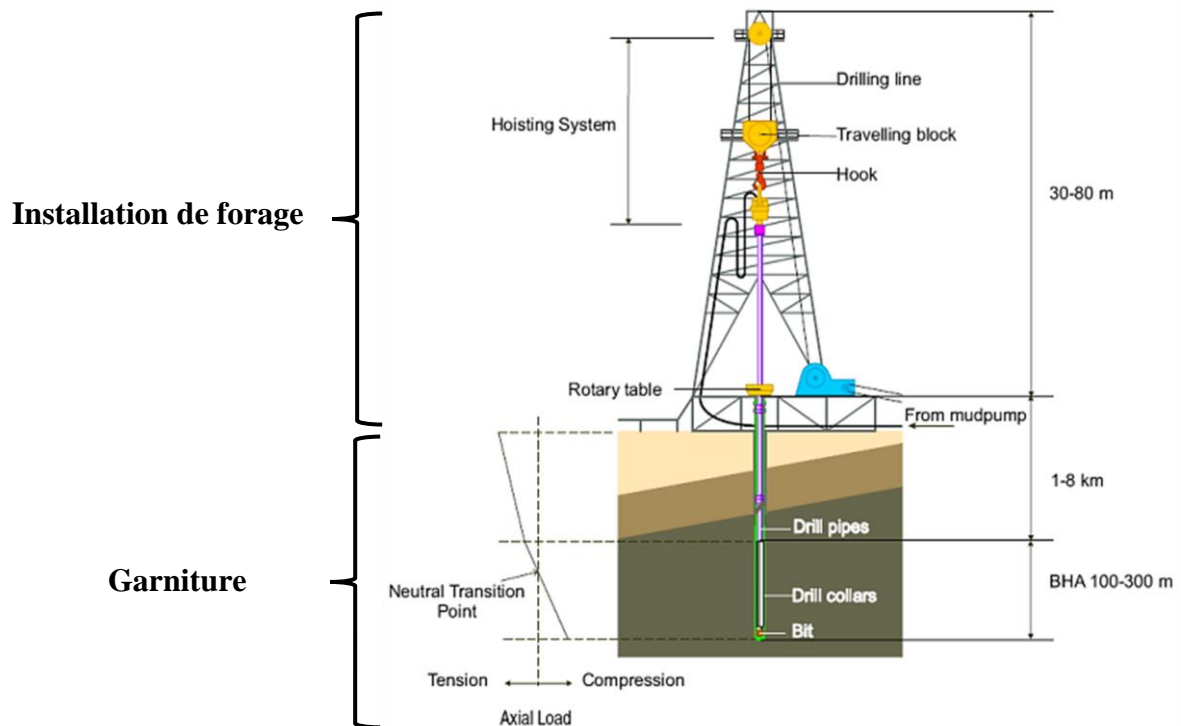


Figure I. 2 : Système de forage.

### 5.1.Installation de forage

L'installation de forage est la partie située sur le sol et on peut l'appeler système de surface. Elle se compose, comme le montre la figure précédente, d'une tour contenant des équipements de levage et de plancher qui permettent la manutention, le vissage et le dévissage des tiges et le changement de l'outil, la table de rotation. Cette dernière représente l'outil responsable du mouvement de rotation de la chaîne de forage. Elle contient également une pompe pour injecter les fluides de forage dans la chaîne de forage.

#### 5.1.1. Les équipements de levage

Ces équipements servent à assurer les manœuvres de descente et de remontée. Pour soulever la garniture de forage, on doit utiliser une grue de grande capacité, car la garniture peut atteindre un poids supérieur à 150 tonnes. Elle est composée, principalement, des éléments suivants : le mat, un treuil et un palan comprenant les moufles fixe et mobile et le câble, comme le montre la Figure I.3 [7].

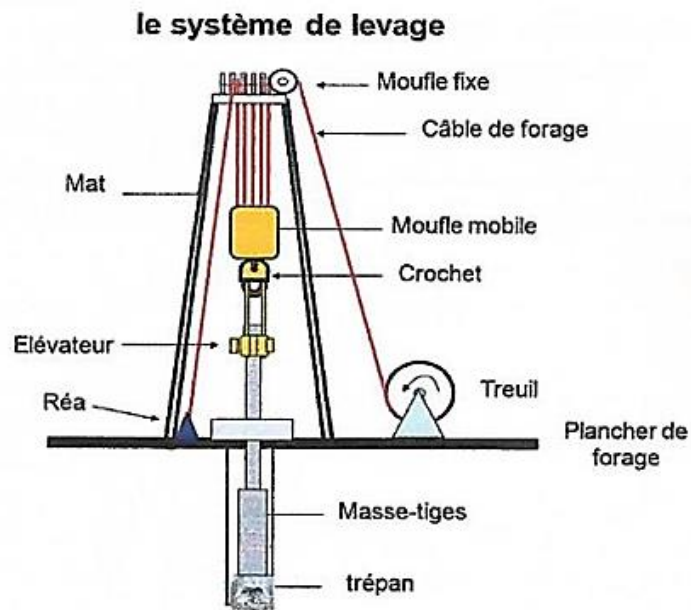


Figure I. 3 : Equipements de levage [8]

#### 5.1.1.1. Le mat (Derrick)

Le mat est une structure métallique en forme de lettre « A » pointu, comme le montre la Figure I.4. Il constitue la structure principale des équipements de levage. Il a la particularité d'être articulé à sa base ce qui lui permet d'être assemblé ou démonté horizontalement puis relevé en position verticale en utilisant le treuil de forage et un câble de relevage spéciale.

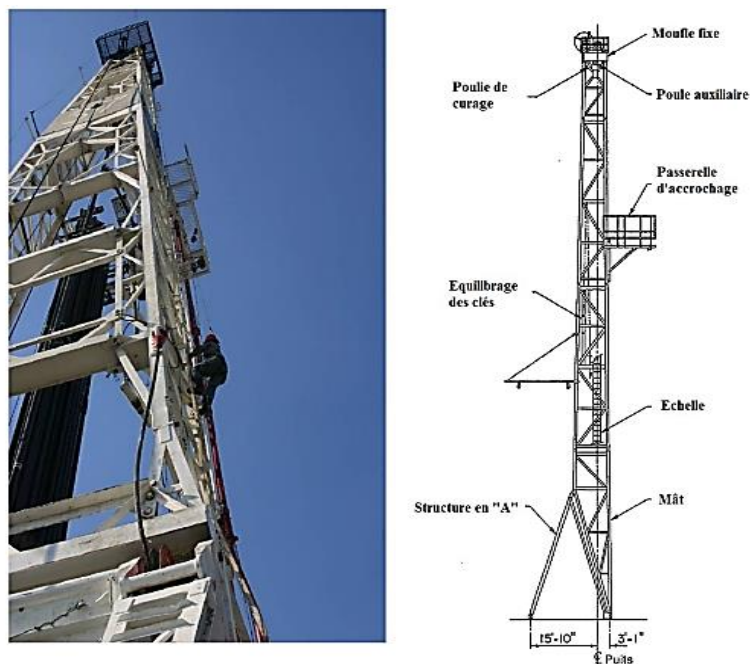


Figure I. 4 : Mat de l'appareil de forage.

### 5.1.1.2. Treuil de forage (Draw works)

Le treuil de forage est le cœur de l'appareil de forage considéré comme étant l'un des principaux équipements utilisés dans le forage. Il est considéré comme un organe principal de forage. Par sa capacité, il caractérise le RIG (sonde de forage) et indique la classe de profondeur des forages que l'on pourra effectuer. Il doit assurer :

- Le levage de la garniture de forage et du tubage ;
- L'entraînement de la table de rotation par l'intermédiaire de cardans ou de chaînes de pignons ;
- Le déplacement de lourdes charges à de grandes vitesses.

Un treuil de forage (Figure I.5) est caractérisé par sa puissance maximale de levage.

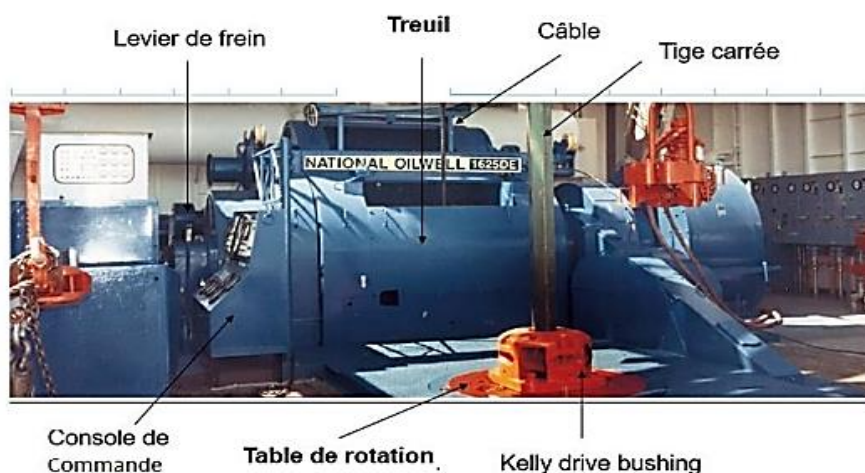


Figure I. 5 : Le treuil de forage.

Un treuil de forage est caractérisé par :

#### 5.1.1.2.1. Tambour de manœuvre

Il présente la partie *active* du treuil, le câble de forage s'enroule sur cet élément. Le tambour de manœuvre peut être lisse ou cannelé (Figure I.6).

Les tambours cannelés permettent un enroulement correct, ce qui réduit le risque d'écrasement du câble si la charge est trop importante le diamètre d'un tambour doit être égal au moins à 20 fois le diamètre du câble la longueur minimale du fût d'un tambour ne doit pas permettre au brin actif un angle de déflexion supérieur à  $1^{\circ}30'$  [9].

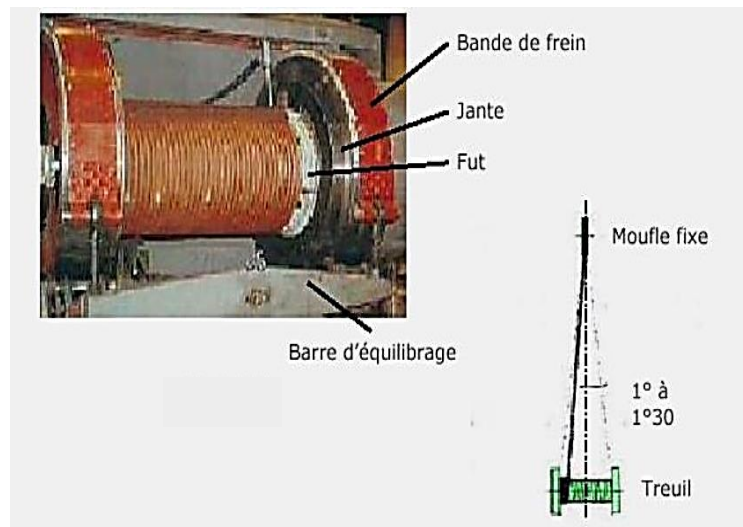


Figure I. 6 : Tambour de manœuvre.

#### 5.1.1.2.2. Frein mécanique

Le frein mécanique (Figure I.7) est un système à bandes montées dont le but est de contrôler l'avancement de l'outil pendant le forage et d'arrêter le treuil pendant la descente de la garniture.

Il est constitué, principalement, de deux bandes métalliques équipées de garnitures intérieures fixées par des boulons. Ces bandes sont reliées par une barre d'équilibrage qui répartit, équitablement, la force de freinage entre les deux bandes et réduit ainsi l'usure des patins. [10].

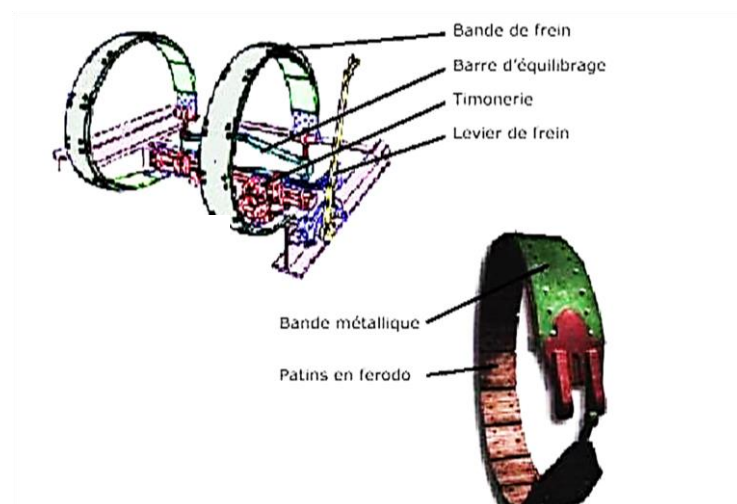


Figure I. 7 : les freins mécaniques.

### 5.1.1.2.3. Freins auxiliaires

En raison d'échauffement excessif des garnitures qui entraîne un freinage inefficace. Ce dernier provoque une usure rapide des garnitures. Pour minimiser ces effets néfastes, il est souhaitable d'installer des freins auxiliaires, ce qui absorbe la fraction la plus importante de l'énergie engendrée par la descente de la garniture.

### 5.1.1.3. Le mouflage

Le mouflage (Figure I.8) est un mécanisme simple de transmission de mouvement constitué de deux moufles, un moufle *fixe* et l'autre *mobile* contenant un nombre arbitraire de polies et d'une corde qui les relie. Il présente un moyen de démultiplication des efforts et réduire la force nécessaire pour rapprocher les deux groupes de poulies.

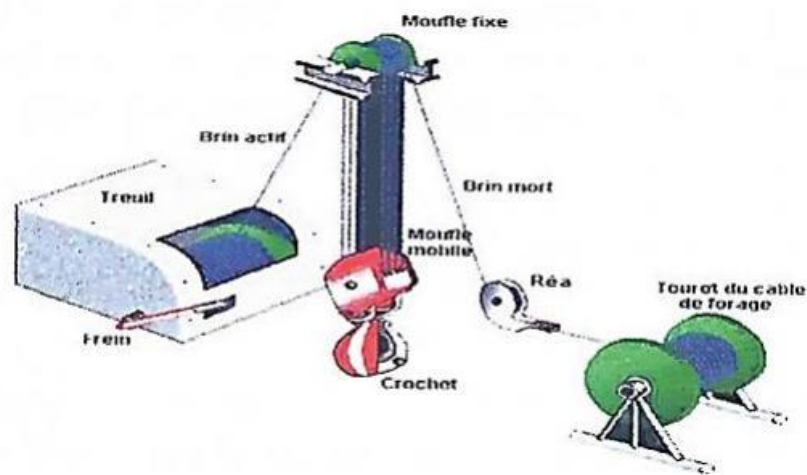


Figure I. 8 : Le système de mouflage

Le système de mouflage se compose de :

#### 5.1.1.3.1. Le moufle fixe

Le moufle fixe (Figure I.9) formé de certaine poulie alignée sur le même axe. Cet axe est supporté à cette extrémité par deux paliers montés sur des poutrelles fixées au sommet du mât, l'axe du moufle fixe est perforé pour permettre le graissage des différents roulements des poulies, il possède une poulie de plus que le moufle mobile.





Figure I. 9 : Le moufle fixe.

#### 5.1.1.3.2. Le moufle mobile

Le moufle mobile (Figure I.10) formé de certaines poulies par lesquelles passe le câble de forage, il se déplace sur une certaine hauteur entre le plancher de travail et le moufle fixe. Il comporte à sa partie inférieure un crochet qui sert à la suspension de la garniture pendant le forage.



Figure I. 10 : le moufle mobile.

#### 5.1.1.4. Le câble

Il est constitué de plusieurs torons disposés en spirale autour d'une âme, chaque toron et lui-même constitué de plusieurs fils calibrés, également disposés en hélices sur plusieurs couches. On distingue :

- ✓ Câblage normal (ou croisé) dont les sens d'enroulement des fils constituant les torons et celui des torons sont inversés ;
- ✓ Câblage inverse (ou Lang) dont les sens d'enroulement des fils et celui des torons sont les mêmes.

### 5.1.2. Equipements de rotation

Il est composé d'un ensemble d'équipements permettant la transmission aux tiges de forage la puissance nécessaire pour faire tourner le trépan (l'outil de forage). Il est constitué d'une table de rotation, d'une tige d'entraînement à sa section carré (Kelly) ainsi que la tête d'injection qui peut être motorisé (top drive).

#### 5.1.2.1. La tige d'entraînement (Kelly)

La tige d'entraînement (Figure I.11) est une structure de section carrée, hexagonale ou triangulaire qui communique le mouvement de rotation de la table et à la garniture de forage. Pour des raisons de sécurité vis-à-vis d'éruption possible par l'intérieur de la garniture, deux vannes ont été montées à chaque extrémité de la tige d'entraînement. Ces deux vannes sont opérées par rotation d'un quart ( $1/4$ ) de tour au moyen d'une clé que l'on conserve sur le plancher de forage. La vanne inférieure doit être de diamètre tel qu'elle puisse être descendue dans le forage en cours.

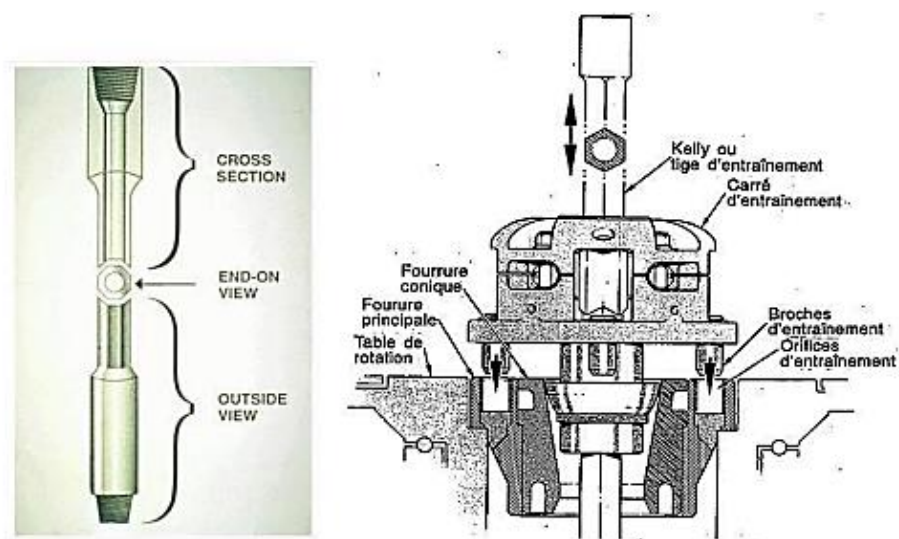


Figure I. 11 : Tige d'entraînement.

#### 5.1.2.2. Table de rotation (Rotary table)

En cours de forage, la table de rotation (Figure I.12) transmet le mouvement de rotation à la garniture de forage pour faire tourner l'outil, par l'intermédiaire de fourrures et de la tige d'entraînement (Kelly), et en cours de manœuvre supporte le poids de la garniture de forage, par l'intermédiaire de coins de retenue. La dimension nominale est caractérisée par le diamètre de passage dans lequel est installé le (master bushing) dont les rôles sont la suspension de la garniture par l'intermédiaire des cales (slips) et l'entraînement du carré d'entraînement (Kelly drive bushing) en forage. Ces dimensions peuvent être 17"1/2, 20"1/2, 27"1/2, 37"1/2 et 49"1/2. Elle tourne à des vitesses 40 à 500 tr/min [7].

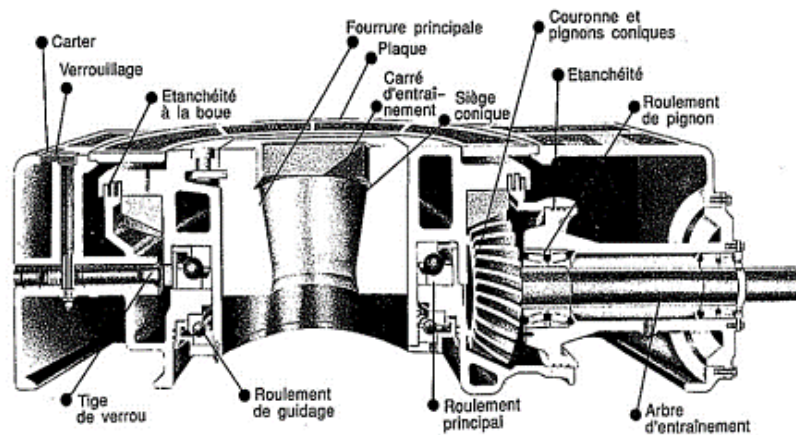


Figure I. 12 : Table de rotation.

### 5.1.2.3. Tête d'injection (Top drive)

Le top drive (Figure I.13) assure le passage de la boue venant d'une conduite fixe des flexibles d'injection dans une conduite animée d'un mouvement de rotation, mais en plus d'une transmission mécanique sur arbre rotatif la motorisation peut être par moteur électrique ou hydraulique.

Pour le cas de tête d'injection motorisée (Top Drive) on n'a besoin ni de table de rotation pour faire tourner la garniture ni de tige d'entraînement, c'est le Top Drive qui s'en charge. Plusieurs autres options existent dans cet équipement : les bras de l'élevateur sont articulés hydrauliquement pour faciliter le travail de l'accrocheur et d'une clé automatique [11]

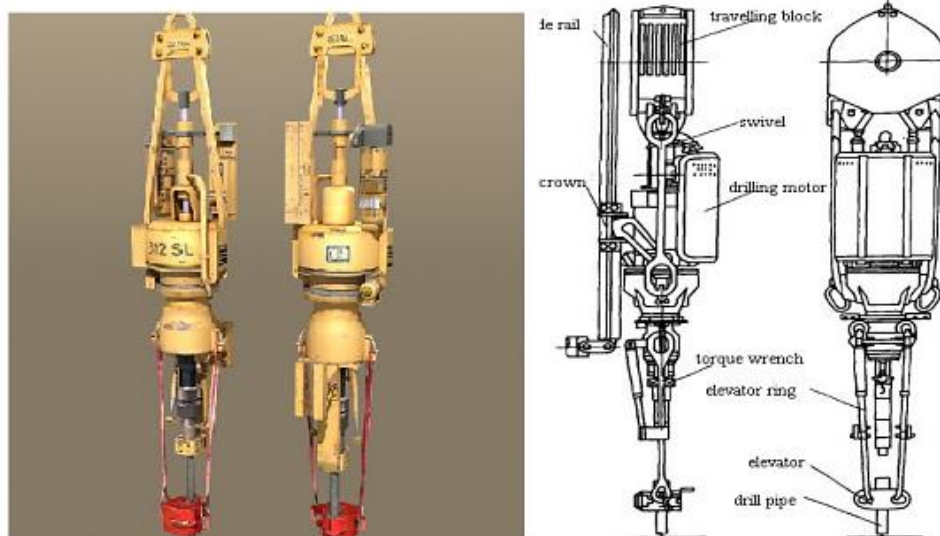


Figure I. 13 : Tête d'injection.

### 5.1.3. Equipements de pompage et de circulation.

Les équipements de pompage et de circulation (Figure I.14) assurent l'acheminement du fluide de forage (la boue) depuis l'aspiration de la pompe jusqu'au retour aux bassins. La boue est un mélange d'eau, d'argile et d'additifs qui est fabriquée dans des bassins de haute capacité. Puis, elle est aspirée par des pompes (pompes à boue) et refoulée dans les tiges creuses. Elle descend le long de la garniture de forage, sort par les orifices de l'outil remonte dans l'espace annulaire entre la garniture de forage et le puits jusqu'en surface. Elle est recueillie dans un tube vertical, puis acheminée par un autre horizontal vers des tamis vibrants, pour être débarrassée des déblais (cuttings), avant d'être réinjectée dans le puits [7]

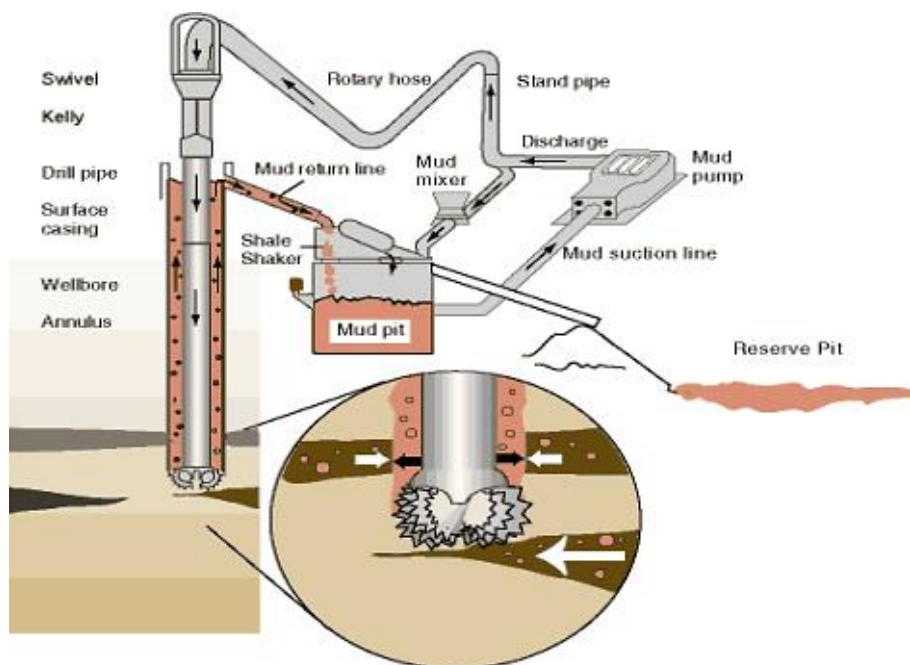


Figure I. 14 : Circulation de la boue.

### 5.1.4. Equipements de production de l'énergie

Dans un système de forage, les équipements de production d'énergie consistent en cinq groupes électrogènes de type Caterpillar dont quatre sont capables de fournir toute la puissance en courant alternatif nécessaire au système, le cinquième est en réserve.

Chaque groupe électrogène (Figure I.15) est constitué d'un moteur diesel couplé à un alternateur. Ce dernier est la source principale de l'énergie. Il assure la production d'énergie alternative mais on peut rencontrer sur des plates-formes l'utilisation de puissance fournie par

des turbines à gaz. L'énergie fournie par les moteurs diesel est acheminée, sous forme électrique ou mécanique, vers les différents systèmes de l'appareil : pompes, treuil et la table de rotation.

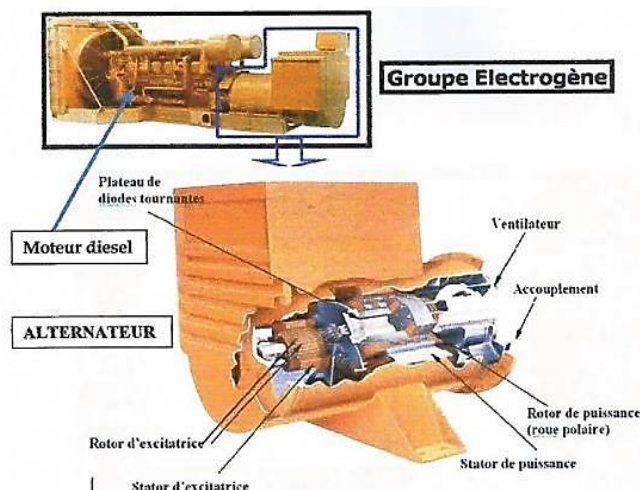


Figure I. 15 : Groupe électrogène.

### 5.1.5. Poste de contrôle

Tous les appareils de mesure sont regroupés sur un panel pressurisé et anti déflaquant. L'indicateur de la charge au crochet. L'indicateur de la charge au crochet est le plus important, en tous cas le plus inspecté par le chef de poste, en plus de l'indicateur du poids sur l'outil (WOB). Les autres indicateurs informent le foreur sur le niveau des bacs à boue, des conditions de circulation : débit, pression, régime de pompes. Des paramètres de rotation : couple moteur à la table et la vitesse de rotation [3].

### 5.1.6. Equipement de sécurité (Blow Out Preventer)

Lorsqu'un fluide (gaz, pétrole ou eau) sort de la roche (réservoir) et s'introduit dans le puits, on dit que c'est une *venue*. Il faut alors fermer immédiatement le puits, sinon, le fluide chasse la boue au-dessus et remonte dans le puits. S'il atteint une certaine hauteur, il devient difficile à contrôler, ce qui s'appelle *éruption*. Afin d'éviter ce genre de problème, on place, au-dessus de la tête du puits, des obturateurs. Les blocs obturateurs de puits ou Blow Out Preventer (BOP), Figure I.16, sont des valves de sécurité utilisées sur les appareils de forage. Ils s'installent en surface et représentent les derniers recours en cas d'éruption sur un puits. A l'aide de ces obturateurs, on peut prévenir rapidement du début de l'éruption et réaliser des opérations nécessaires dans le puits. [7, 13].

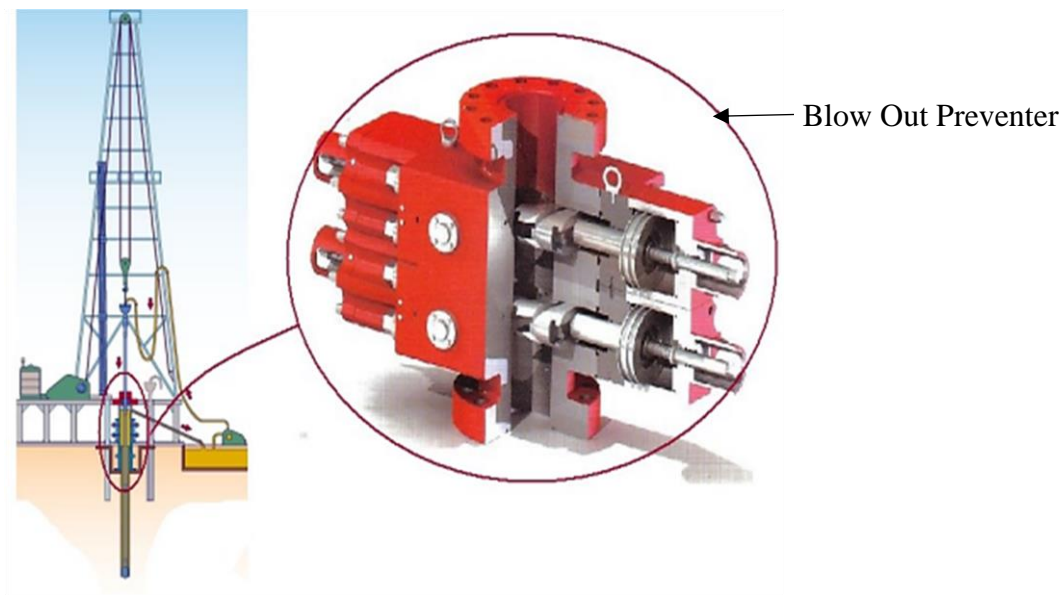


Figure I. 16 : Bloc obturateur du puits.

## 5.2.La garniture

La garniture est la partie située sous-sol du système de forage, elle est composée, principalement, de haut en bas de :

### 5.2.1. Train des tiges

Le train des tiges (Figure I.17 (a)) est la partie la plus longue de la garniture qui peut atteindre une longueur de plusieurs kilomètres (entre 1 et 8 km). Elle est composée d'une série importante de tiges minces en acier raccordées les unes aux autres par des joints filés coniques et qui s'étendent jusqu'à la surface. Le rôle principal, de ces tiges est de transmettre le couple moteur fournis en surface vers l'outil et de soutenir plus ou moins le train de masses-tiges. Chaque tige est munie à ses extrémités de renflements appelés *tool-joint (TJ)* (Figure I.17 (b)) servant pour le vissage des tiges entre elles et comme points d'appui du train de tiges sur la paroi du puits.

Les tiges de forage présentent un ensemble de tubes en acier légères d'environ 10m de longueur, d'un diamètre extérieur pouvant aller de 9 à 15cm et d'une épaisseur de 1cm. L'ensemble des tiges de forage ou le train des tiges, en conditions normales, entraîné à partir de la table de rotation est sollicité en traction et en torsion dans le but d'éviter son flambement car celui-ci favorise l'apparition de forces de contacts très élevées entre les tiges et les parois du puits. Ce train de tiges comporte parfois (cas du forage dirigé ou du forage horizontal) une série supplémentaire de tiges lourdes « HWDP » plus épaisses placées souvent juste après les masses tiges. Ces tiges lourdes ont pour but de réduire les risques de flambement des tiges.



(a)



(b)

Figure I. 17 : (a)Train de tiges, (b) Tool joint.

### 5.2.2. Assemblage du fond (Bottom Hole Assembly)

L'assemblage du fond (BHA) est la partie inférieure ou la plus basse de la garniture de forage. Cette partie est composée, de bas en haut, de l'outil de forage, le stabilisateur et les masses tiges. La longueur de cet ensemble varie entre 100 et 300m en fonction de la pression recherchée. La Figure I.18 montre ces différentes composantes.

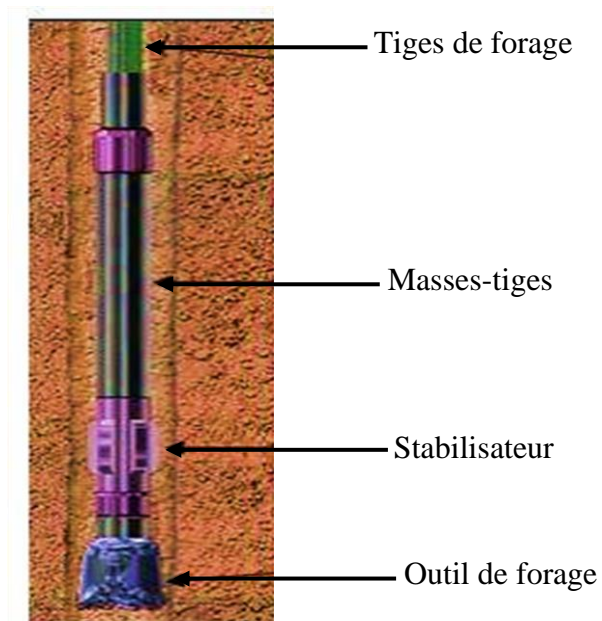


Figure I. 18 : Assemblage du fond.

### 5.2.2.1. Les outils de forage (Tréfans)

Les outils de forage, situés à l'extrémité basse de la garniture, font partie des équipements les plus importants des appareils de forage. L'outil est entraîné en rotation et permet la progression de la garniture par son action directe sur le front de taille.

Le bon choix de l'outil de forage fait partie de l'optimisation des opérations de forage car il est impératif qu'il accomplisse sa tâche tout en forant le plus rapidement et le plus longtemps possible.

Il existe plusieurs types d'outils de forage, la différence entre eux réside surtout dans la forme, la nature et le nombre de dents. On distingue deux types d'outils :

- ✚ A molettes (tricônes) ;
- ✚ Monoblocs (diamant, PDC)

#### 5.2.2.1.1. Les outils à molettes (Tricônes)

Les outils à molettes sont constitués de trois cônes (Figure I.19) tournant de façon indépendante et montés sur trois bras réunis entre eux par soudure constituant le corps de l'outil. Plusieurs types de roulements sont utilisés (rouleau avec ou sans étanchéité, palier de friction, système de lubrification, etc.). Ces outils travaillent principalement en compression. Ils sont fabriqués en acier très résistant.



Figure I. 19 : Figure outils tricônes.

#### 5.2.2.1.2. Les outils à diamants (Monoblocs)

Les outils à diamants (Figure I.20), appelés les fraises à diamants, ne possèdent pas de pièces tournantes, ce sont les outils monobloc. Des diamants naturels et de synthèse sont utilisés pour leur fabrication. Les outils à diamants naturels travaillent à la façon d'une lime tandis que



les outils à diamants synthétiques travaillent à la façon d'un rabot. Par conséquent, ils sont utilisés, non pas pour forer, mais pour carotter. Les outils ont évolué au cours du temps pour répondre aux problèmes techniques du forage qui s'avèrent de plus en plus complexes [3].

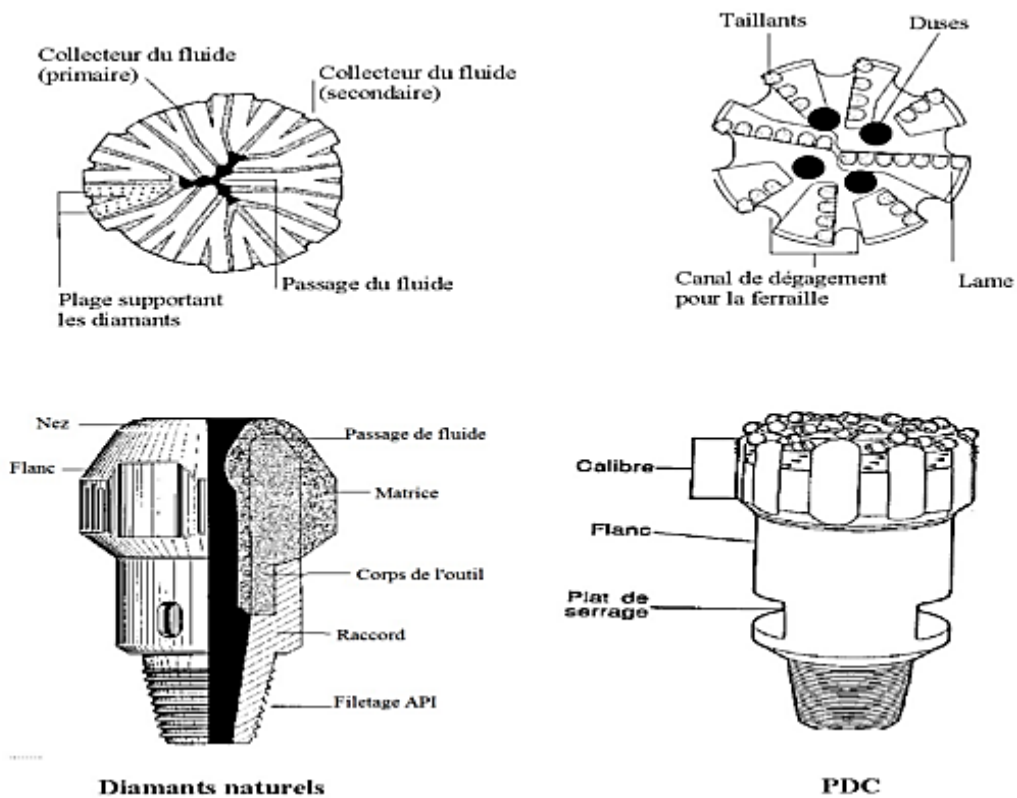


Figure I. 20 : Les outils monobloc ou à diamants.

### 5.2.2.2. Stabilisateurs

Ce sont des tubes de longueur nettement plus faible que celle des masses-tiges et dont le diamètre extérieur est voisin de celui du trépan. Ils sont placés au niveau des masses-tiges et parfois intercalés entre deux masses-tiges pour assurer le centrage et le guidage de l'assemblage de fond. Ils maintiennent le trépan perpendiculaire à la formation, ce qui augmente sa performance.

Les stabilisateurs peuvent être installés soit :

- Directement sur l'outil de forage → near-bit ;
- Plus haut dans la BHA → string.

Ils existent plusieurs types de stabilisateurs, selon la conception de leurs lames, tels que : les lames soudées, lames intégrales, stabilisateurs (à chemise, à chemise non rotative, à diamètres variables, clamp on). La Figure I.21 montre quelques types des stabilisateurs [3].

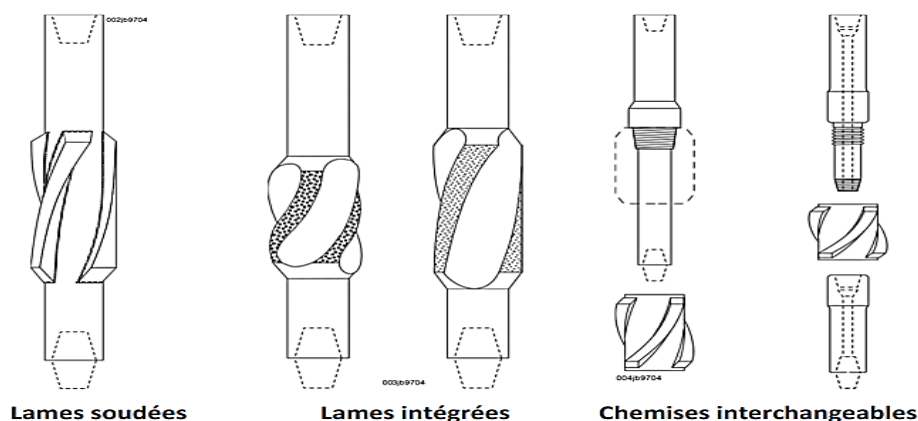


Figure I. 21 : Types des Stabilisateurs.

### 5.2.2.3.Masse-tiges

Il s'agit d'une série de tubes massifs, de sections importantes, en acier dont le rôle est d'assurer l'application du poids sur l'outil. Les masses-tiges sont sollicités en compression et en torsion. Les diamètres de ces tubes peuvent varier selon les puits, de 6 à 8 cm pour le diamètre intérieur et de 10 à 25 cm pour le diamètre extérieur pour une épaisseur de 6 à 16 cm, ce qui leur confère une bonne rigidité en torsion et en compression. Le diamètre inférieur est normalisé par l'API en fonction du diamètre extérieur.

### 5.2.3. Coulisses de battage

Une coulisse de forage est un élément de garniture à longueur variable. Elle dispose d'une course libre ou libérable. Dans le cas où la garniture est coincée sous la coulisse, cette dernière permet de développer une force d'impact à partir de l'énergie potentielle que représente la garniture libre au-dessus (libre relativement à la course d'ouverture). Cette force, susceptible de libérer la partie coincée, peut être appliquée vers le haut ou vers le bas. Pour cela, les constructeurs ont étudié les divers systèmes, et cela a donné naissance à plusieurs familles de coulisses de forage.

La coulisse est considérée comme un trait d'union entre la garniture libre et la garniture coincée, constitué de deux pièces coulissant l'une dans l'autre : celle de plus faible diamètre appelée "mandrin" et celle de plus fort diamètre appelée "corps de coulisse" [14].

Les coulisses de forage sont systématiquement recommandées dans [15] :

- Tous les puits d'exploration (offshore ou onshore) ;
- Tous les puits de forage dirigé ;
- Les puits où il y a un risque de coincement en développement.

Les coulisses, suivant leur position dans le train de tiges, peuvent être descendues soit en tension soit en compression. Mais certains outils ne peuvent être utilisés qu'en tension, ce qui oblige à les placer très haut dans le train de tiges, au détriment de l'efficacité de battage et avec des risques de coincement accrus dus à la plus grande longueur des masse-tiges.

De nombreuses coulisses sont disponibles sur le marché. Parmi les coulisses de forage les plus utilisées on peut citer : les coulisses mécaniques et les coulisses hydrauliques ainsi que les coulisses hydromécaniques.

### 5.3. Equipements spécifiques au forage

#### 5.3.1. Moteurs volumétrique (hydraulique ou à déplacements positifs) PDM

Les moteurs de fond appelés moteurs à déplacement positif sont devenus les outils sans lesquels le forage dirigé n'aurait pu évoluer aussi rapidement dans ces dernières années.

Les éléments principaux constituant les PDM (Figure I.22) sont :

- ✚ Le rotor : s'agit pièce hélicoïdale en acier inoxydable ;
- ✚ Le stator : s'agit d'un élastomère moulé en forme d'hélice interne avec une spire supplémentaire par rapport au rotor.

Quand le fluide de forage est pompé à travers le moteur, une montée de pression apparaît entraînant la rotation du stator et permettant le passage du fluide dans la cavité voisine, Le fluide progresse alors de cavité en cavité entraînant ainsi une rotation régulière du rotor. La vitesse de rotation est proportionnelle au débit à travers le moteur [16].

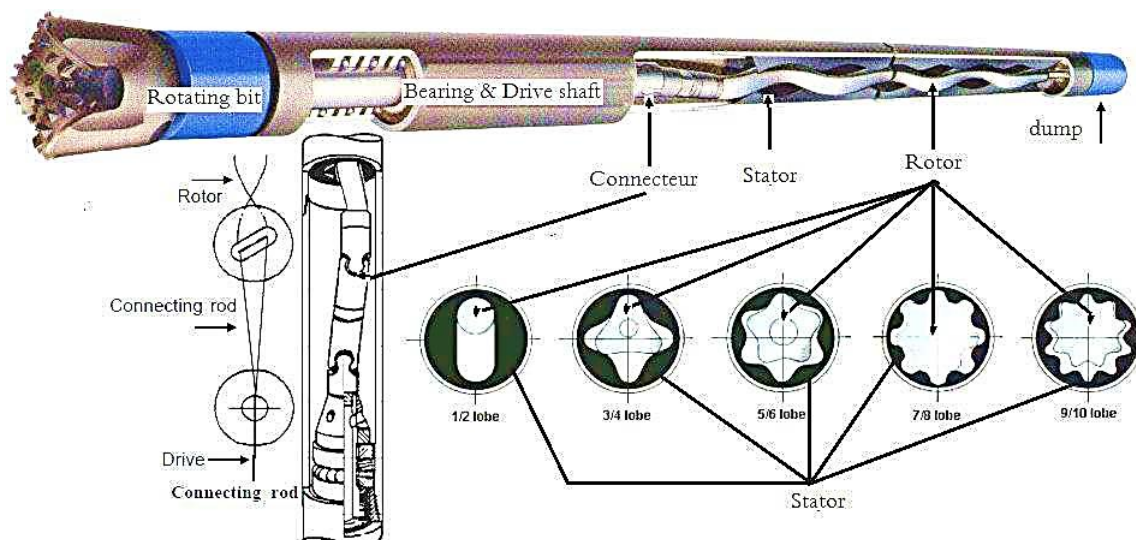


Figure I. 22 : Géométrie D'un PDM

#### 5.3.2. Equipements de mesure

##### 5.3.2.1. Measurements While Drilling (MWD)

Les premiers outils MWD (Measurement While Drilling ou mesures instantanées durant le forage) sont apparus vers la fin des années 70, créés par ELF (teleco). Ils sont des outils

sophistiqués donnant des mesures directionnelles de précision grâce à des magnétomètres et accéléromètres : les MWD sont des outils de mesures magnétiques.

Les outils de MWD (Figure I.23) en service peuvent, aujourd'hui, fournir des données pour une variété de mesures comme :

- Les données en temps réel de mesure de formation (compris des mesures de résistivité, de densité et de porosité de la formation ;
- L'azimut, l'inclinaison et le tool-face, permettant au foreur de diriger le puits pour le contrôle directionnel de BHA [17].

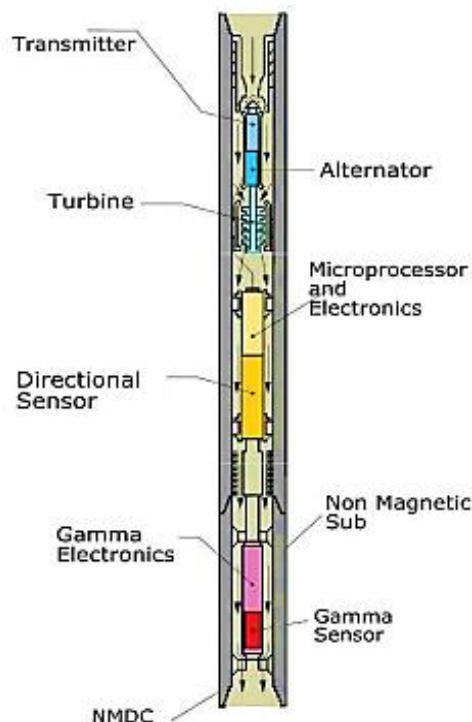


Figure I. 23 : Image représente les Composants du l'outil MWD

### 5.3.2.2. Logging While Drilling (LWD)

Logging pendant le forage (LWD) (Figure I.24) est étroitement liée à MWD. LWD fournit des mesures de formation, tandis que MWD fournit des mesures de mécanique et de levé de forage.

Les données MWD et LWD sont transmises en temps réel à la surface. Cependant, LWD fournit une meilleure résolution que MWD car les mesures LWD sont généralement stockées dans la mémoire de fond. Les mesures MWD ont des limitations de transmission de données, qui entravent la résolution des valeurs de mesure [17].



Figure I. 24 : Image représente un outil LWD.

## 6. Les paramètres de forage

Les paramètres du forage représentent les grandeurs physiques agissant sur les performances du processus de forage et donc sur sa vitesse de pénétration. On peut les classer en :

- ✚ **Paramètres mécaniques** : sont, principalement, le poids sur l'outil WOB, la vitesse de rotation RPM, le couple exercé sur l'outil TOB et la vitesse d'avancement ROP ;
- ✚ **Paramètres hydrauliques** : sont type de boue, débit et pression hydraulique et densité de la boue. [18]

### 6.1. Les paramètres mécaniques

#### 6.1.1. Le poids sur l'outil WOB

Le poids sur l'outil WOB (Weight On Bit) désigne la force exercée à l'outil par la garniture de forage et plus précisément les masses tiges, calculé selon la formule suivante :

$$WOB = WOHL - WOHF \dots \dots \dots I.1$$

Où :

- $WOHL$  = poids de la garniture ;
- $WOHF$  = poids de garniture durant le forage.

Le poids sur l'outil est mesuré en N ou KN. Il joue un rôle majeur dans l'optimisation ou la dégradation de la vitesse de progression et la manifestation des différentes vibrations. Les grandeurs usuelles de WOB s'étendent entre 10kN et 103 kN.

### 6.1.2. La vitesse de rotation RPM

La vitesse de rotation RPM (Revolution Per Minute) indique le nombre de tours par minute de la table de rotation. Elle est, généralement, comprise entre 50 et 300 tr /min, selon la dureté de la formation et le poids sur l'outil (WOB) déduite via un capteur (la vitesse de rotation mesurée au niveau du top drive ou de la table de rotation). En surface, elle peut être contrôlée mais elle peut être différente de la vitesse de rotation de l'outil (trépan) due aux vibrations et couples de frottements

### 6.1.3. Le couple exercé sur l'outil TOB

Le couple exercé sur l'outil TOB (Torque On Bit) correspond au couple de rotation appliqué à l'outil. 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. Sa valeur est inférieure à celle mesurée en surface du couple transmis de top drive (ou de la table de rotation) à cause des différents frottements. La valeur du couple en surface varie typiquement entre 200 et 3000 Kgf.m.[19].

### 6.1.4. La vitesse d'avancement ROP

La vitesse d'avancement ROP (Rate Of Penetration) des trépan est fonction de la nature des terrains et varie de 1 à 2 m/hr dans les terrains durs à 30 m/hr et plus dans les terrains tendres. La durée de vie des tricônes à molettes dentées est de l'ordre de 40 hr ; le travail du trépan a pour conséquences :

- Une usure des dents qui peut aller jusqu'à la disparition complète.
- Une usure des roulements qui peut causer la perte d'une molette au fond du trou ;
- Une perte de diamètre dans les terrains abrasifs.

Pour améliorer la durée de vie des tricônes, les paliers des molettes sont lubrifiés et éventuellement lisses. Dans ce cas, la durée de vie de l'outil peut dépasser 150 hr.

## 6.2. Les paramètres hydrauliques

L'opération de forage se réalise en présence d'un système de la lubrification se trouvant à la surface et gérer par un système hydraulique.

### 6.2.1. Type de boue de forage (fluide de forage)

La boue de forage est un paramètre de forage important qui en plus de son rôle d'évacuateur des déblais assure un rôle de fluide de coupe. Le type de boue de forage est choisi en fonction des performances recherchées et désigne les propriétés physico-chimiques du fluide de forage. Trois types de boues sont souvent employés : la boue à base d'eau, la boue à base d'huile et la boue synthétique. Une boue synthétique est constituée d'un mélange d'additifs chimiques et d'eau. Le foreur peut en modifier la composition et le débit (de quelques litres à plusieurs mètres cubes par minute).

### **6.2.2. Débit (Flow in)**

C'est le volume de boue déversé par les pompes de forage à l'intérieur du trou de forage, la quantification du débit est basée sur le débit unitaire des pompes (POP) selon le nombre de coup par minute contribué par les pompes (SPM), le SPM est enregistré à l'aide d'un capteur de fréquence similaire à celle de la rotation. L'unité du débit est le L/mn.

### **6.2.3. Pression hydraulique**

Le débit et la pression hydraulique représentent les variables physiques qui doivent favoriser une bonne évacuation des déblais et éviter des problèmes d'encrassement du trépan ou du puits.

### **6.2.4. Densité de boue**

L'obtention des informations relatives au puits et le contrôle de la pression dans le puits s'effectue à travers la densité de la boue. La boue de forage ramène à la surface les déblais, mais aussi du gaz contenu dans les roches. Cela fournit des indications sur la nature des fluides se situant dans le réservoir et représente un élément important dans le pilotage de la garniture.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les connaissances fondamentales relatives aux forages pétroliers, en mettant particulièrement l'accent sur le principe de forage rotary, les différents équipements formant un système de forage, ainsi que les paramètres agissant sur les performances du processus de forage. Nous en avons conclu que le forage consiste en une opération industrielle immense, de coût très important. Afin d'optimiser cette opération, il est primordial de contrôler les différentes variables mécaniques et hydrauliques citées précédemment. Dans le prochain chapitre, les différents problèmes liés aux vibrations seront abordés.

## Chapitre II : Vibration des garnitures de forage

### Introduction

Le forage rotary de puits de pétrole et de gaz reste le moyen le plus utilisé pour atteindre les gisements d'hydrocarbures. Il est soumis aux différents paramètres et changements, ce qui permet l'apparition de vibrations et d'oscillations indésirables. Ces vibrations sont considérées comme une cause majeure d'inefficacité dans le processus de forage, entraînant une augmentation des coûts et des dépenses pour l'achèvement du puits. Ces phénomènes soumettent les équipements de forage à des contraintes qui entraînent une rupture par fatigue, l'usure du trépan, une défaillance prématurée des tubes, et une diminution du taux de pénétration [20].

En fait, le système de forage rotary est composé de deux parties principales, électrique et mécanique. Cette dernière est constituée d'un train de tiges. A l'extrémité inférieure de ce train, le trépan (l'outil de forage) est attaché pour broyer les roches, contenant l'hydrocarbure, pendant leurs interactions. Ces interactions, imprévisibles et aléatoires, peuvent produire des violentes vibrations au niveau du train de tiges. Ce qui donne naissance à l'endommagement et l'usure du trépan qui est en contact direct avec les variations des caractéristiques des roches.

Dans ce qui suit, nous expliquerons, brièvement, le phénomène des vibrations engendrées lors de forage et plus particulièrement le phénomène stick-slip.

### 1. Les vibrations de trains de tiges

Le mouvement de rotation du train de tige n'est pas parfaitement régulier et uniforme. En effet, le train de tige est une structure très élastique, évoluant dans un environnement géologique complexe et subissant des sollicitations irrégulières. Donc, il est évident que le processus de forage, généralement, n'est pas parfaitement exécuté ; en d'autres termes, il y a toujours un contact entre les composants du train de tige de forage et les parois du trou de forage d'une part, et une forte interaction entre le trépan et le fond du trou de forage d'autre part. Les différentes forces agissant sur le train de tiges et les formations géologiques complexes produisent des sollicitations irrégulières et indésirables qui peuvent favoriser l'apparition de phénomènes dynamiques. Le type de forage lui-même peut provoquer des oscillations, par exemple dans les systèmes de forage rotatifs ; il suffit de petites perturbations auto-excitées pour placer le train de tiges dans un régime d'oscillation instable.

Donc, on peut conclure que 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) et du taux de pénétration. En outre, ces vibrations peuvent entraîner un gaspillage important d'énergie de forage et induire des instabilités dans les puits forés ce qui réduit le contrôle directionnel et la forme générale des puits. Les foreurs connaissent les vibrations intimement associées au forage par leurs effets en surface : mouvement du train de



sonde, frottement du câble de forage lorsqu'il entre en résonance avec les vibrations émises par l'outil et les répercussions sur l'indicateur de poids [21,22].

## 2. Les modes de vibrations des garnitures de forage

En fonction du comportement du train de tiges sous l'effet des vibrations, précisément la direction dans laquelle les vibrations se produisent, trois types de vibrations peuvent être identifiés (Figure II.1) :

- Les vibrations axiales ;
- Les vibrations latérales ;
- Les vibrations de torsion.

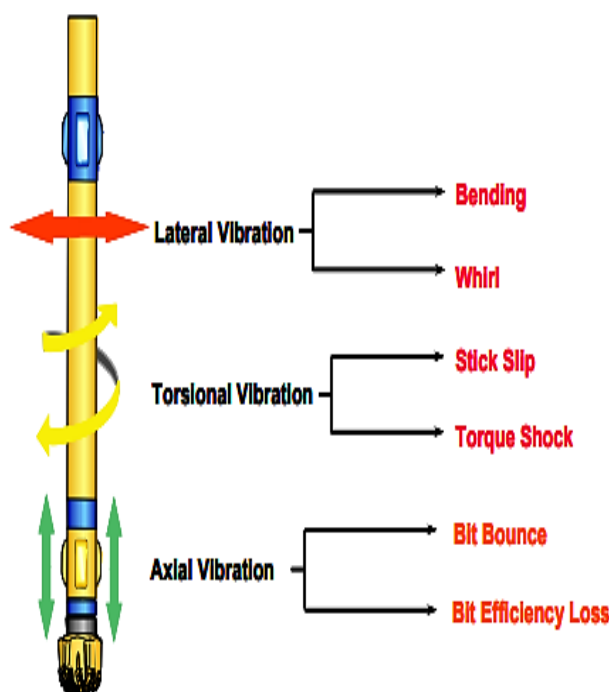


Figure II. 1 : les modes de vibration de garniture de forage.

### 2.1. Vibrations axiales ou longitudinales

Ce mode de vibration consiste en des mouvements irréguliers et périodiques des composants de forage, plus précisément la garniture, le long de l'axe longitudinal, ce qui entraîne un rebond du trépan et un comportement de forage brutal qui détruit le trépan, endommage l'ensemble d'assemblage du fond (BHA) et augmente la durée totale du forage.

Cela est dû au changement de poids appliqué sur chaque taillant entraînant une variation de la profondeur de coupe.

En outre, en raison des mécanismes de couplage en fond de puits, il y aura également des déplacements latéraux du train de tiges. Le rebond du trépan peut être détecté à la surface. Il est susceptible de se développer lors d'un forage avec un trépan de type *tricône* qui est composé de plusieurs lobes, ce qui entraîne une interaction erratique du trépan avec le fond du puits, ce qui fait que le trépan perd le contact avec les roches. Dans ce cas, de graves problèmes ont été enregistrés. Par exemple, la réduction du taux de pénétration peut entraîner une défaillance du trépan et des composants du BHA. Pour les faibles profondeurs, ces vibrations peuvent même affecter l'équipement de surface (rebond de l'entraînement supérieur). Ce qui rend la détection de ce phénomène très facile. La boue de forage est également influencée par les vibrations axiales (fluctuation de pression). Pour les puits profonds, les oscillations axiales sont amorties, ce qui empêche leur propagation à la surface. Pour les outils du type *PDC*, les vibrations axiales restent un phénomène marginal sur le terrain et on peut les classer en tant que vibrations secondaires.

Au cours du processus de forage, les dents du trépan détruisent la roche par une succession de percussions. L'énergie fournie à l'outil de forage par le poids et la rotation ne sert que partiellement à détruire la roche. En effet, une partie de cette énergie est réfléchiée dans la garniture de forage sous forme de vibrations axiales, et une autre se perd en frottement et en chaleur. Le rebond de l'outil « bit-bounce » est la forme extrême des vibrations axiales, ce qui signifie que le trépan perd le contact avec la formation géologique et subit des rebonds dans la direction de la pénétration (Figure II.2) [23-25].

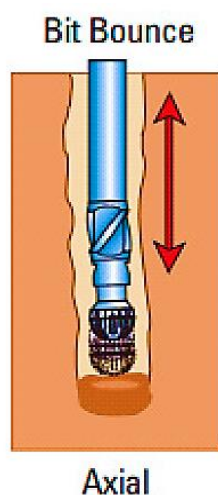


Figure II. 2 : Vibration axiale [25].

## 2.2. Vibrations latérales

Les vibrations latérales surviennent lorsque le trépan, plus précisément le BHA, tourne de manière excentrique autour de l'axe du puits ; en d'autres termes, dans une direction non

linéaire par rapport à l'axe de forage. Les forces d'inertie qui tentent de déstabiliser le train de tiges provoquent la déviation de l'axe de rotation (Figure II.3). Le phénomène généré par ce type de vibration est appelé (tourbillonnement ou whirling). Il peut se manifester sur le BHA ou sur le trépan. Le BHA peut recevoir une excitation (perturbation qui déclenche le tourbillonnement) du trépan, en raison des forces latérales et perpendiculaires à l'axe de rotation.

Selon les compagnies pétrolières et gazières, les principaux problèmes causés par ce phénomène sont :

- L'élargissement du trou dû à la rotation irrégulière du trépan ;
- La réduction de la durée de vie virtuelle de la tige de forage due aux variations cycliques des vibrations ;
- La rupture instantanée de la tige de forage (apparition de microfissures qui augmentent au fur et à mesure que le phénomène se produit) ;
- Des contacts sévères avec les parois du trou de forage.

Selon le sens dans lequel il se produit, le phénomène de tourbillonnement peut être divisé en deux types principaux qui sont [26,27] :

- ✚ Le premier type (forward whirl) dans lequel la précession du train de tiges tourne dans le même sens que la rotation du trépan ;
- ✚ Le second type (backward whirl) qui signifie que la précession a lieu dans le sens inverse de la rotation ;
- ✚ En outre, dans le troisième type, la précession a un sens aléatoire.

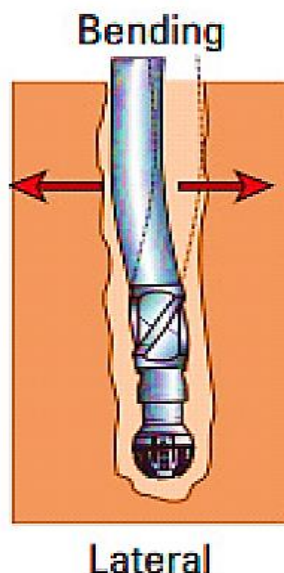


Figure II. 3 : Vibration latérale[25].

### 2.3.Vibration de torsion

Les vibrations de torsion (Figure II.4) de la garniture de forage en cours de forge se sont manifestées depuis que celui-ci existe. Elles sont considérées comme les vibrations les plus

dangereuses auxquelles l'appareil de forage est très sensible. L'entraînement de l'outil de forage en rotation crée une accumulation de torsion dans la garniture. Cette dernière est soumise à l'entraînement en surface en rotation par la table de rotation ou par le top drive et aux couples résistant du travail de l'outil et à de nombreux facteurs.

A la vitesse de rotation en surface à peu près constante, les frottements le long de la garniture et à l'outil provoquent des oscillations de torsion qui se manifestent au travers des ralentissements et des accélérations au niveau de l'outil. Parfois l'outil s'arrête de tourner au fond pour ensuite repartir à grande vitesse et s'arrêter à nouveau lorsque la torsion des tiges est évacuée ce qui représente un phénomène connu sous le nom de *stick slip* dont de nombreux chercheurs l'ont considéré comme le phénomène le plus nocif dans les systèmes de forage puisqu'il cause l'usure des tiges, l'endommagement des raccords de tiges et de l'outil de forage. Dans le cas extrême, assez rares, la détente de la torsion des tiges provoque une accumulation importante de torsion inverse ce qui fait tourner l'outil quelques tours à gauche avant de repartir à droite. On parle alors de (backward spin).

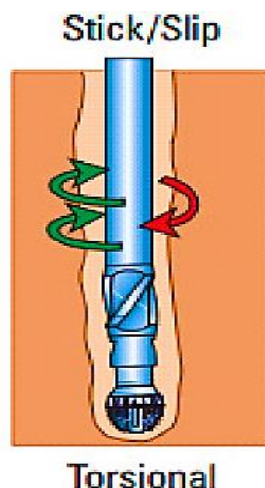


Figure II. 4 : Vibration de torsion [25].

### 3. Phénomène de stick-slip

Le phénomène de stick-slip est la forme la plus sévère et la plus destructive des vibrations de torsion, de nombreux chercheurs l'ont considéré comme le phénomène le plus nocif dans les systèmes de forage. Le stick-slip se produit lorsque le trépan est frictionné avec la formation de manière non linéaire ; la non-linéarité fait basculer le trépan entre deux phases :

- La première phase (phase de stick) : c'est la phase d'adhérence ou collage quasi-total. Au cours de cette phase, la rotation de l'outil s'arrête cycliquement due au couple de frottement avec le fond de formation, et la garniture entraînée en rotation depuis la surface est mise en torsion grâce à l'élasticité propre du train de tiges ;
- La deuxième phase (phase de glissement) : l'outil redémarre lorsque le couple (TOB) « Torque On Bit » sera supérieur au couple de frottement statique, avec une grande accélération où la vitesse de l'outil peut atteindre plusieurs multiples de la vitesse de surface (de table de rotation ou de top drive) [28].

Par conséquent, la vitesse angulaire du trépan subit d'intenses variations et passe périodiquement d'un cycle à un autre ; adhérence et glissement soudain avec une vitesse de rotation deux fois supérieure ou plus à la vitesse de la surface. Ce qui provoque des arrêts cycliques de l'outil sur des périodes pouvant représenter jusqu'à 50 % du temps de forage.

La gravité de ce phénomène peut aller jusqu'à l'arrêt complet du processus de forage, les variations de la vitesse de rotation étant considérées comme un indicateur fort de stick-slip [25].

De nombreuses études ont été faites sur le phénomène de stick-slip dont le but est de modifier les paramètres de forage pour réduire le stick-slip. Ce dernier se développe, notamment, lors de l'utilisation des trépan de type PDC, plus consommateur de couple que les outils tricônes. La figure II.5 représente l'enregistrement des RPM, ROP et WOB, basant sur la profondeur, au fond d'un puits foré par un trépan de type PDC. Tandis que la Figure II.6 montre l'état de trépan avant et après le stick-slip.

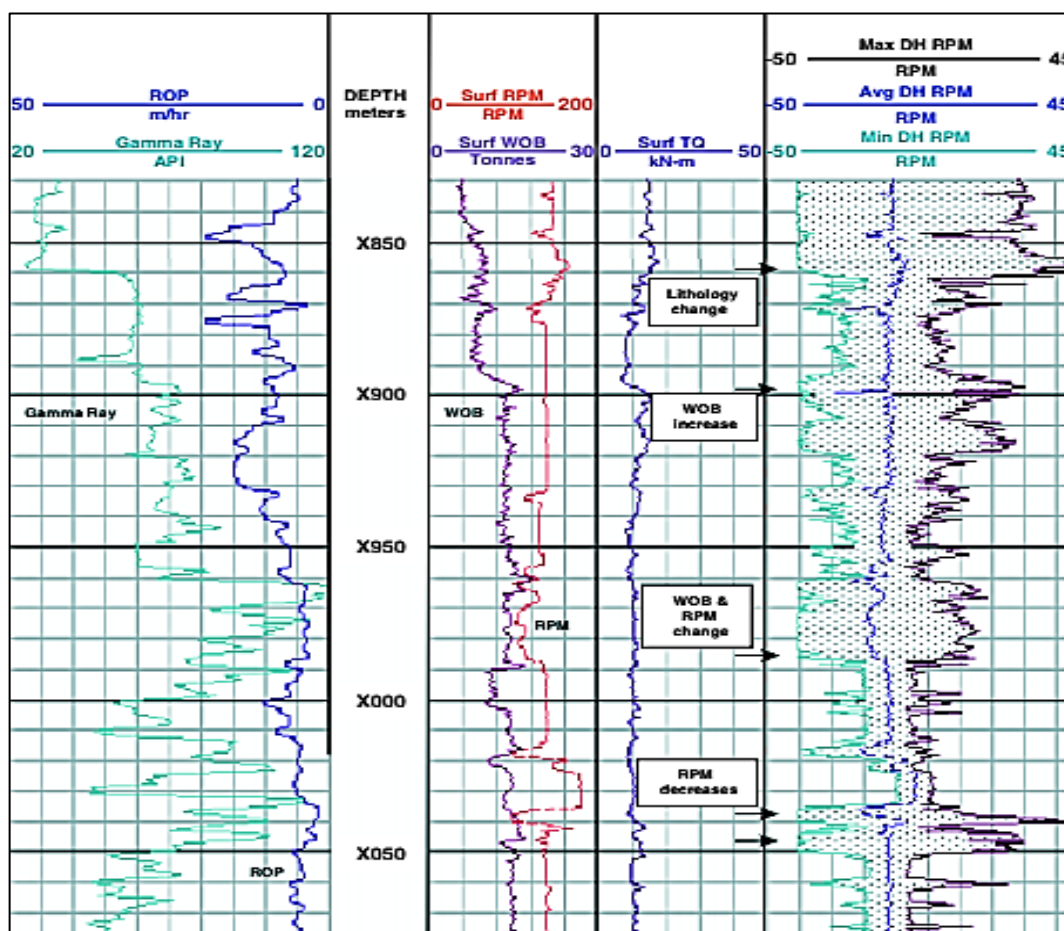


Figure II. 5 : Enregistrement des RPM, ROP et WOB basé sur la profondeur d'un puits vertical foré par trépan du type PDC.

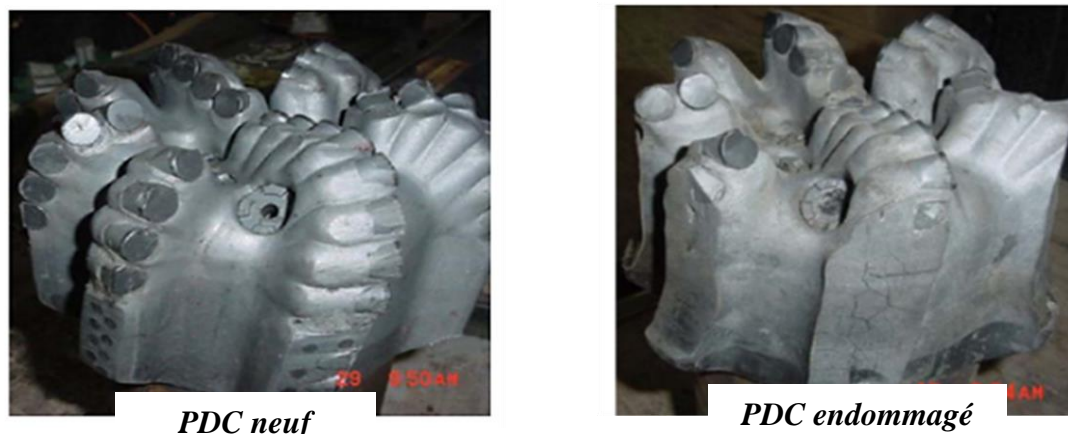


Figure II. 6 : L'état de l'outil ayant subi des vibrations sévères.

De nombreux travaux de simulations ont été effectués dans le cas des vibrations sévères. [29-31]. La figure II.7 montre un résultat de simulation d'une tige de forage, avec une vitesse angulaire désirée de 50 RPM, qui souffre des vibrations stick-slip.

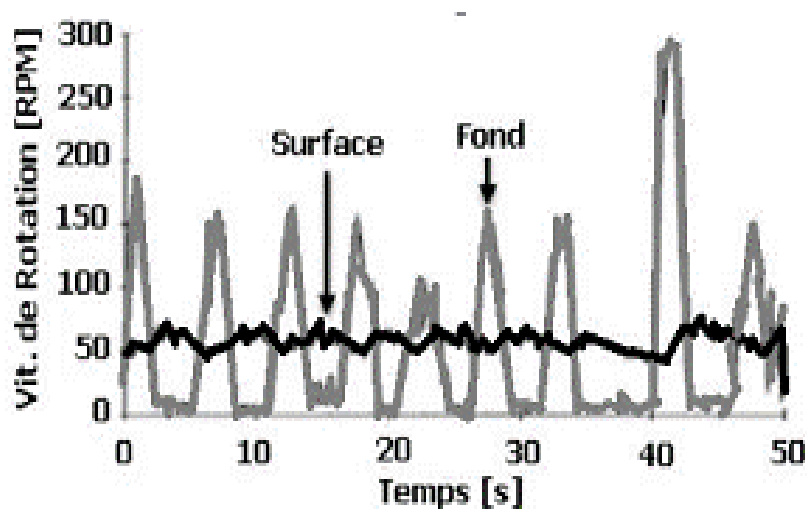


Figure II. 7 : Le phénomène du Stick-Slip d'une tige de forage.

La courbe en noir montre la vitesse de la table de rotation (en surface) qui varie entre 45 et 65 RPM (tr/min) et la courbe en gris montre la vitesse de rotation de l'outil (downhole).

On peut remarquer que la vitesse de rotation de l'outil peut atteindre 3 à 5 fois sa valeur nominale et avec une période d'oscillations de 1 à 5 sec (phase stick). Pendant cette période, l'outil arrive parfois à un arrêt complet tandis que dans le même temps, la table de rotation continue de tourner à une vitesse moyenne d'environ 55 RPM (tr/min), ce qui cause des fluctuations de torsion sur le train de tiges. Ce phénomène entraîne non seulement la défaillance

de l'outil due à une fatigue prématurée du train de tiges, mais aussi son usure prématurée en raison de sa vitesse élevée (Figure II.8) [32].

Ainsi, les vibrations de torsion peuvent :

- Provoquer une fatigue des connexions des masses tiges ;
- Ralentir l'opération de forage ;
- Prolonger ou augmenter la durée de processus global de forage.

Ces pulsations sont détectables en surface par les fluctuations de la puissance nécessaire (torque) pour maintenir un taux de rotation de surface constant.

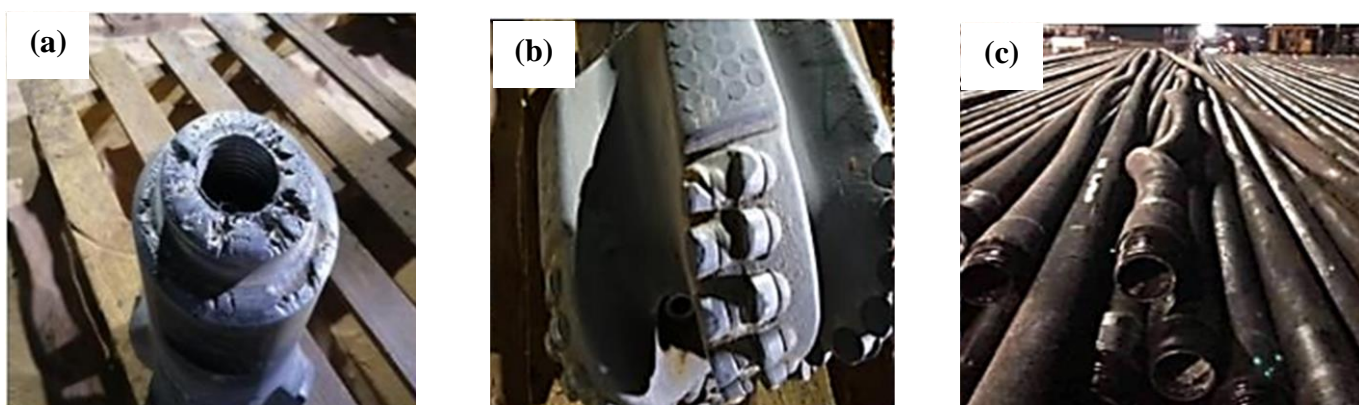


Figure II. 8 : (a) Rupture d'un outil, (b) Dents d'outil PDC endommagé et (c) Tige ayant subi des vibrations Sévères.

Pour éviter les vibrations de torsion et le phénomène de stick-slip, il est souvent conseillé d'augmenter la vitesse de rotation ou augmenter la rigidité de la garniture ou diminuer les forces de compression [33]. D'autres moyens plus sophistiqués consistent à détecter la présence de ces vibrations, le stick-slip en particulier, et à optimiser en temps réel les paramètres opératoires.

### 3.1. Détection de vibration de Stick-Slip

Les vibrations de stick-slip ont été détectées soit à la surface, soit au fond du trou.

#### 3.1.1. 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 déduction ROP irrégulière [34].

#### 3.1.2. 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

### 3.1.3. Preuve après exécution

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 cordons de forage, la déformation des couteaux de l'outil.

### 3.2. Paramètres affectant les vibrations de torsion

De nombreux paramètres affectent les vibrations de torsion et plus particulièrement le stick-slip qui fait l'objectif principal de notre travail. On peut classer ces paramètres en :

- Paramètres de forage ;
- Type de l'outil ;
- La lithologie ou la structure des puits.

#### 3.2.1. Effet des paramètres de forage

Des essais ont montré qu'une vitesse de rotation faible était un facteur favorable à l'apparition d'oscillations de torsion dans la garniture de forage, que l'outil soit au fond ou non. Pour chaque garniture et chaque état de puits donné, il existe une vitesse de rotation critique au-delà de laquelle les oscillations de torsion et en particulier le « stick slip » disparaissent [35].

Une augmentation du poids sur l'outil favorise le « stick slip » par augmentation des frottements dus au flambage de l'ensemble de fond. En réduisant le poids, l'entraînement de l'outil redevient plus régulier. Le poids sur l'outil et la vitesse de rotation critique sont en étroite relation, plus le poids est augmenté, plus il faut augmenter la rotation pour obtenir un régime régulier.

La Figure II.9 représente un exemple des plages des vibrations en fonction des paramètres de forage.

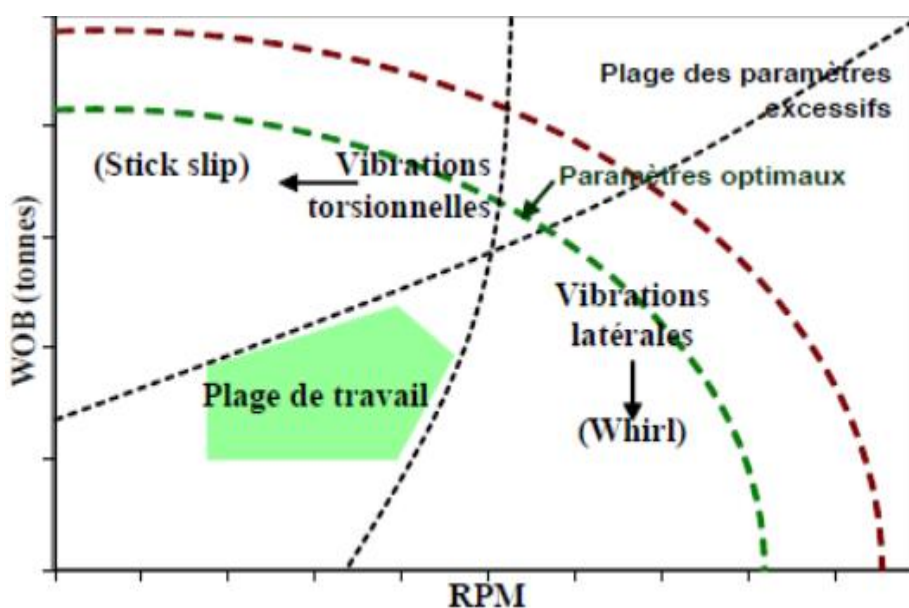


Figure II. 9 : Plages des vibrations en fonction des paramètres de forage.



### 3.2.2. Effet de type de l'outil

L'utilisation d'outil à lames : bilames, tri-lames provoquait des ondes de torsion d'une amplitude parfois très sévère. Avec l'abandon des outils à lames, le danger du au phénomène des oscillations de torsion a diminué sans jamais disparaître. Le stick slip était toujours présent surtout en carottage où la vitesse de rotation est relativement lente. Le stick slip est plus fréquent et plus sévère avec des outils PDC qu'avec des tricônes. L'outil PDC est sensible aux vibrations de torsion, par contre l'outil tricône est peu générateur d'onde de torsion [36]

### 3.2.3. Effet du puits

La lithologie a une influence indéniable sur les vibrations de torsion. Ainsi les formations hétérogènes font augmenter les frottements aux stabilisateurs. Le profil du puits conditionne les frottements mais aussi l'amortissement des vibrations.

L'instabilité d'un grand nombre de paramètre est la raison par laquelle la torsion accumulée dans la garniture varie en permanence.

## 4. Conséquences des vibrations

Lorsque l'amplitude des vibrations devient considérable, ces dernières peuvent provoquer de sérieux problèmes pour les foreurs. En effet des vibrations importantes et incontrôlées. Parmi les conséquences des vibrations on cite :

### 4.1. Endommagement des outils de forage

L'outil de forage est considéré comme l'élément le plus coûteux et le plus important de la garniture de forage. De plus, il représente, par sa structure de coupe diamantée, la partie la plus fragile de la garniture de forage, ce qui le rend vulnérable devant les phénomènes vibratoires sévères qu'il subit lors de destruction de la roche. Avec l'introduction des outils PDC, qui sont à la fois plus onéreuse et plus fragile que les outils tricônes surtout en gros diamètres, l'impact des vibrations s'est amplifié davantage.

### 4.2. Défaillance des équipements de fond

Les vibrations causent souvent l'usure excessive des stabilisateurs et augmentent la fatigue des tiges de forage. En outre, les vibrations endommagent les moteurs de fond dans les cas où l'on a envisagé d'utiliser ces derniers afin d'améliorer les performances de forage. Des outils de mesure des vibrations au fond du trou descendus lors du forage n'ont eux aussi pas résisté à l'ampleur de ces vibrations.

### 4.3. Augmentation du temps non productif

Le phénomène stick-slip réduit, non seulement, la durée de vie de l'outil, mais entraîne également une réduction du taux de pénétration (ROP), ce qui augmente le temps non productif et accroît les dépenses de développement [33].

## 5. Mesure des vibrations en cours de forage

Les sondes de mesure des vibrations utilisent trois axes qui font référence à un système comprenant la carte d'acquisition des vibrations et trois accéléromètres extérieurs faisant partie

de l'outil de mesure en cours de forage (MWD). Les trois accéléromètres sont montés de manière mutuellement orthogonale le long de l'axe central de l'outil. L'axe X mesure l'accélération latérale et radiale de la garniture de forage. L'axe Y mesure l'accélération latérale et tangentielle de la garniture de forage. Tandis que l'axe Z mesure l'accélération longitudinale (axiale) de la garniture de forage. Les données peuvent être transmises en temps réel par télémétrie de fond de trou.

Les nouveaux outils sophistiqués MWD (Measurement while drilling) sont extrêmement onéreux. Ils sont de plus particulièrement vulnérables aux vibrations (surtout les vibrations latérales).

L'identification et le contrôle des vibrations, et de manière plus générale, la compréhension et la maîtrise de la dynamique des systèmes de forage est un domaine d'intérêt considérable si l'on considère les économies importantes et les performances accrues qui peuvent être concrétisées.

### **6. Gestion des vibrations en temps réel**

La mesure des vibrations ou des paramètres de fond en temps réel par un outil MWD. L'analyse en temps réel des données du fond à l'aide des paramètres de surface nous permet de connaître la présence, la sévérité et le genre de vibration au fond du trou.

Après la détection de la présence des vibrations excessives au fond du puits, il faut suivre la procédure suivante :

- ✓ Informer déviateur / plancher de forage / superviseur / chef de chantier ;
- ✓ Ajuster les paramètres de forage et surveiller l'évolution des données de vibrations.

### **7. Atténuation du Stick & Slip**

Les approches permettant l'atténuation des vibrations peuvent être divisées en deux catégories : passives et actives.

#### **7.1. Les méthodes passives**

Ces méthodes sont groupées en trois sous catégories [33] :

##### **7.1.1. L'optimisation de l'assemblage de fond (BHA)**

L'optimisation de l'assemblage de fond (BHA) pour le stick & slip peut être réalisée en suivant les recommandations suivantes :

- ✓ **Utilisez des stabilisateurs sous-jauge :** (Under-gauge Stabilizers) de 1/8" à 1/16" pour réduire les forces de friction et le contact avec la paroi du trou de forage. Les stabilisateurs de jauge (Gauge stabilizers) augmentent les facteurs de friction et contribuent à l'augmentation des niveaux de stick-slip en raison des interactions avec le puits de forage ;
- ✓ **Types de stabilisateurs**
  - Utiliser de préférence les stabilisateurs à lames intégrales en spirale plutôt que les stabilisateurs à lames droites soudées, car ils offrent une meilleure stabilité et réduisent les vibrations ;

- Un angle et un profil, plus lisses, contribuent à la réduction des chances de générer des chocs et des phénomènes de stick-slip lors des interactions avec les formations géologiques ;
- Effectuer une analyse approfondie des propriétés du sol pour sélectionner les stabilisateurs appropriés en fonction des conditions du puits ;

✓ **Utilisation des réamères à rouleaux (Roller Reamers)**

L'ajout d'un rouleau de calibrage (Figure II.10) réduira la friction et le couple entre l'ensemble de l'assemblage de fond (BHA) et le trou de forage, réduisant ainsi les risques de génération de stick-slip.



Figure II. 10 : Réamère à rouleaux (Roller Reamers) [37].

En suivant ces recommandations, les assemblages du fond peuvent être optimisés ce qui contribue à la réduction des niveaux de stick-slip et l'amélioration des performances de forage.

**7.1.2. Le choix du trépan**

✓ **Fraises et lames de coupe (Cutters and Blades)**

L'utilisation d'un outil de forage avec plus de lames et des fraises plus petites contribue à minimiser le phénomène de stick-slip en réduisant les forces de friction et les contacts avec la paroi du trou de forage, mais ainsi en contrôlant la profondeur de pénétration ;

✓ **Angle de coupe arrière (Back-rake Angle)**

- L'angle de coupe arrière (Figure II.11) varie généralement entre 15 et 45 degrés (angle mesuré par rapport à la verticale) ;
- Un angle de coupe arrière plus bas entraîne une plus grande profondeur de coupe, une action plus agressive, un couple plus élevé et un potentiel de stick-slip plus élevé ;
- Un angle de coupe arrière plus élevé rend l'action moins agressive, réduisant ainsi le couple [38].

En augmentant l'angle de coupe arrière, on réduit le potentiel de stick-slip en réduisant l'action agressive des fraises et le couple associé. Cela contribue à une meilleure maîtrise du forage et à une réduction des vibrations indésirables.

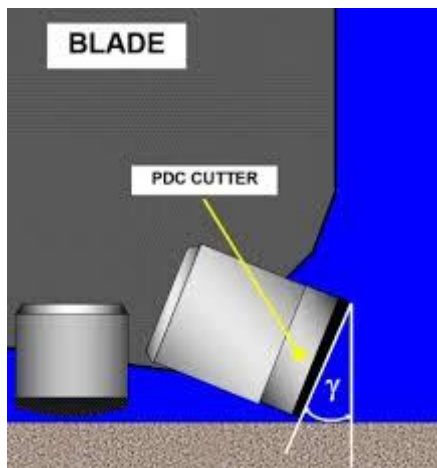


Figure II. 11 : Angle de coupe arrière (Back-rake Angle) [38].

✓ **Limiteurs de profondeur de coupe (Depth of cut limiters)**

Les limiteurs de profondeur de coupe (Figure II.12) limitent la pénétration des fraises dans la formation, ce qui réduit le couple.

Lorsque le phénomène de stick-slip est atténué à l'aide des limiteurs de profondeur de coupe, la charge sur le fond de trou (WOB) ne doit pas être réduite conformément aux directives habituelles. Par contre, il faut augmenter la charge sur le fond de trou pour enfoncer les fraises et permettre aux limiteurs de faire leur travail [39].

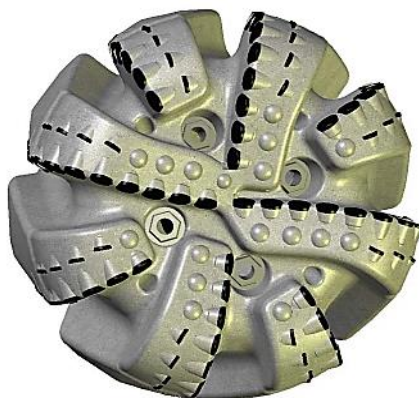


Figure II. 12 : Limiteurs de profondeur de coupe (Depth of cut limiters).

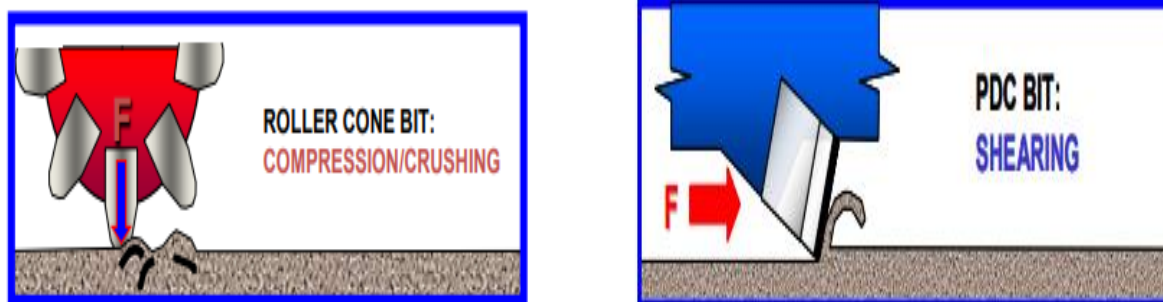
✓ **Calibre conique (Tapered Gauge)**

- L'utilisation d'un calibre conique peut contribuer à réduire les risques de phénomène de stick -slip en réduisant le couple généré dans la zone du patin de calibre supérieur ;
- Un calibre conique aidera à réduire le couple généré au niveau de la surface supérieure du calibre, permettant ainsi aux fraises de générer uniquement le couple nécessaire.

✓ **Outil de forage avec embout inséré (Insert Bit)**

Les embouts insérés à cône rouleur (Figure II.13(1)) ont une action de coupe différente des embouts PDC (Figure II.13(2)), qui coupent par cisaillement et peuvent générer un couple élevé.

- Les embouts insérés coupent par des actions de roulage et d'écrasement, et ne génèrent pas autant de couple ;
- Les embouts insérés génèrent moins de couple, ce qui peut contribuer à une meilleure maîtrise du forage et réduire les vibrations indésirables [39].



(1)

(2)

Figure II. 13 : (1) Outil rouleur avec embouts insérés. (2 ) Outil PDC.

**7.1.3. L'utilisation des équipements de fond.**

On prend par exemple les anti-stick-slip (Figure II.14) qui sont des outils mécaniques destinés à ajuster le couple de forage automatiquement et réduire les oscillations pour augmenter l'efficacité du forage [40].



Figure II. 14: Anti Stick-slip Tools ASST

Les figures II.15 et II.16 montrent, respectivement, l'état des outils et les paramètres de forage avant et après l'utilisation des Anti Stick-Slip Tools (ASST)

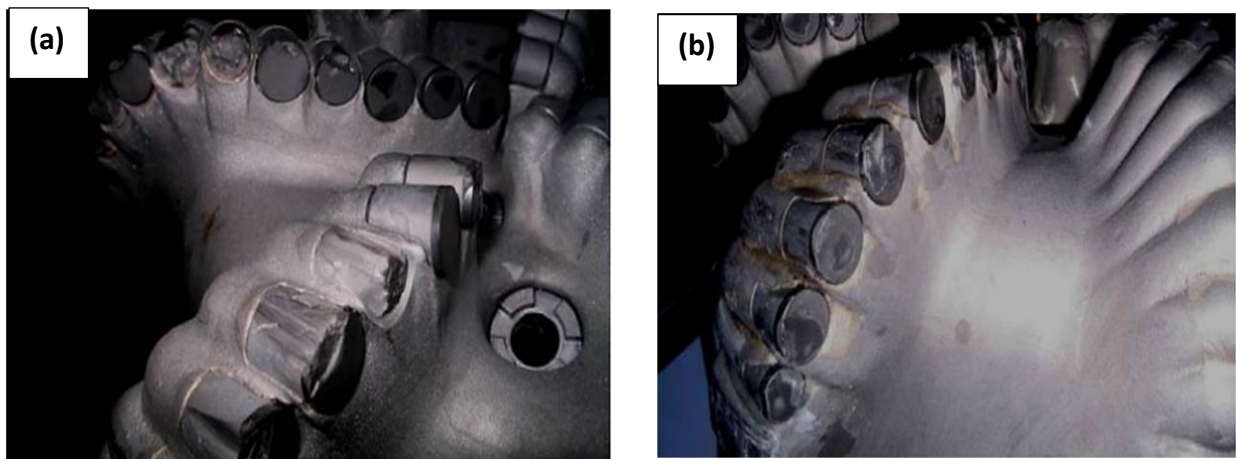


Figure II. 15 : Etat des dents de PDC (a) sans ASST et (b) avec ASST.

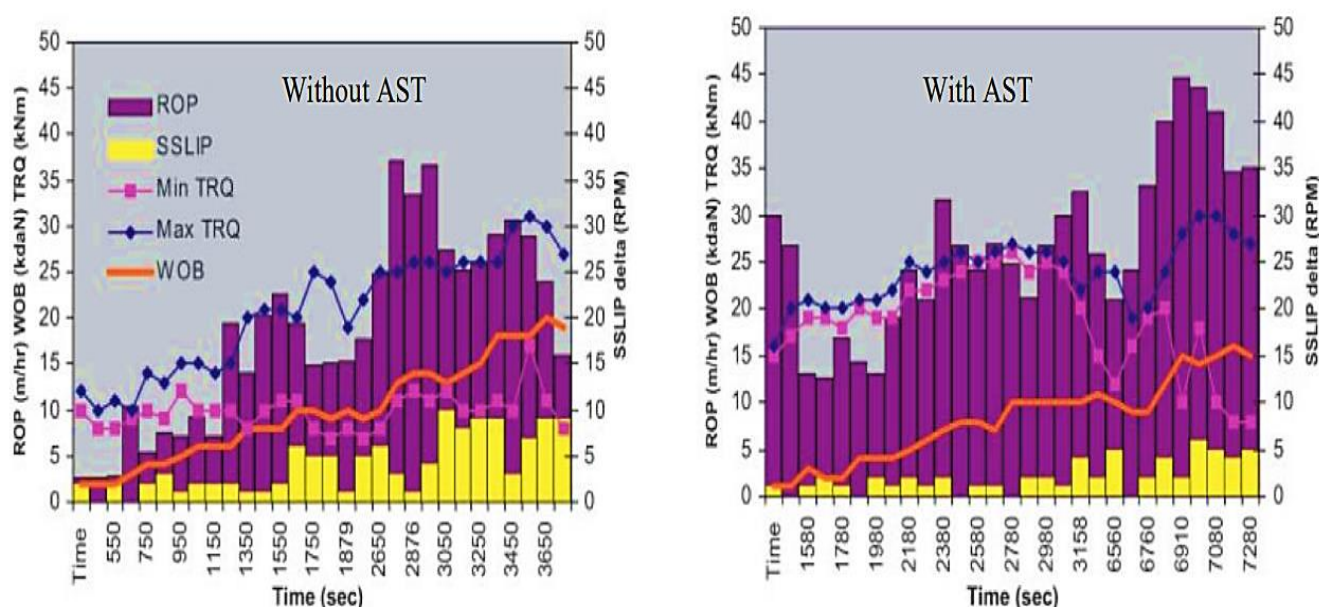


Figure II. 16 : Evolution des paramètres de forage avec et sans ASST.

## 7.2. Les méthodes actives

Ce sont des méthodes qui sont basées sur les techniques de contrôle. La technique la plus connue est « Soft Torque ». L'idée de cette technique est de faire tourner le système rotatif de surface très doucement. Pour la synthèse de ce régulateur, la dynamique du système est considérée comme un pendule de torsion à deux degrés de liberté, son premier mode de torsion peut être amorti par un régulateur PI basé sur les données de surface. Mais ces régulateurs ne peuvent pas toujours éliminer les vibrations de stick-slip spécialement pour les puits profonds et les puits inclinés. Une autre raison de ces échecs est l'incertitude (non-linéarité) dans l'interaction entre le trépan et la roche ainsi que le type de mesures utilisé (des mesures de fond ou celles de surface).

### 7.2.1. Paramètres de forages

#### ✓ Augmenter la vitesse de rotation de l'outil (RPM)

Augmenter RPM aidera à augmenter l'inertie de l'ensemble de forage et à surmonter le facteur de friction de la formation.

#### ✓ Réduire le poids sur le crochet (WOB)

- Réduire le poids sur le crochet entraîne un léger retrait des éléments de coupe de la formation, ce qui réduit le couple et les forces latérales sur l'ensemble fond de trou (BHA) ;
- La réduction du poids sur le crochet entraîne souvent une diminution du taux de pénétration (ROP).

**NB.** La modification de RPM et le poids sur le crochet (WOB) pour réduire les vibrations de type stick-slip peut entraîner d'autres types de vibrations encore plus destructrices, comme la rotation de l'ensemble fond de trou (BHA). Par conséquent, il est indispensable d'optimiser RPM et le poids sur le crochet (RPM/WOB) afin de maximiser le taux de pénétration (ROP).

#### 7.2.2. Nettoyage du puits

- Un mauvais nettoyage du puits, en particulier dans les puits avec des angles de 35 à 65° peut contribuer à induire le phénomène de stick-slip ;
- Les déblais peuvent s'accumuler autour de l'ensemble fond de trou (BHA), en particulier sur les ailettes des stabilisateurs, ce qui entrave la rotation de la colonne de forage et provoque le stick-slip.

#### 7.2.3. Relever hors du fond (Pick up off bottom)

- Relever l'outil de forage hors du fond du puits et arrêter la rotation de la colonne de forage est souvent la solution lorsque les niveaux de stick-slip sont élevés.
- Optimiser les tours par minute (RPM) et le poids sur le crochet (WOB) pour maximiser le taux de pénétration (ROP) afin de minimiser les vibrations de stick-slip.

#### 7.2.4. La lubrification de la boue

- Améliorer la lubrification de la boue aidera à "fluidifier" le trou de forage et à réduire les tendances de stick-slip.
- Utiliser des lubrifiants liquides lorsque cela est possible et d'augmenter le pourcentage d'huile peut aider.
- Dans certains cas, avec des boues à base d'huile, le stick-slip peut être accéléré par l'extrême "glissance" du système de boue.

### Conclusion

L'opération de forage est une opération industrielle immense qui a un coût très élevé. L'un des principaux facteurs qui limite les performances du processus de forage est la présence de violentes vibrations de type stick-slip dans le train de tiges ; ces vibrations réduisent la qualité du processus de forage, entraînant une usure prématurée de l'équipement de forage et, dans les cas extrêmes, provoquant la rupture du train de tiges et l'arrêt total des opérations de forage.

Pour ces raisons, l'atténuation de ces vibrations afin d'améliorer les performances de forage a fait l'objet d'une attention accrue de la part des chercheurs au cours, ainsi que d'un grand intérêt économique de la part des industries pétrolières. Par conséquent, pour optimiser l'opération de forage, il existe un paramètre principal à contrôler, le ROP. Pour cela il est nécessaire :

- ✓ D'éliminer les vibrations pour que le ROP ne tende pas vers zéro ;
- ✓ D'assurer un fonctionnement nominal du matériel pour minimiser le temps de maintenance ;



- ✓ D'assurer une bonne construction de puits pour qu'il reste robuste et solide ;
- ✓ D'adapter les paramètres de forage aux changements brusques et soudains de la formation.

La réalisation de ces objectifs nécessite au premier temps une maîtrise de l'environnement, c'est-à-dire qu'il nous faut des mesures réelles des paramètres, en particulier la vitesse angulaire du trépan. Dans ce contexte, il existe des capteurs très performants pour cette tâche, mais l'utilisation de ce type de dispositif augmente le coût et la possibilité d'occurrence de défaillances.

Pour contourner ces problèmes on va proposer un système intelligent pour la détection du phénomène stick-slip, et on va tester leurs performances pour assurer l'atténuation du ce phénomène.

## Chapitre III : Représentation des séries temporelles et apprentissage automatique.

### Une revue des algorithmes et leurs implémentations en python.

#### Introduction

Le domaine de forage pétrolier joue présente une importance économique majeure. Le succès de ce processus s'articule sur le bon fonctionnement de train de tiges. Ces derniers sont souvent confrontés au phénomène de stick-slip qui entraîne des problèmes liés au rendement, le coût, l'usure des parties essentielles dans l'appareil de forage. Pour atténuer le phénomène de stick-slip, il est crucial de le détecter et de le prévenir le plus rapidement possible, pour contrôler l'effet néfaste résultant. La meilleure méthode est de développer un système intelligent pour minimiser l'effet des vibrations. Le système intelligent utilise la représentation des séries temporelle et l'apprentissage automatique (machine learning). Ces méthodes sont étroitement liées. La représentation des séries temporelles permet de transformer les données de forage en une forme adéquate adaptée à l'apprentissage automatique.

#### 1. La méthode d'approximation par agrégats symboliques (SAX)

##### 1.1.Principe de l'algorithme

La méthode d'approximation par agrégats symboliques (SAX) est l'une des méthodes les plus puissantes de représentation symbolique des séries chronologiques. Cet algorithme a été proposé par Lin et al [41] transforme un signal à valeurs réelles ( $\mathbf{X}$ ) de longueur ( $\mathbf{n}$ ) en une chaîne de caractères de longueur arbitraire ( $\omega$ ), tel que ( $\omega \ll n$ ), en utilisant un alphabet ( $\mathbf{A}$ ) de taille  $\mathbf{a} > 2$ , par exemple **abbcaabc**, et une segmentation uniforme et une quantification basée sur des arguments probabilistes (Figure III.1).

SAX est une bonne représentation par rapport à d'autres aussi bien connues telles que Discrete Wavelet Transform (DWT) et Transformation de Fourier discrète (DFT), tout en dépensant moins d'espace de stockage.

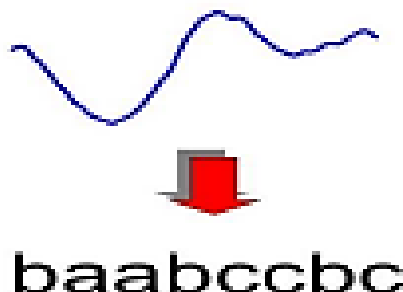


Figure III. 1 : Principe de SAX.

L'algorithme se compose de trois étapes :

- ✚ **La normalisation** : dans cette étape, les séries temporelles sont normalisées pour les mettre à une échelle commune ;
- ✚ **La réduction des dimensions ou approximation PAA**: après la normalisation, les séries temporelles sont transformées en PAA (Piecewise Aggregate Approximation). Cette étape sert à réduire la dimensionnalité de la série temporelle tout en préservant ces caractéristiques globales ;
- ✚ **Quantification symbolique** : cette troisième étape consiste à convertir la représentation PAA en une représentation symbolique discrète.

Ces étapes seront expliquées, brièvement, dans ce qui suit.

### 1.2. Normalisation

L'objectif de la normalisation est de mettre les séries temporelles à une échelle commune avant de procéder à la transformation en représentation symbolique.

La normalisation en SAX peut être réalisée, en suivant les étapes suivantes :

- a. **Calcul de la moyenne** : cette étape consiste à calculer la moyenne de la série temporelle tout en prenant la somme de toutes les valeurs de la série et en divisant par la longueur de la série.
- b. **Calcul de l'écart-type** : qui mesure la dispersion des valeurs de la série temporelle par rapport à la moyenne
- c. **Normalisation** : après avoir obtenu la moyenne et l'écart-type, chaque valeur de la série temporelle est normalisée en soustrayant la moyenne et en divisant par l'écart-type. Cela permet de mettre les valeurs de la série sur une échelle commune où la moyenne est centrée autour de zéro et l'écart type est égal à 1.

La formule de normalisation utilisée dans SAX est la suivante :

$$x_{norm} = (x - mean) / std \dots \dots \dots \text{III.1}$$

Où  $x$ : la valeur de la série temporelle ;

$mean$  : La moyenne de la série temporelle ;

$Std$  : L'écart-type.

### 1.3. Algorithme PAA (Piecewise Aggregate Approximation)

PAA est une méthode qui consiste à l'approximation par agrégats par morceaux et offrir l'avantage d'une réduction simple et efficace de la dimensionnalité. Dans l'PAA, la série temporelle est divisée en séries de taille égale et la valeur moyenne des points dans chaque série est calculée.

Le vecteur produit par la PAA qui a une dimension inférieure de la série temporelle, est le vecteur dont les composantes sont les moyennes des séries successives. La figure III.2 montre série temporelle avant et après réduction de dimension par PAA [42].

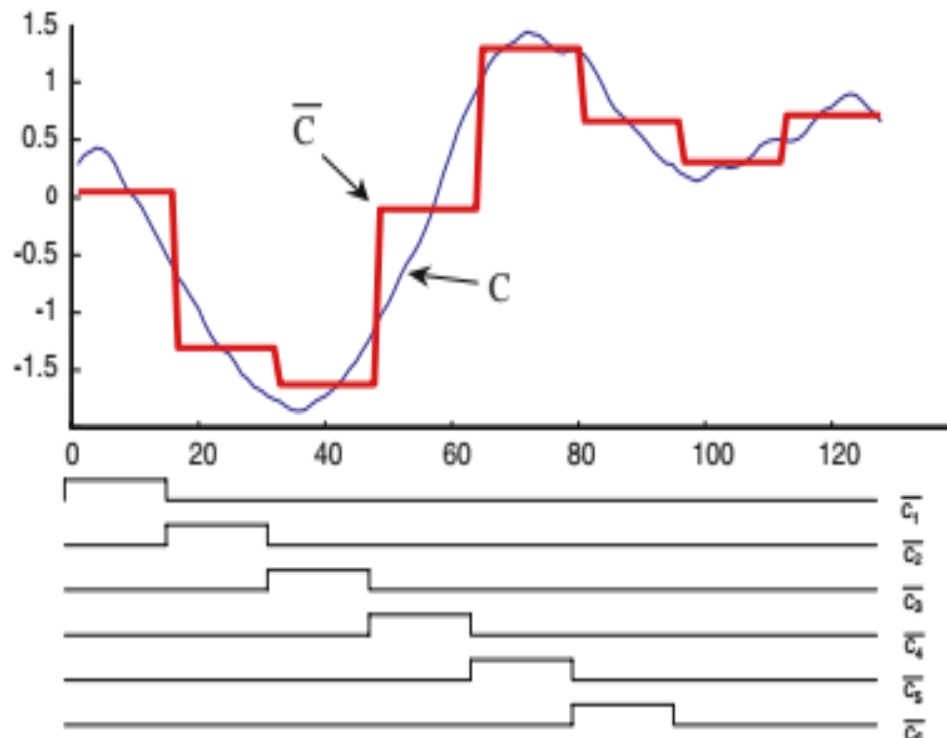


Figure III. 2 : Une série temporelle (en bleu) représentée par PAA (en rouge) [43].

SAX repose sur deux paramètres qui sont :

- La longueur ( $\omega$ ) de la séquence symbolique que l'on souhaite former ;
- Le nombre de symboles possibles ( $A$ ).

Après normalisation de chaque signal (moyenne nulle et variance unitaire), la procédure de SAX comporte deux étapes principales :

- a. L'axe des abscisses (celui du temps) est discrétisé en  $\omega$  segments de taille uniforme et on calcule la moyenne du signal sur chaque segment ;
- b. L'axe des ordonnées est discrétisé en  $A$  intervalles de quantification.

Ces intervalles sont construits de sorte que tous les symboles aient la même probabilité selon une distribution.

#### 1.4. Comment obtenir la représentation en SAX

Commençons par convertir la série temporelle en représentation PAA. Cette représentation de la série temporelle est ensuite discrétisée. La discrétisation de la représentation PAA d'une série temporelle (Figure III.3) est mise en œuvre de manière à produire des symboles correspondant aux caractéristiques de la série temporelle. Pour ce faire, il faut déterminer le nombre et l'emplacement des points de découpage. Le nombre de points

d'arrêt est lié à la taille souhaitée de chaîne symbolique (qui est choisie par l'utilisateur), c'est-à-dire *nombre de symbole (alphabet) est égale au nombre des points d'arrêt + 1*.

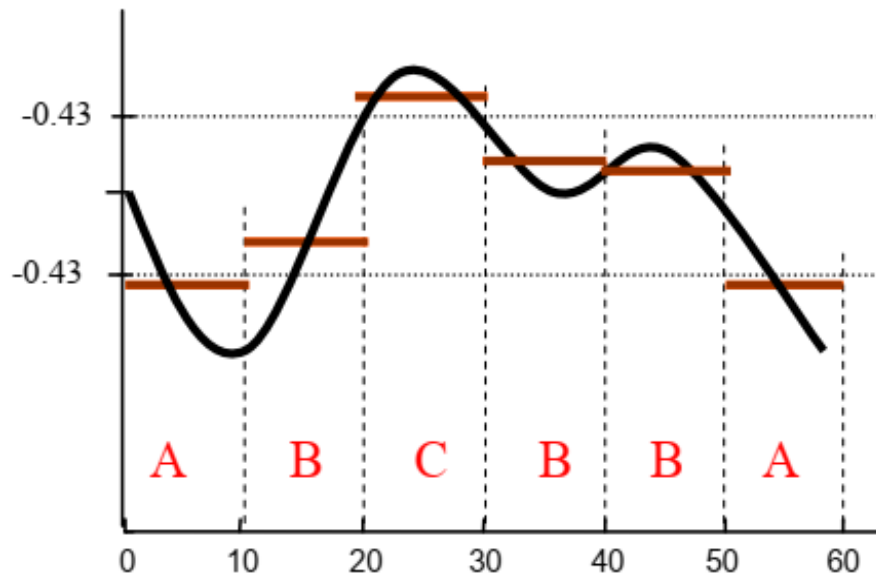


Figure III. 3 : La discrétisation de la représentation PAA d'une série temporelle [44].

Leurs emplacements sont déterminés par des tables de consultation statistiques de sorte

q1  
O  
l:  
sy  
II

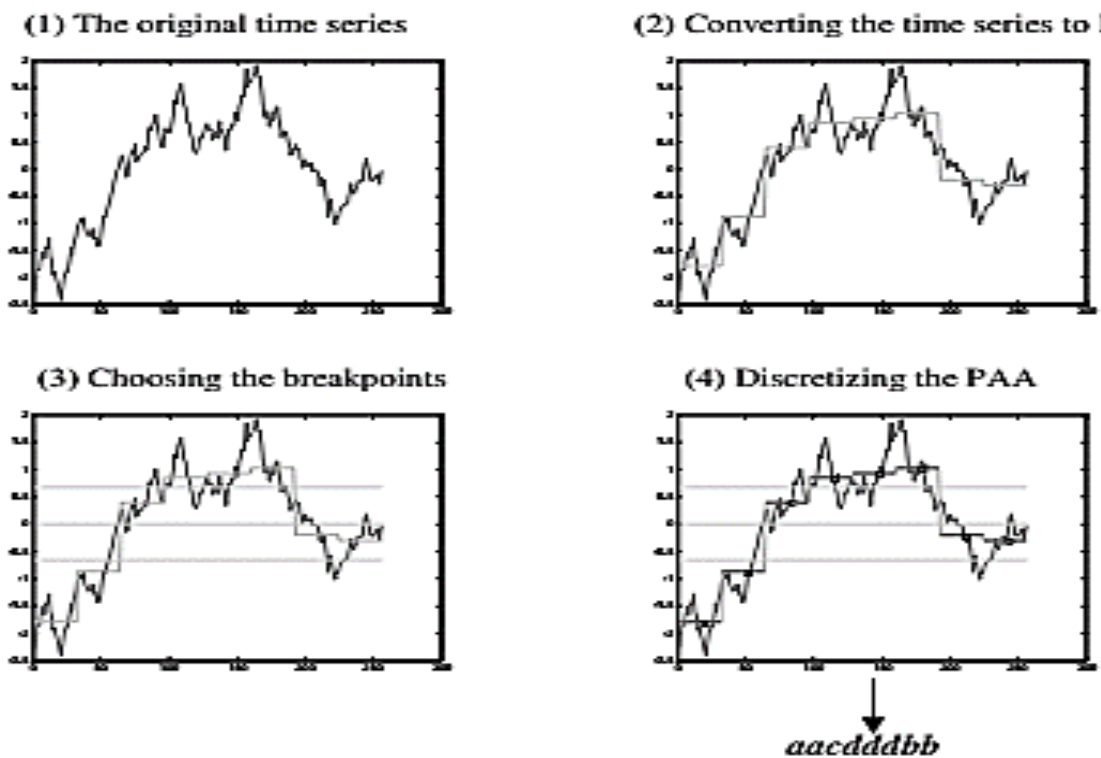


Figure III. 4 : Les différentes étapes de SAX [42].

### 1.5. Implémentations de la méthode SAX en python

Dans cette section, nous allons expliquer la mise en œuvre des différentes phases des méthodes SAX décrites dans la figure précédente.

#### 1.5.1. Importation des données de séries temporelles

Tout d'abord, nous allons lire et extraire les séries temporelles à partir de données de forage enregistrées dans un fichier csv, tout en utilisant le code suivant :

```
Data= pd.read_csv(r'C:\file location\filename.csv')
Ts1=Data[in1:in2, 1]
Ts2=Data[in1:in2, 2]
```

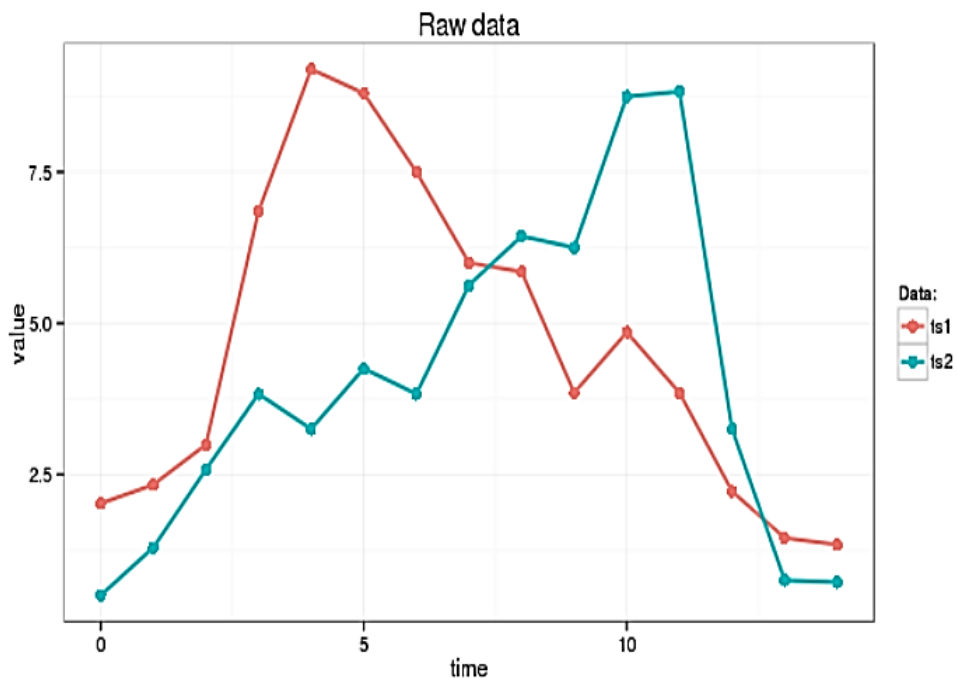


Figure III. 5 : Importation des données de séries temporelles [45].

Nous allons transformer ces deux séries temporelles (Figure III.5) en chaînes de longueur 9 dont les symboles proviennent de 4 alphabets ;

#### 1.5.2. Normalisation

Avant de transformer les séries temporelles avec SAX, les données doivent être normalisées via le code suivant :

```
znorm <- fonction(ts){
  ts.mean <- mean(ts)
  ts.dev <- sd(ts)
  (ts - ts.mean)/ts.dev }
ts1_znorm=znorm(ts1)
ts2_znorm=znorm(ts2)
```

Les résultats obtenus, après normalisation, sont présentés sur la Figure III.6.

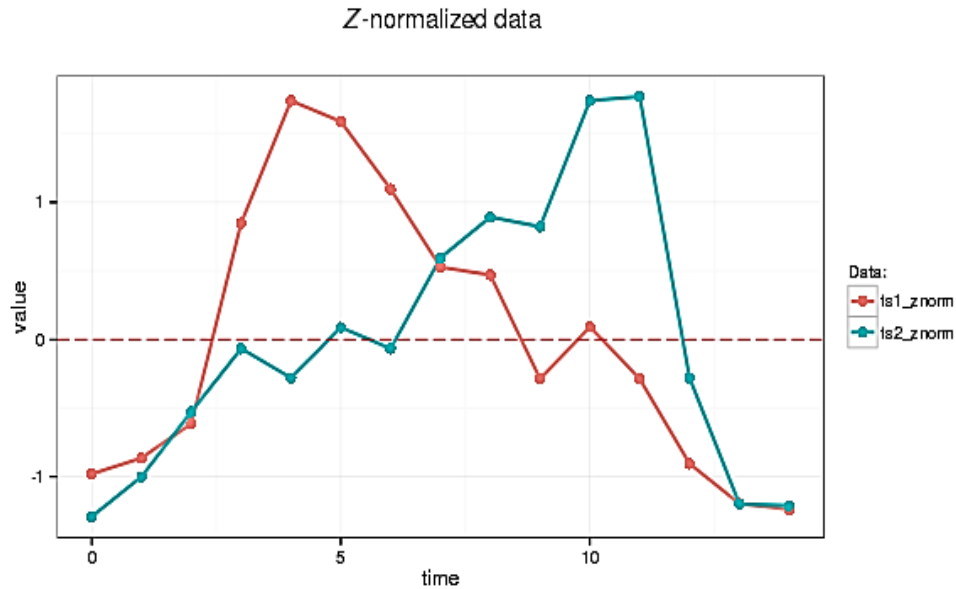


Figure III. 6 : Normalisation des données de séries temporelles [46].

### 1.5.3. Transformation de la série temporelle en une représentation PAA

L'étape qui suit la normalisation est la transformation de la série temporelle normalisée en une représentation PAA (Figure III.7) en utilisant le code suivant :

```
paa <- function(ts, paa_size){
  len = length(ts)
  if (len == paa_size) {
    ts
  }
  else {
    if (len %% paa_size == 0) {
      colMeans(matrix(ts, nrow=len %% paa_size, byrow=F))
    }
    else {
      res = rep.int(0, paa_size)
      for (i in c(0:(len * paa_size - 1))) {
        idx = i %% len + 1 # the spot
        pos = i %% paa_size + 1 # the col spot
        res[idx] = res[idx] + ts[pos]
      }
      for (i in c(1:paa_size)) {
        res[i] = res[i] / len
      }
      res
    }
  }
  paa_size=9
  s1_paa = paa(ts1_znorm,paa_size)
  s2_paa = paa(ts2_znorm,paa_size)
}
```

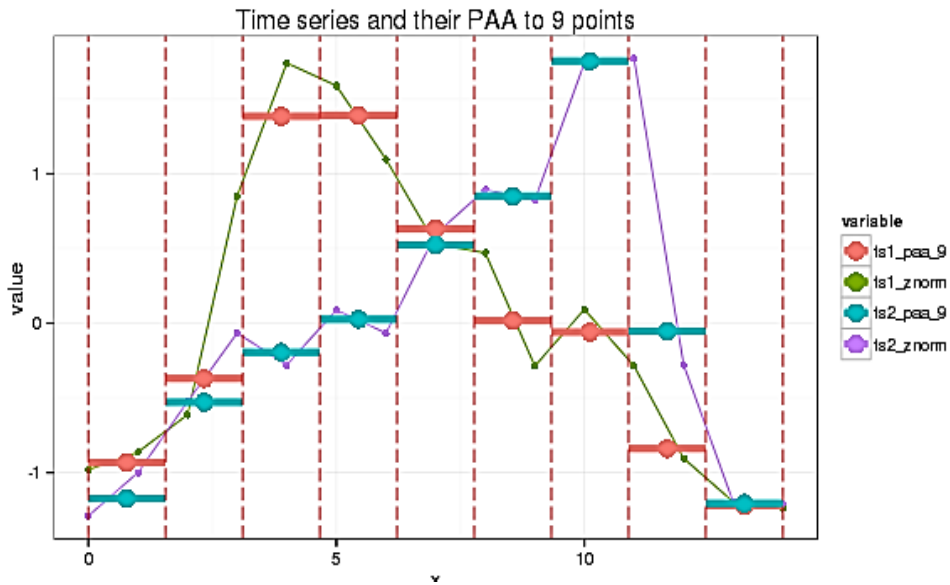


Figure III. 7 : Transformation de la série temporelle en une représentation PAA [46].

#### 1.5.4. Transformation de la représentation PAA en une chaîne symbolique

Dans cet exemple, on a utilisé quatre niveaux dont chaque niveau est représenté par un symbole parmi les 4 alphabets **{a,b,c,d}**. Les lignes de découpage sont représentées par les fines lignes bleues sur la figure ci-dessous.

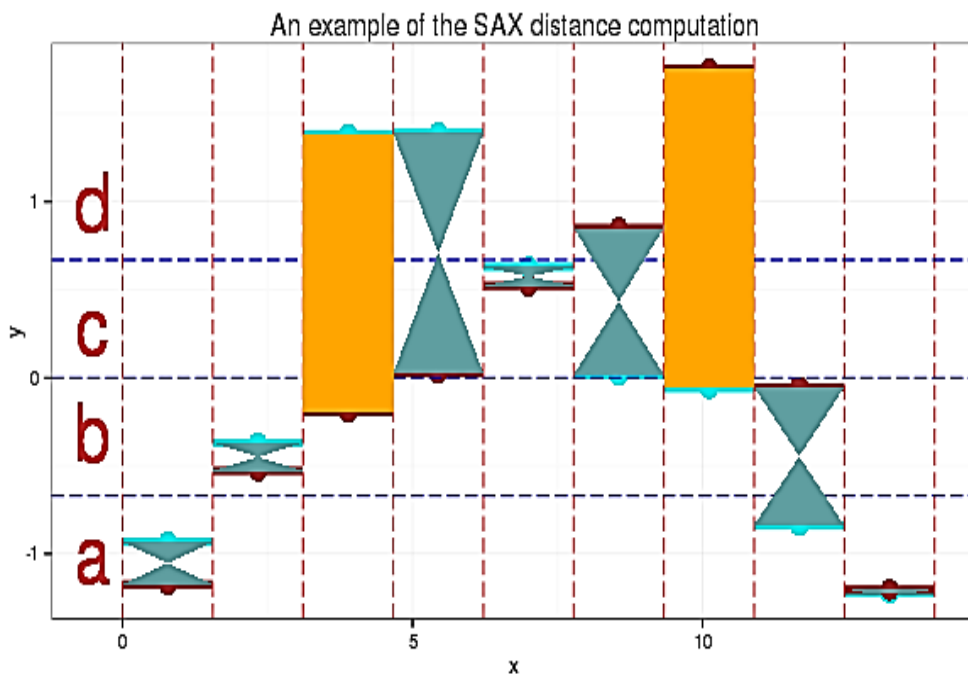


Figure III. 8 : Transformation de la représentation PAA en chaîne symbolique [46].



Le résultat de la transformation SAX de chaque série est le suivant :

- ✓ Transformation SAX de ts1 : "abddccbaa" ;
- ✓ Transformation SAX de ts2 : "abbccddba".

### 1.6.Exemple d'application

Dans cette partie, une série de 30 éléments a été choisie, c'est-à-dire que sa longueur est de 30. Chaque élément de cette série a une valeur. Le tableau III.1 représente l'échantillon, la série temporelle choisie.

Tableau III. 1 : Echantillon représentant une série temporelle

N° d'élément	La valeur de X	N° d'élément	La valeur de X
1	554.36	16	553.94
2	553.75	17	553.80
3	554.26	18	553.20
4	554.45	19	554.18
5	554.00	20	554.81
6	554.67	21	554.08
7	554.34	22	553.63
8	553.85	23	553.98
9	553.69	24	553.49
10	553.59	25	554.00
11	554.54	26	554.11
12	553.52	27	554.07
13	553.44	28	553.68
14	553.48	29	553.25
15	554.64	30	554.37

En ce moment, on rend cette série centrée réduite en appliquant les différentes étapes de la normalisation (calcul de la moyenne et de l'écart type) :

La moyenne

$$X = \frac{554.36+553.75+554.26+\dots+553.68+553.25+554.37}{30} = \frac{17.176.28}{30} = 572.54.$$

L'écart type :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2} \dots \dots \dots \text{III.2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} (554.36 - 572.54) \dots \dots \dots (554.37 - 572.54)^2}$$

$$\sigma = \sqrt{341.223}$$

$$= 18.472$$

Après, on doit remplacer chaque valeur (échantillon) par la valeur normalisée. Donc on doit appliquer sur chaque valeur la formule :

$$X' = \frac{x_i - X}{\sigma} \dots \dots \dots \text{III.3}$$

$$X' = \frac{554.36 - 572.54}{18.472} = -0.984$$

Donc la série deviennent normalisée, le tableau suivant présente la série normalisée :

Tableau III. 2 : La série après normalisation

N° d'élément	La valeur de X'	N° d'élément	La valeur de X'
1	-0.984	16	-0.906
2	-0.917	17	-0.014
3	-0.989	18	-0.046
4	-0.979	19	-0.993
5	-0.903	20	-0.959
6	-0.967	21	-0.999
7	-0.985	22	-0.023
8	-0.911	23	-0.904
9	-0.920	24	-0.931
10	-0.925	25	-0.903
11	-0.974	26	-0.997
12	-0.975	27	-0.999
13	-0.933	28	-0.966
14	-0.931	29	-0.990
15	-0.960	30	-0.983

Ensuite, on applique l'algorithme PAA avec un k = 6, c.à.d. qu'on va diviser notre série qui contient 30 valeurs par 5 segments dont chacun contient 6 valeurs. Après on calcule pour chaque segment sa moyenne, et on le remplace par celle-ci :

Exemple :  $X = \frac{-0.984 + (-1.017) + (-0.989) + (-0.979) + (-1.003) + (-0.967)}{6} = \frac{-5.939}{6} = -0.9893$

Le résultat obtenu après l'application de PAA est donné par le tableau III.3

Tableau III. 3 : La série après application de PAA.

N° de segment	Sa valeur
1	-0.989
2	-0.998
3	-0.915
4	-0.901
5	-0.989

On continue ce calcul jusqu'à la réduction de la taille de la série temporelle. La dimension de la série qui contient 30 valeurs a été diminuée jusqu'à 5 valeurs, ce qui nous montre l'intérêt essentielle de l'approche PAA.

Passant maintenant à la différence entre PAA et SAX qui a pour objectif de convertir les résultats numériques obtenus de l'approche PAA aux symboles comme expliqué précédemment (chaque intervalle de moyenne a été remplacé par un symbole). Dans ce cas, la série choisie comme exemple sera après l'application de l'algorithme SAX de la forme donnée sur le tableau III.4:

Tableau III. 4 : la série temporelle après application de l'algorithme SAX.

N° de segment	Son symbole
1	A
2	B
3	B
4	D
5	C

## 2. L'apprentissage automatique

### 2.1. Définition

*La Machine Learning* est une branche de l'intelligence artificielle qui a pour but de donner la possibilité aux ordinateurs d'apprendre à partir des données et d'améliorer leurs performances sans être explicitement programmés. Un ordinateur n'est pas intelligent, il ne fait qu'exécuter des tâches. On lui décrit sous forme de programmes quoi faire et comment le faire. C'est ce qu'on appelle la *programmation*.

La Machine Learning traite des sujets complexes et des problèmes difficiles à résoudre, où la programmation traditionnelle trouve ses limites. Cela étant dû aux nombres infinis des cas possibles à traiter. ML (Machine Learning) traite cette problématique différemment. Au lieu de

décrire quoi faire, le programme apprendra par lui-même comment conduire en “observant” des expérimentations.

Machine Learning : Donner la possibilité à l’ordinateur d’apprendre sans être programmé. En fonction des données d’expérimentation que prendra l’algorithme d’apprentissage en entrée, il déduira par lui-même une hypothèse de fonctionnement. Il utilisera cette dernière pour de nouveaux cas, et affinera son expérience au fil du temps.

L’un des aspects les plus puissants du ML est sa capacité à traiter des données complexes et hétérogènes telles que les images, les séries temporelles...etc.

## 2.2.Types d'apprentissage automatique

On distingue deux types de problèmes en ML :

- ✚ Apprentissage Supervisé (Supervised Learning) ;
- ✚ Apprentissage Non supervisé (unsupervised Learning).

### 2.2.1. Apprentissage supervisé

L’apprentissage supervisé est le concept derrière plusieurs applications sympas de nos jours : reconnaissance faciale de nos photos par les smart phones, filtres anti-spam des emails, etc. [47].

Cette branche d’apprentissage automatique s’intéresse à apprendre à faire des prédictions à partir de la connaissance fournie par  $N$  observations étiquetées, c’est-à-dire accompagnées de la valeur à prédire. Il s’agit alors d’utiliser un ensemble de données contenant  $N$  observations ;  $\{\vec{x}_i\}_{i=1,\dots,N}$  décrites dans l’espace  $E$ , accompagnés de leurs réponses  $\{\vec{y}_i\}_{i=1,\dots,N}$  décrites dans l’espace  $F$  pour construire une fonction de prédiction  $f : E \rightarrow F$  telle que, pour tout couple  $(\vec{x}_i, \vec{y}_i) \in E \times F$ ,  $f(\vec{x}_i) \approx \vec{y}_i$

Les observations ou caractéristiques (features en anglais)  $\vec{x}_i$  peuvent être des valeurs numériques, alphanumériques, des images...etc. Quant à la variable prédite  $\vec{y}_i$ , elle peut être de deux catégories :

- a. **Variable discrète** : La variable à prédire peut prendre une valeur d’un ensemble fini de valeurs (qu’on appelle des classes). Par exemple, pour prédire si un mail est SPAM ou non, la variable  $\vec{y}_i$  peut prendre deux valeurs possibles :  $\vec{y}_i \in \{\text{SPAM}, \text{NON SPAM}\}$  ;
- b. **Variable continue** : La variable  $\vec{y}_i$  peut prendre n’importe quelle valeur. Pour illustrer cette notion, on peut penser à un algorithme qui prend en entrée des caractéristiques d’un véhicule, et tentera de prédire le prix du véhicule (la variable  $\vec{y}_i$ )

La fonction  $f$  associe alors à chaque observation  $x$  à une des classes. Les frontières entre classes sont appelées frontières de séparation. Si la cible  $y$  ne prend que deux valeurs  $y = \{0,1\}$  ou  $y = \{-1, +1\}$  alors on parle de classification binaire, autrement ; si  $|y| > 2$  la classification est dite multi-classe. La Figure III.9 illustre un problème de classification.

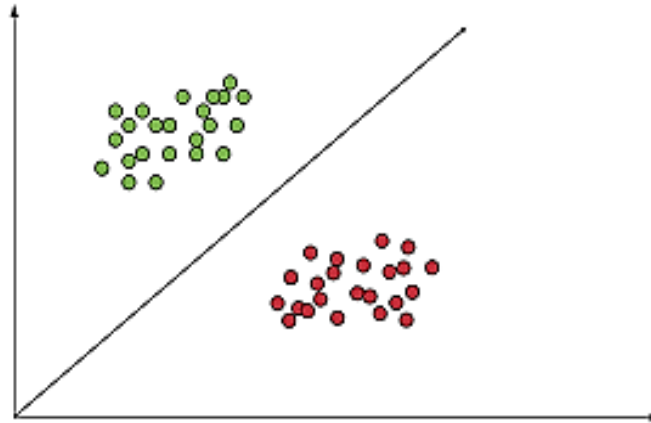


Figure III. 9 : Illustration de la classification supervisée [48].

### 2.2.2. Apprentissage non supervisé

A l'inverse de l'apprentissage supervisé (Supervised Learning) qui tente de trouver un modèle depuis des données labellisées  $f(x) \rightarrow y$ , l'apprentissage non supervisé prend uniquement des données sans label (pas de variable à prédire  $y$ ) (Figure III.10).

Un algorithme d'apprentissage non supervisé va trouver des patterns ou une structuration dans les données. Les algorithmes de clustering rentrent dans la catégorie d'apprentissage non supervisé. Ils permettent de regrouper en des ensembles, les données qui sont similaires [47].

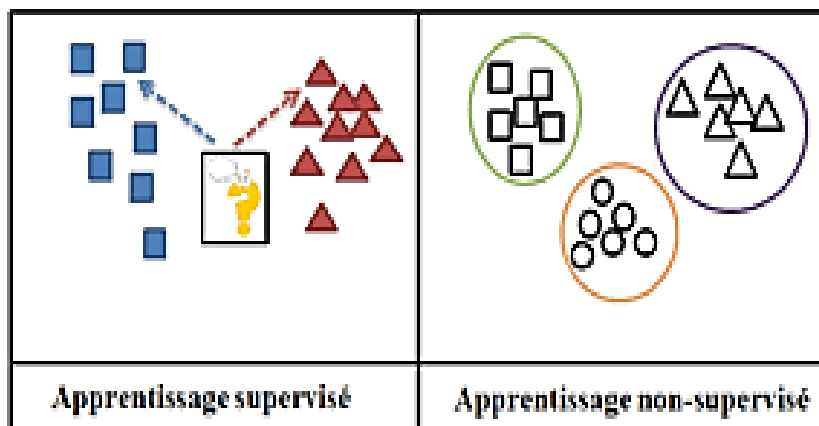


Figure III. 10 : Exemple de concept des deux types d'apprentissage [49].

## 3. Les algorithmes d'apprentissage supervisé

Les algorithmes d'apprentissage supervisé représentent les méthodes utilisées en intelligence artificielle et en ML pour résoudre des problèmes de prédiction ou de classification.

Ces algorithmes sont appelés « *supervisés* » car ils nécessitent un ensemble de données préalablement étiquetées, c'est-à-dire des données pour lesquelles les valeurs de sorties souhaitées sont connues. Donc, l'objectif de ces algorithmes est d'apprendre à partir de ces données pour prédire les sorties correctes pour de nouvelles données non étiquetées, comme expliqué précédemment (2.2.1). Dans ce qui suit, les algorithmes couramment utilisés seront présentés.

### 3.1. Les Algorithmes de classification

Quand la variable à prédire prend une valeur discrète, on parle d'un problème de classification. Parmi les algorithmes de classification, on retrouve : Support Vector Machine (SVM), Réseaux de neurones, Naïve Bayes, Logistic Regression...etc. Chaque algorithme de ses algorithmes a ses propres propriétés mathématiques et statistiques [52].

#### 3.1.1. Les machines à vecteurs support SVM

Les machines à vecteurs support souvent traduits par l'appellation de Séparateur à Vaste Marge (SVM) sont des puissants algorithmes d'apprentissage supervisé développé par Vapnik [50] dans les années 1990 pour la classification supervisée.

Le SVM appartient à la catégorie des classificateurs linéaires, qui utilisent une séparation linéaire des données, et qui dispose de sa méthode à lui pour trouver la frontière entre les catégories. Pour que le SVM puisse trouver cette frontière, il est nécessaire de lui donner des données d'entraînement. A partir de ces données, le SVM va estimer l'emplacement le plus plausible de la frontière : c'est la période d'entraînement, nécessaire à tout algorithme d'apprentissage automatique.

Une fois la phase d'entraînement terminée, le SVM a ainsi trouvé, à partir de données d'entraînement, l'emplacement supposé de la frontière. En quelque sorte, il a « appris » l'emplacement de la frontière grâce aux données d'entraînement. Le SVM est maintenant capable de prédire à quelle catégorie appartient une entrée qu'il n'avait jamais vue avant, et sans intervention humaine : c'est là tout l'intérêt de l'apprentissage automatique.

#### 3.1.2. La prédiction avec SVM

Dans le cas de la discrimination d'une variable dichotomique, les machines à vecteurs support visent à construire une fonction de décision associant à chaque observation sa classe, et minimisant pour chaque observation la probabilité d'erreur. En supposant que nous disposons de N observations d'entraînement réparties en deux classes linéairement séparables, notées  $(x_i, y_i)$  avec  $y_i \in \{-1, 1\}$ , la Figure révèle qu'il existe une infinité d'hyperplans séparateurs qui ne font aucune erreur de classification des données d'apprentissage et qui vérifient pour tout i entre 1 et N :

$$w \cdot x_i + b > 0 \text{ si } y_n = 1 \dots\dots\dots\text{III.4}$$

$$w \cdot x_i + b < 0 \text{ si } y_n = -1 \dots\dots\dots\text{III.5}$$

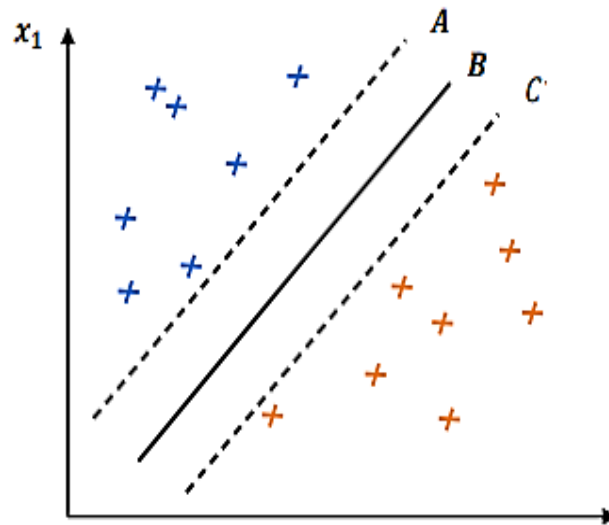


Figure III. 11 : Infinité d'hyperplans séparent les deux classes : points négatifs et points positive [51].

Il est évident que les trois hyper plans décrits dans Figure III.11 offrent exactement les mêmes scores de classification, mais l'hyperplan séparateur *B* semble le plus préférable, car celui-ci, étant équidistant de l'observation colorée en orange la plus proche et de l'observation colorée en bleu la plus proche. En plus de l'hyperplan optimal *B*, nous pouvons définir l'hyperplan séparateur *A* et l'hyperplan *C*. Ces deux hyperplans sont parallèles l'hyperplan *B* et situés à une distance *m* de part et d'autre. Sachant que l'hyperplan optimal *B* que nous cherchons a pour équation  $w \cdot x_i + b = 0$ , l'équation de l'hyperplan *A* et donc s'écrit comme suit :

$$w \cdot x_i + b = M \dots \dots \dots \text{III.6}$$

*A* étant symétrique de *B* par rapport à son équation est alors :

$$w \cdot x_i + b = -M \dots \dots \dots \text{III.7}$$

On peut fixer  $M=1$  de la façon que tous les points positifs de notre jeu d'apprentissage vérifient  $w \cdot x_i + b \geq 1$ . De même, les observations négatives vérifient toutes  $w \cdot x_i + b \leq -1$ .

Nous cherchons donc ici à maximiser la marge *m* (la distance entre les frontières de décision et l'observation d'entraînement la plus proche) de classificateur qu'est équivalent à maximiser la distance entre l'observation colorée en bleu  $x_+^*$  et l'observation colorée en orange  $x_-^*$  situés à une distance *m* de l'hyperplan séparateur *B*. Cette notion de marge offre un bon critère de choix des classificateurs en admettant que maximiser la marge de ces derniers soit identique à maximiser ses chances de généraliser et donc minimise la probabilité d'erreur de classification.

La projection orthogonale du vecteur distance  $x^{+*} - x^{-*}$  sur l'hyperplan  $B$  est donnée par :

$$(x^{+*} - x^{-*}) \frac{w}{\|w\|} = \frac{1}{\|w\|} \dots \text{III.8}$$

Le problème que doivent résoudre les machines à vecteurs support est formulé comme suit [49] :

$$\min_{w,B} \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad \text{sous contrainte } y_i (w^T \cdot x_i + b) \geq 1$$

### 3.1.3. Implémentation de SVM en Python

Après avoir compris les bases du SVM, on va expliquer dans cette section l'implémentation en Python. Cette dernière est très simple et directe avec le package SVM de Scikit Learn. Elle se fait en plusieurs étapes, comme décrit ci-dessous :

#### a. Importation de l'ensemble de données

L'importation de l'ensemble de données se fait via le code suivant :

```
import pandas as pd
data = pd.read_csv(r'C:\file location\filename.csv')
```

#### b. Division et ajustement des données d'entraînement d'apprentissage et de test

```
from sklearn.model_selection import train_test_split
training_set, test_set = train_test_split(data, test_size = 0.2, random_state = 1)
X_train = training_set.iloc[:,0:2].values
Y_train = training_set.iloc[:,2].values
X_test = test_set.iloc[:,0:2].values
Y_test = test_set.iloc[:,2].values
```

#### c. Initialisation de la fonction SVM

```
from sklearn.svm import SVC
classfier = SVC(kernel='rbf', random_state = 1)
classfier.fit(X_train,Y_train)X_test = test_set.iloc[:,0:2].values
```

#### d. Prédire les classes pour l'ensemble de test

```
Y_pred = classfier.predict(X_test)
```



### 3.2.L'arbre de décision

#### 3.2.1. Définition

L'apprentissage par arbre de décision désigne une méthode basée sur l'utilisation d'un arbre de décision comme modèle prédictif. C'est une méthode d'apprentissage automatique qui s'intéresse à expliquer une valeur  $y$  à partir d'un ensemble de variables  $X$ , et visualiser les résultats dans une structure arborescente. Les valeurs de  $y$  peuvent être discrètes (*arbre de classification*) ou continues (*arbre de régression*).

Dans ces structures d'arbre, les feuilles représentent les valeurs de la variable cible et les embranchements correspondent à des combinaisons de variables d'entrée qui mènent à ces valeurs. En analyse de décision, un arbre de décision peut être utilisé pour représenter de manière explicite les décisions réalisées et les processus qui les amènent. En apprentissage et en fouille de données, un arbre de décision décrit les données mais pas les décisions elles-mêmes, l'arbre serait utilisé comme point de départ au processus de décision.

C'est une technique d'apprentissage supervisé : on utilise un ensemble de données pour lesquelles on connaît la valeur de la variable-cible afin de construire l'arbre (données dites étiquetées), puis on extrapole les résultats à l'ensemble des données de test. Les arbres de décision font partie des algorithmes les plus populaires en apprentissage automatique.

Les principaux composants d'un arbre de décision sont les nœuds et les branches comme le montre la Figure III.12.

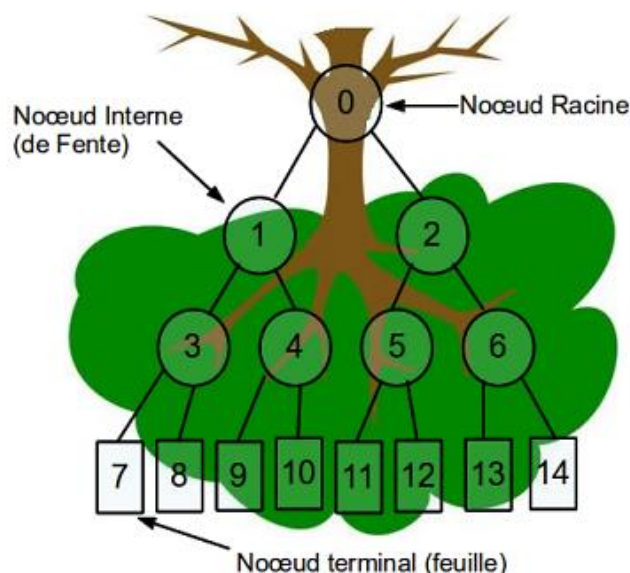


Figure III. 12 : Arbre de décision. Inspiré de [53].

### 3.2.2. Les avantages et les inconvénients des arbres de décision

#### a. Avantages

- La simplicité de compréhension et d'interprétation.
- Peu de préparation des données (pas de normalisation, de valeurs vides à supprimer, ou de variable muette).
- Le modèle peut gérer à la fois des valeurs numériques et des catégories.
- Performant sur de grands jeux de données

#### b. Inconvénients

- L'apprentissage par arbre de décision peut amener des arbres de décision très complexes, qui généralisent mal l'ensemble d'apprentissage.
- Lorsque les données incluent des attributs ayant plusieurs niveaux, le gain d'information dans l'arbre est biaisé en faveur de ces attributs

### 3.2.3. Les principaux composants d'un arbre de décision

- **Un nœud racine**, également appelé nœud de décision, représente le premier nœud qui entraînera la partition de toutes les observations de la base des données en deux ou plusieurs sous-ensembles mutuellement exclusifs ;
- **Les nœuds internes**, également appelés nœuds de décision, sont les nœuds situés entre le nœud racine et la feuille, étiquetés par des règles de décision qui correspondent aux attributs ;
- **Le nœud feuille**, également appelé nœud de sortie, représente le résultat final d'une combinaison de règles de décision ou d'événements ;
- **Branches**, représentent les réponses possibles aux règles de décision ou des occurrences qui émanent des nœuds internes et le nœud racine. Pour prédire l'étiquette d'une observation, le modèle d'arbre de décision est formé en utilisant une hiérarchie de branches.

Chaque chemin depuis la racine de l'arbre jusqu'à la feuille représente une série successive des règles de décision. Ces voies d'arbre de décision peuvent également être représentées sous forme de règles « si-alors ». Par exemple, « si la condition 1 et la condition 2 et la condition... et la condition  $j$  se produisent, le résultat  $k$  se produit. »

Considérons un ensemble des données d'apprentissage  $S$  caractérisé par  $n$  classes  $C_1, C_2, \dots, C_n$  et  $p$  variables d'entrée ou attributs  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . Il existe de nombreux arbres de décision qui peuvent être construits à partir l'ensemble d'apprentissage  $S$ . Pour trouver l'arbre le plus précis parmi ces arbres, les algorithmes de construction de l'arbre de décision utilisent généralement une stratégie qui cherche d'abord à identifier quelle variable d'entrée peut offrir le meilleur partitionnement des observations des données à partir le nœud racine.

L'algorithme poursuit le partitionnement récursif des données de décision pour définir l'arborescence de l'arbre de décision en sélectionnant à chaque nœud de décision les variables

séparatrices, de la plus discriminante à la moins discriminante. Cette procédure de séparation se poursuit jusqu'à ce les critères d'arrêt soient satisfaits.

Le concept employé pour le sectionnement de l'attribut de décision  $X$  qui discrimine mieux l'ensemble des données dépend de l'algorithme de construction des arbres de décision utilisé. Les algorithmes C4.5 et ID3 par exemple, emploient respectivement le gain d'informations et le rapport de gain, ces deux critères de division se basent sur le même concept nommé concept d'entropie. Tandis que l'algorithme CART se base sur un autre concept appelé index de Gini.

### 3.3. Entropie et gain d'informations

#### 3.3.1. Le concept d'entropie

Le concept d'entropie utilisé dans un algorithme d'apprentissage automatique est issu du domaine de la théorie de l'information. Considérons un ensemble des données  $S$  composé de  $m$  observations et caractérisé par  $n$  classes ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ). L'entropie de l'ensemble  $S$  mesure le degré de mélange des classes  $E(S)$  qu'il peut apporter par l'équation suivante :

$$E(S) = -\sum_{i=1}^n P_i \log P_i \dots\dots\dots \text{III.9}$$

Avec  $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$  est une distribution de probabilité de l'ensemble  $S$  définie par :

$$P_i = \frac{\text{frequence des observations appartenant à la classe } C_i}{\text{nombre des observations de } S} \dots\dots\dots \text{III.10}$$

Supposons que l'ensemble des données  $S$  est en plus partitionné en  $d$  sous-ensembles ( $S_1, S_2, \dots, S_d$ ) par un attribut  $X$ , où  $d$  correspond au nombre de valeurs d'un attribut  $X$ .

L'entropie  $E(X, S)$  dans ce cas est calculée par l'expression suivante :

$$(X, S) = -\sum_{j=1}^d P_j \log E(S_j) \dots\dots\dots \text{III.11}$$

Avec :

$$P_j = \frac{\text{nombre des observations de } S_j}{\text{nombre des observations de } S} \dots\dots\dots \text{III.12}$$

#### 3.3.2. Cas de deux classes

Dans le cas où l'ensemble  $S$  des données est caractérisé seulement par deux classes, l'équation de l'entropie de cet ensemble devient :

$$E(S) = -P_1 \log(P_1) - P_2 \log(P_2) \dots\dots\dots \text{III.13}$$

La Figure III.13 décrit la fonction d'entropie dans le cas d'une classification binaire, où l'axe des abscisses représente la proportion des observations appartenant la classe  $C_i$ . D'après

cette figure, on peut déduire que la quantité d'information apportée à partir d'un sous-ensemble  $S_i$  est nulle si toutes les observations de cette observation appartiennent uniquement à une seule classe. De plus, si le nombre d'observations appartenant à  $C_1$  est égal au nombre d'observations appartenant à  $C_2$ , l'entropie est maximale.

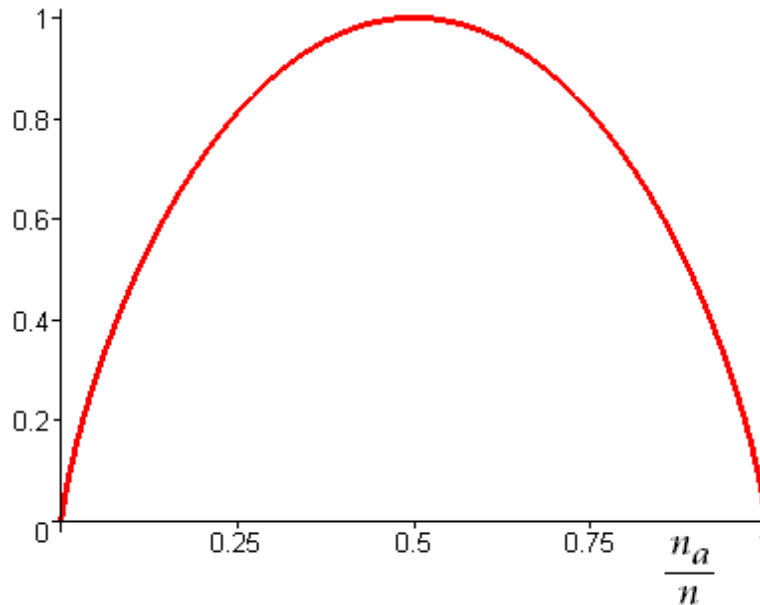


Figure III. 13 : Représentation de la fonction d'entropie dans le cas d'une classification binaire [54]

### 3.3.3. Gain d'informations

La variation d'entropie produite par la partition de  $S$  selon attribut sélectionné  $X$  est connue par le gain d'information. Cette variation est mesurée par la formule suivante [55] :

$$\text{Gain}(X, S) = (S) - (X, S) \dots \dots \dots \text{III.14}$$

### 3.3.4. Rapport de gain

Le rapport de gain fait face au problème de biais en normalisant le gain d'informations à l'aide de l'information de division. Il est défini par :

$$\text{Rapport de gain} = \frac{\text{Gain}(X,S)}{\sum_{j=1}^d P_j \log P_j} \dots \dots \dots \text{III.15}$$

Avec :  $P_j =$  nombre des observations de  $S_j$  nombre des observations de  $S$

### 3.3.5. Indice de Gini

L'indice de Gini est un concept très utile dans l'élaboration des arbres de décision, introduit par Breiman pour mesurer l'impureté qui sert à évaluer la qualité de chaque nœud et son pouvoir discriminant. Pour un ensemble de données  $S$  caractérisé par  $n$  classes ( $C_1, C_2, \dots$ ,

$C_n$ ) et une variable  $X$  explicite qui le partitionne en  $d$  sous-ensembles  $(T_1, T_2, \dots, T_d)$ , l'expression mathématique de l'indice de Gini est définie par :

$$\text{Gini}(S_j) = 1 - \sum_{i=1}^n P_i \log P_i \dots\dots\dots \text{III.16}$$

Avec :

$$P_i = \frac{\text{nombre des obserbations de le sous ensemble } S_j \text{ appertenat a la classe } C_i}{\text{nombre des observations de } S_j} \dots\dots\dots \text{III.17}$$

On définit ainsi le gain de Gini pour l'ensemble  $S$  par :

$$\text{Gain de Gini}(S) = - \sum_{i=1}^n P_i \text{Gini}(S_j) \dots\dots\dots \text{III.18}$$

Avec :

$$P_j = \frac{\text{nombre des observations de } S_j}{\text{nombre des observations de } S} \dots\dots\dots \text{III.19}$$

### 3.4. Algorithmes d'induction d'arbres de décision

#### 3.4.1. Algorithme ID3 (Itérative Dichotomiser 3)

L'algorithme ID3 développé par Ross Quinlan en 1986 ne fonctionne qu'avec les attributs qualitatifs. Cet algorithme emploie la fonction entropie et le gain d'informations pour sélectionner le meilleur attribut séparateur. L'attribut ayant le gain d'information maximal est alors retenu comme un attribut de décision puisqu'il permet de classer plus efficacement les données à ce niveau de l'arbre. Ainsi, si la valeur d'entropie est nulle, l'algorithme considère le nœud comme feuille de l'arbre [55].

#### 3.4.2. Algorithme C4.5

L'algorithme ID3 a été amélioré sous l'appellation C4.5 pour qu'il puisse modéliser les variables quantitatives. C4.5 utilise le rapport de gain pour sélectionner l'attribut.

- Traitement des caractéristiques continues :

Vu que l'algorithme D3 ne supporte pas les attributs ayant des valeurs continues, comme le prix et l'âge, C4.5 offrent un support de ce type de variables en cherchant un seuil qui divise l'ensemble des valeurs continues d'un attribut en deux à travers les étapes suivantes [56] :

- Pour chaque valeur  $a_i$  de l'attribut  $X$

1. Partitionner l'ensemble de données d'apprentissage  $S$  en deux sous-ensembles tel que :  
 $S1 = \{x \in R | x > a_i\}$  et  $S2 = \{x \in R | x \leq a_i\}$
2. Déterminer le rapport de gain de l'ensemble  $S$  - La valeur  $a_i$  qui maximise le rapport de gain sera prise comme le seuil de la division.

### 3.4.3. Algorithme CART

L'algorithme CART (Classification and Regression Trees) supporte la modélisation des problèmes de régression et classification, il se base sur l'indice de Gini pour déterminer la meilleure variable de discrimination des données [57].

### 3.5.Élagage des arbres

L'arbre de décision caractérisé par une grande profondeur est susceptible de surapprendre, où le modèle construit s'éloigne de la réalité à partir d'un certain degré de complexité de l'arbre bien que l'erreur décroisse constamment sur les données d'apprentissage. Pour éviter le surapprentissage, des techniques d'élagage sont introduites. Il existe deux approches d'élagage, le pré-élagage et le post-élagage [58].

- a. **Le pré-élagage** : cette approche consiste à proposer des critères d'arrêt de la partition des sous-ensembles lors la phase d'expansion. Il s'agit de fixer un taux d'homogénéité et lorsqu'un sous-ensemble  $S_j$  atteint ce niveau d'homogénéité, l'algorithme considère qu'il n'est plus nécessaire de diviser  $S_j$  encore une fois. De plus, l'algorithme considère le nœud comme nœud feuille étiqueté par la classe la plus dominante en cas de classement, ou par la moyenne des variables de sorties dans le cas de régression.
- b. **Le post-élagage** : cette approche consiste à élaborer l'arbre à travers deux étapes : la première étape correspond à celle où l'algorithme utilise une fraction des données d'apprentissage nommée growing set pour construire l'arbre de décision. Ensuite, l'algorithme procéde à l'élimination les branches d'une manière qui améliore la précision sur une autre portion de données d'apprentissage connu par échantillon d'élagage ou pruning set.

**Remarque** : Il est important de ne pas confondre entre les données d'élagage et les données de validation utilisées pour mesurer les performances des modèles.

### Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes méthodes utilisées pour le développement d'un système intelligent ont été discutées. Les méthodes les plus importants et qui seront utilisées dans cette étude sont la méthode d'approximation par agrégats symboliques (SAX) et l'apprentissage automatique. Dans ce qui suit, nous entamerons notre travail pratique pour aboutir à un système intelligent. Ce dernier a pour objectifs la détection et l'atténuation du phénomène de stick-slip d'une part et d'autre part améliorer les performances du processus de forage.

## Chapitre IV : Élaboration d'un système intelligent pour la détection et l'atténuation du phénomène stick-slip.

### Introduction

Le phénomène de stick-slip est un défi majeur dans les opérations de forage pétrolier et/ou gazier. Il entraîne des vibrations indésirables de la garniture de forage, plus particulièrement, l'outil de forage. Ces vibrations contribuent à des conséquences néfastes sur l'efficacité du forage, la durée de vie de l'outil de forage, la productivité et le coût de forage. La détection précoce et l'atténuation du phénomène de stick-slip sont donc essentielles pour assurer le bon déroulement du processus de forage.

Dans cette étude, nous proposerons un système intelligent pour la détection et l'atténuation du phénomène de stick-slip. Ce système sera basé sur l'analyse des données temporelles des paramètres de forage, notamment le WOB et le RPM dans le but de reconnaître les évènements de stick-slip et de recommander des solutions appropriées.

Par conséquent, **l'objectif principal de cette étude est de développer un système qui détecte et atténue le phénomène de stick-slip**, qui contribue par la suite à l'amélioration de la sécurité et l'efficacité des opérations de forage.

Dans ce qui suit, nous décrirons en détail les différentes articulations pour élaborer ce système intelligent ainsi que son fonctionnement.

### 1. Description et traitement des données

Les données ont été enregistrées chronologiquement à l'aide de différents capteurs installés en surface pendant le processus de forage de la section intermédiaire. Cette section a été forée à partir d'une profondeur de 1284 m, à travers plusieurs strates. Le Tableau IV.1 présente une stratigraphie avec les différentes formations géologiques et leurs épaisseur respectives.

Tableau IV. 1 : Description de la section de la section intermédiaire.

Stratigraphie	Epaisseur (m)
Turonien	58
Cénomanién	216
Albien	159
Aptien	30
Barrémien	314

Une fois les données de forage acquises, nous avons procédé à l'étape de traitement de ces données de forage en appliquant les différentes stratégies. Celles-ci comprenaient la

suppression des données affectées par les perturbations et le bruit, la suppression des données de manœuvre et la normalisation des données afin de les rendre cohérentes.

Les mesures erronées et le bruit peuvent être présents, pratiquement, dans toutes les données en raison de problèmes tels qu'une mauvaise calibration ou un dysfonctionnement des capteurs. Par conséquent, nous avons commencé par traiter des données collectées en éliminant d'abord les points de données contenant des valeurs irréalistes, telles que des valeurs négatives. Ensuite, nous avons divisé les données en deux ensembles distincts :

- Les données mesurées pendant le processus de forage ;
- Les données mesurées pendant les manœuvres de remontée et de descente.

Dans notre étude, nous avons utilisé un algorithme MATLAB pour effectuer cette classification. Cet algorithme calcule la différence entre la profondeur mesurée et la position de l'outil, puis l'utilise comme un paramètre clé pour la séparation des données. L'ensemble de données de forage comprend les observations où la différence entre la profondeur mesurée et la position de l'outil est inférieure ou égale à 0.1 m. Pendant cette phase, le train de tiges est entraîné par un mouvement de rotation et le moufle mobile se déplace vers le bas et les pompes à boue sont en marche. Les données de manœuvres, quant à elle, sont identifiées lorsque l'outil de forage est éloigné du fond du trou, que le torque diminue de manière significative et que le poids WOB atteint des valeurs nulles.

Après avoir effectué la classification des données, seules les données de forage ont été utilisées pour la détection et l'atténuation du phénomène de stick-slip. Cet ensemble des données se compose de 22777 observations comprenant sept paramètres qui sont la profondeur, la position de l'outil, la position du moufle mobile, le poids sur le fond (WOB), la vitesse de rotation (RPM), le débit et le torque de forage. La description statistique des données de forage est illustrée dans le Tableau IV.2. Ce tableau fournit les valeurs maximales et minimales pour les différents paramètres cités précédemment.

Tableau IV. 2 : Les plages des paramètres.

Paramètre	Valeur max	Valeur min
La profondeur (m)	2212,98	1284,05
WOB (lb*10 <sup>3</sup> )	16,305	2,881
Vitesse de rotation (RPM)	129,15	66,81
Torque (F lb)	9417,2386	3887,3802
Débit (GPM)	3010	2840

## 2. Détection du phénomène stick-slip en utilisant l'indice SSI

L'indice SSI (Stick-Slip Index) est une méthode quantitative utilisée pour détecter le phénomène de stick-slip en évaluant les variations de force ou de couple entre les surfaces en



contact lors de forage. Cet indice fournit une mesure objective du niveau de stick-slip et peut être utilisé pour déclencher des actions de prévention ou de correction.

L'indice SSI est, généralement, exprimé en pourcentage ou en valeur numérique ce qui permet d'indiquer le degré de stick-slip observé. Un indice SSI, généralement, plus élevé indique une plus grande amplitude de variation de force ou de couple entre surface en contact. Cela peut être dû à des facteurs tels que la formation géologique difficile, une mauvaise lubrification ou des paramètres de forage inappropriés. Un phénomène de stick-slip plus important ou plus sévère peut entraîner des effets indésirables qui ont été expliqués précédemment (dans le chapitre 2).

Pour mesurer l'effet des vibrations de torsion, une méthode courante consiste à calculer l'indice SSI en utilisant soit la vitesse de rotation (RPM) de fond de forage, soit le torque de surface. Les équations suivantes illustrent ces deux approches respectivement [59] :

$$SSI = \frac{\text{bit RPM}_{\text{Max}} - \text{bit RPM}_{\text{Min}}}{\text{bit RPM}_{\text{Avrege}}} \dots\dots\dots IV.1$$

$$SSI = \frac{\text{Surface torque}_{\text{Max}} - \text{Surface torque}_{\text{Min}}}{\text{Surface torque}_{\text{Avrege}}} \dots\dots\dots IV.2$$

Dans ces équations, bit RPM<sub>max</sub> et bit RPM<sub>min</sub> représentent respectivement les valeurs maximales et minimales de vitesse de rotation de l'outil de forage au fond du puits, tandis que surface torque<sub>max</sub> et surface torque<sub>min</sub> correspondent aux valeurs maximales et minimales du couple de surface enregistrées. A l'aide de ces équations, l'indice SSI peut être calculé pour quantifier le niveau de stick-slip présent lors du forage. Ce qui permet d'obtenir une mesure objective du phénomène et de prendre mesures appropriées pour prévenir ou corriger les effets néfastes associés au stick-slip.

Dans notre étude, nous avons utilisé l'équation IV.2 pour calculer l'indice SSI (voir Annexe 1) en utilisant uniquement les données de surface sont disponibles. Nous avons fixé un seuil de SSI à 0.8 pour détecter le phénomène du stick-slip et identifier les situations où des actions préventives ou correctives doivent être prises. Ce seuil a été déterminé comme étant le point critique au-delà duquel les dysfonctionnements de forage commencent à se produire. Le seuil a été choisi, dans notre étude, pour déterminer si le phénomène de stick-slip est présent ou non. Lorsque la valeur de l'indice SSI dépasse 0,8 cela indique un état sévère de stick-slip ce qui signifie que l'outil de forage est stationnaire et non rotatif. Une valeur de SSI supérieure à 0,8 suggère une instabilité significative dans le processus de forage et peut nécessiter des ajustements des paramètres de forage ou d'autres mesures pour résoudre le problème. Dans ce contexte plusieurs études ont été faites [60, 61]. Les résultats obtenus ont montré que le maintien de SSI inférieur à un seuil de 1 est essentiel pour éviter les dysfonctionnements de forage. La Figure IV.1 montre la variation de l'indice SSI en fonction de la profondeur. Les barres en rouges montrent l'état sévère des vibrations, tandis que les barres en vert représentent les cas où le phénomène n'est pas sévère.

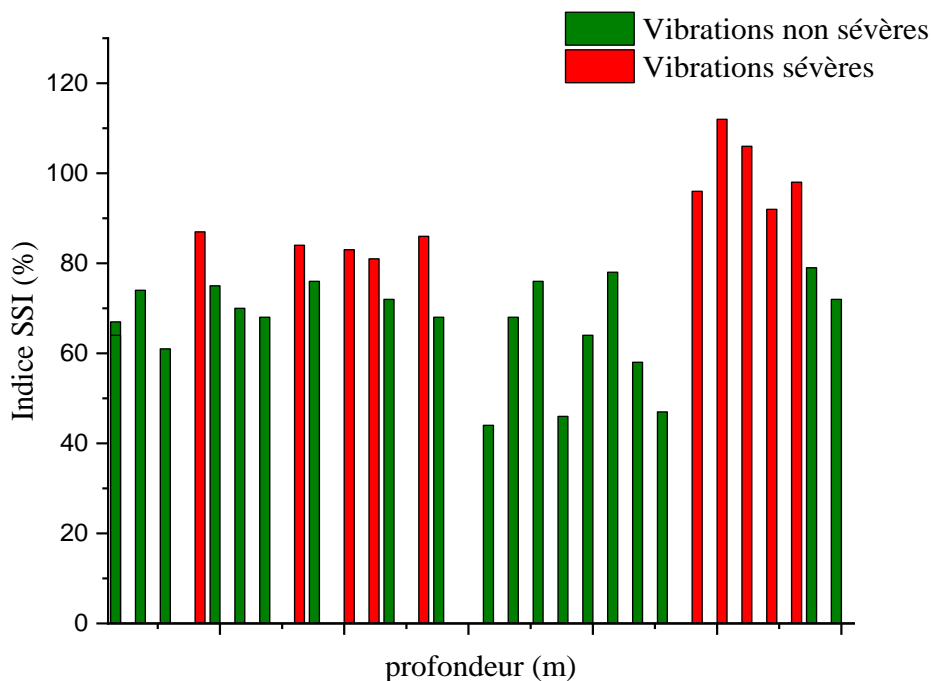


Figure IV. 1 : Représentation de la variation de l'indice SSI.

### 3. Détection automatique de l'évolution du WOB et RPM pendant un évènement du stick-slip

Dans le cadre de notre étude, nous avons développé un système de détection automatique pour surveiller, en continu, l'évolution du WOB et RPM pendant un évènement du stick-slip. Dans ce qui suit, nous expliquerons en détail les différentes étapes pour élaborer ce système.

#### 3.1.Représentation des séries temporelles par la méthode SAX

Après l'extraction d'une série temporelle contenant cinq observations où chaque observation est enregistrée toutes les cinq secondes (c'est-à-dire cette série chronologique cumule les observations enregistrées pendant une période de 25 secondes avant la détection du phénomène de stick-slip), nous appliquerons la méthode de SAX pour convertir cette série temporelle en une chaîne symbolique. Cette séquence symbolique contient cinq valeurs numériques allant de 0 à 2, où chaque valeur représente une observation. L'utilisation de la méthode SAX dans notre système permet de simplifier et de résumer les informations contenues dans la série temporelle, tout en préservant les caractéristiques essentielles pour la détection du phénomène de stick-slip. Ces chaînes symboliques obtenues peuvent être utilisées dans les algorithmes de classification.

Dans notre étude, nous avons constaté que de nombreuses séries temporelles de données de forage ne suivent pas la distribution gaussienne, ce qui limite l'utilisation de la méthode SAX qui suppose une telle distribuées. Par conséquent, nous avons pris en compte cette

limitation et avons opté pour une approche directe en attribuant directement l'état « constant » aux intervalles des données qui présentent de petites fluctuations [62].

Dans notre travail, le système commence par le calcul des valeurs maximales  $V_{max}$  et minimales  $V_{min}$  du WOB. Ensuite, la variance entre ces deux valeurs ( $V_{max} - V_{min}$ ) est calculée. Ensuite, la variance obtenue est comparée à un seuil prédéfini ( $T_{seuil}$ ) pour décider si la méthode SAX doit être appliquée ou non. En fonction de cette comparaison et des valeurs  $V_{max}$  et  $V_{min}$ , il existe trois scénarios possibles :

- ✚ Si la variance est supérieure au seuil ( $V_{max} - V_{min} > T_{seuil}$ ), la méthode SAX est appliquée pour convertir la série temporelle en une chaîne symbolique.
- ✚ Si la variance est inférieure au seuil ( $V_{max} - V_{min} < T_{seuil}$ ), la méthode SAX n'est pas appliquée. La série temporelle présente de petites fluctuations. Donc, l'évolution du paramètre est considérée comme constante.
- ✚ Si la variance est égale au seuil ( $V_{max} - V_{min} = T_{seuil}$ ), la décision d'appliquer ou de ne pas appliquer la méthode SAX peut être prise en tenant compte d'autres facteurs contextuels.

La Figure IV.2 illustre un schéma représentatif des différentes étapes à suivre pour la représentation d'une série temporelle du WOB par la méthode SAX.

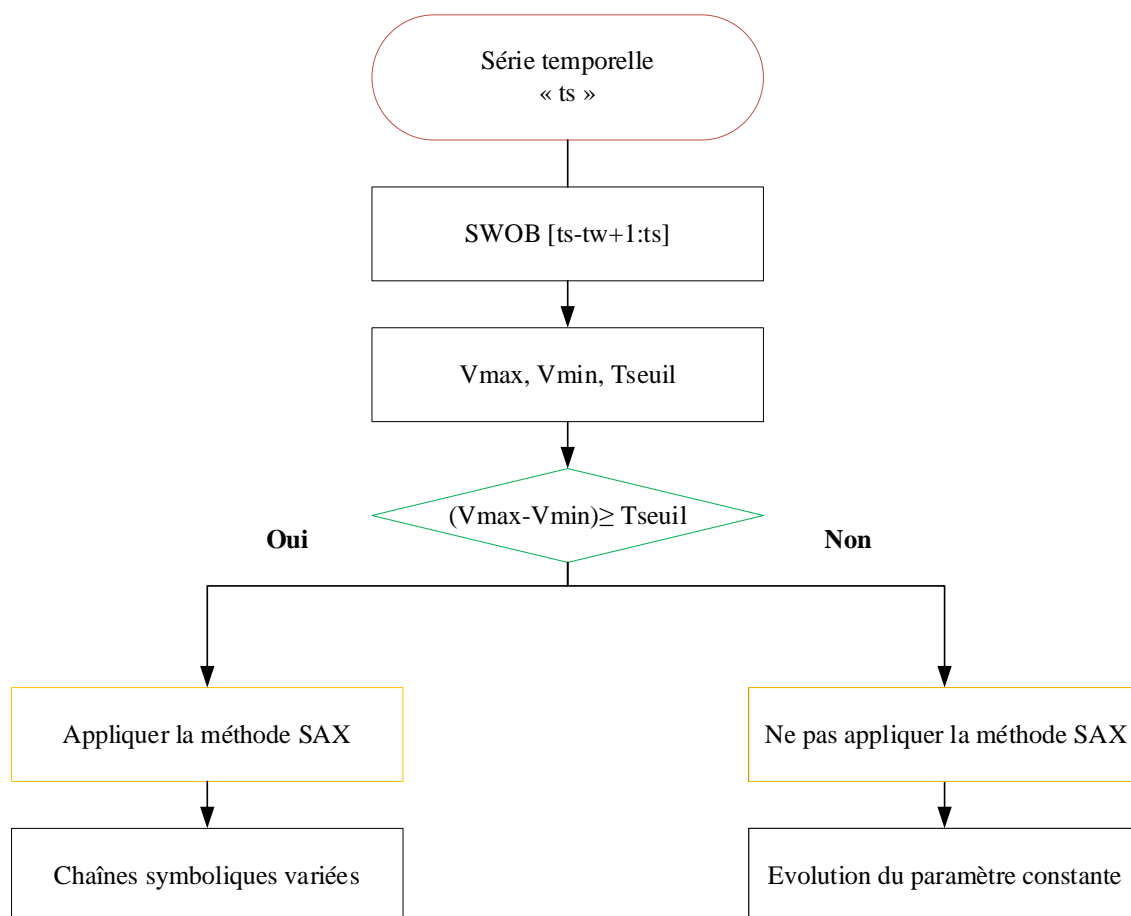


Figure IV. 2 : Flux de travail de représentation d'une série temporelle du WOB.

Dans le flux de travail que nous avons décrit précédemment, le système intelligent développé dans ce chapitre extrait d'abord les séries temporelles des paramètres de forage. Une fois que les séries temporelles ont été extraites, le système applique la méthode de SAX pour les convertir en chaînes symboliques.

### 3.2. Classification des représentations des séries temporelles par l'algorithme SVM

Une fois que la série chronologique est convertie en une chaîne symbolique, le système doit extraire l'information à partir cette chaîne symbolique pour reconnaître l'évolution du paramètre de forage dans les dernières 25 secondes. Un classifieur SVM qui est entraîné à reconnaître l'évolution des paramètres de forage à partir des chaînes symboliques générées par la méthode SAX. La classification des représentations des séries temporelles par l'algorithme SVM se fait en plusieurs étapes qui seront expliquées ci-après.

#### 3.2.1. Génération des données d'apprentissage

Pour l'élaboration du modèle de classification des représentations SAX, nous avons généré toutes les combinaisons possibles entre les trois valeurs 0, 1 et 2. Puisque nous avons trois valeurs et une taille de la chaîne symbolique de cinq, le nombre de combinaisons total est de  $3^5 = 243$ . Après avoir générer ces 243 combinaisons possibles, nous avons attribué manuellement à chaque chaîne symbolique l'évolution appropriée qu'elle représente. Ce qui signifie que nous avons associé à chaque combinaison une étiquette indiquant l'évolution du paramètre de forage correspondant. Le Tableau IV.3 révèle un échantillon de ces combinaisons générées, qui ont utilisées pour la construction d'un modèle de classification de la représentation SAX.

Tableau IV. 3 : Échantillon de données générées pour l'apprentissage du classifieur SVM.

La représentation SAX					L'évolution du paramètre
0	0	0	0	0	Stable
2	1	1	0	0	Diminuer (Ramp down)
2	1	1	0	2	Diminuer puis Augmenter (Pulse down)
0	0	1	2	0	Augmenter puis Diminuer (Pulse up)
2	1	2	0	1	Fluctuer (Fluctuate)
0	1	1	2	2	Augmenter (Ramp up)

À partir de ce tableau, on peut constater que la base des données d'apprentissage générée est composée de cinq vecteurs des variables d'entrée. Chaque vecteur représente une unité temporelle est constitué de valeurs discrètes : 0, 1 et 2. En lus des vecteurs d'entrée, les données

contiennent également un vecteur de variable de sortie. Ce vecteur décrit l'évolution de paramètre de forage au cours des dernières vingt-cinq secondes.

Comme illustré dans le Tableau IV.3, le dictionnaire de la variable de sortie « évolution des paramètres de forage » inclut les attributs suivants : stable, augmentation, diminution, fluctuation, augmentation puis diminution, diminution et augmentation.

- Stable : ce qui indique que le paramètre de forage est relativement constant et ne présente pas de changements significatifs au cours des dernières 25 secondes ;
- Augmentation : lorsque le paramètre de forage montre une tendance à augmenter au cours des dernière 25secondes ;
- Diminution : lorsque le paramètre de forage montre une tendance à diminuer au cours des dernière 25secondes ;
- Fluctuation : ce qui indique que le paramètre de forage présente des fluctuations sans tendance claire d'augmentation ou de diminution au cours des dernières 25secondes ;
- Augmentation puis diminution : lorsque le paramètre de forage montre une tendance augmente initialement, puis diminue par la suite au cours des dernière 25secondes ;
- Diminutions puis augmentation : lorsque le paramètre de forage montre une tendance diminue initialement, puis augmente par la suite au cours des dernière 25secondes ;

Ces attributs décrivent les différentes évolutions possibles du paramètre de forage dans les données observées sur une période de 25secondes. Ils sont obtenus après une représentation graphique des différentes combinaisons possibles (voir Annexe 2). La Figure IV.3 représente l'évolution de chaque paramètre correspond à chaque chaîne symbolique citée dans le tableau IV.3.

## CHAPITRE IV : ELABORATION D'UN SYSTEME INTELLIGENT POUR LA DETECTION ET L'ATTENUATION DU PHENOMENE STICK-SLIP

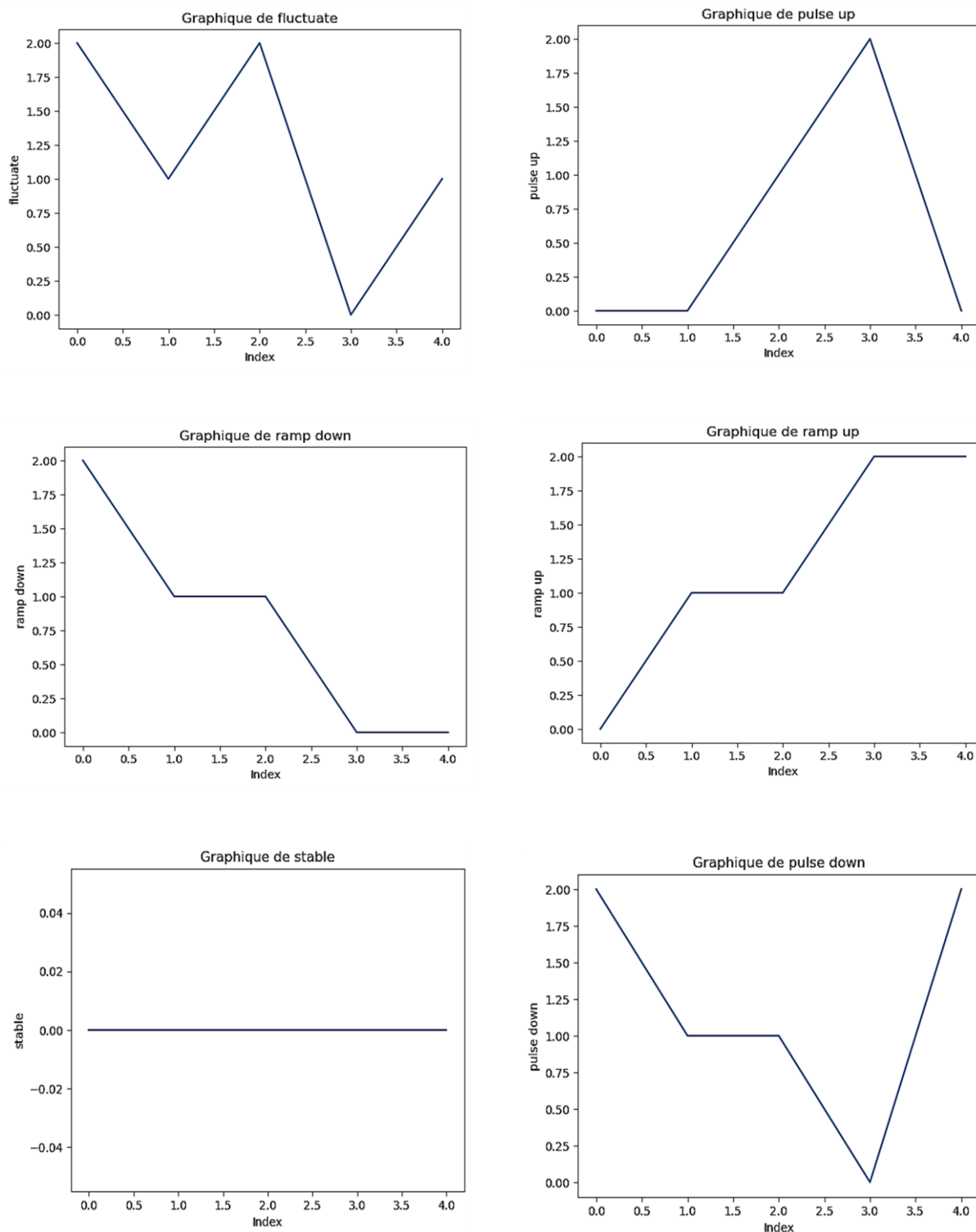


Figure IV. 3 : Evolution du paramètre correspond à chaque chaîne symbolique.

### 3.2.2. Application du SVM pour la classification des représentations SAX

Une fois que la base des données décrite précédemment, elle a été utilisée pour entraîner un modèle SVM qui reçoit les chaînes symboliques de chaque paramètre de forage (données d'entrée), et renvoie l'évolution correspondantes de ces paramètres (les données de sortie). Le modèle SVM a été entraîné en utilisant le langage Python.

Après avoir entraîné le classifieur SVM, des tests ont été réalisés pour évaluer sa capacité à classifier correctement toutes les combinaisons possibles produites par la méthode SAX. Les résultats de ces tests ont montré que le système développé dans cette section avait une grande capacité à identifier automatiquement l'évolution du WOB et RPM.

Le système intelligent basé sur le modèle SVM a réussi à reconnaître l'évolution de plusieurs paramètres de forage dans un temps réduit, généralement inférieur à une seconde. De plus, il a montré une grande précision dans ses prédictions. Ces performances dépassent les capacités d'un être humain en termes de vitesse de calcul et d'exactitude. Cela, confirme que ce système développé offre des avantages significatifs par rapport aux méthodes traditionnelles qui dépendent du personnel de forage pour l'analyse des données. En utilisant ce système intelligent, il est possible de réaliser des classifications rapides et précises de l'évolution des paramètres de forage, ce qui peut contribuer à améliorer l'efficacité et la sécurité des opérations de forage.

L'élaboration du système intelligent pour la détection et l'atténuation du phénomène de stick slip peut être résumée dans le schéma présenté sur la Figure IV.4.

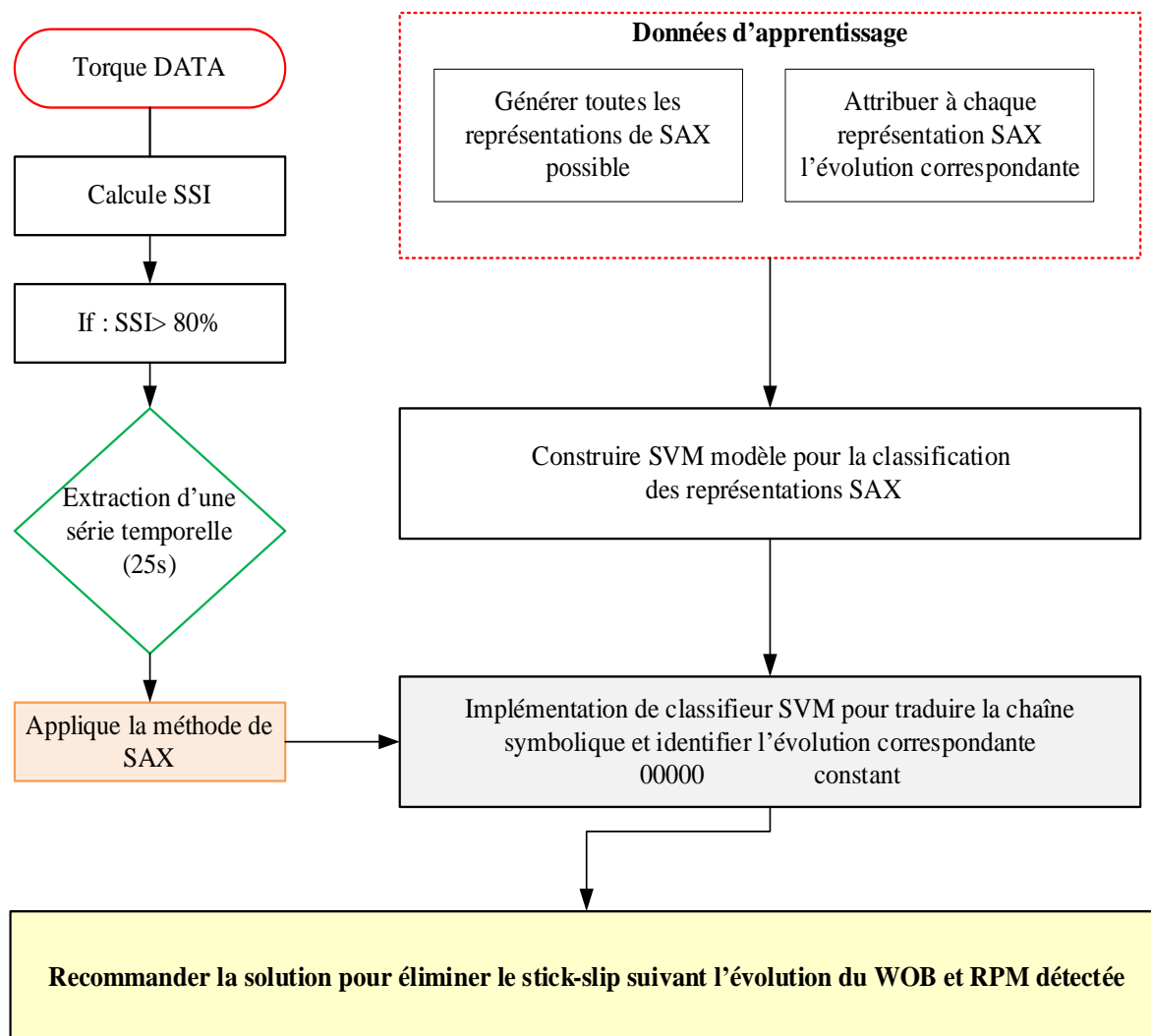


Figure IV. 4 : Procédure suivie dans cette étude pour détecter et éliminer le stick-slip.

#### 4. Les solutions recommandées par le système pour éliminer le stick slip suivant l'évolution de WOB et RPM

Dans cette section, nous allons présenter les recommandations du système développé dans notre étude pour atténuer le phénomène de stick-slip en surveillant l'évolution du poids (WOB) et la vitesse de rotation de l'outil (RPM) (Voir annexe 3). Les solutions proposées ont été détaillées dans le **chapitre 2**. Nous avons préparé le Tableau IV.4 qui illustre un échantillon des combinaisons possibles de WOB et de RPM, ainsi que la solution recommandée par le système pour minimiser les vibrations de stick-slip.



**CHAPITRE IV : ELABORATION D'UN SYSTEME INTELLIGENT POUR LA  
DETECTION ET L'ATTENUATION DU PHENOMENE STICK-SLIP**

Tableau IV. 4 : Solutions recommandées par le système pour éliminer le stick-slip selon l'évolution de RPM et WOB.

<b>L'évolution du RPM</b>	<b>L'évolution de WOB</b>	<b>La solution recommandée par le système</b>
Stable	Ramp up	✓ Diminuer le WOB
Ramp down	Stable	✓ Augmenter le RPM
Ramp down	Ramp up	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Diminuer le WOB et augmenter si nécessaire le RPM.</li> <li>✓ Vérifier s'il y a un changement de formation (une formation dure)</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés</li> <li>✓ Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.</li> </ul>
Ramp up	Ramp down	✓ Ajuster les paramètres de forage et vérifier s'il y a un changement de formation (une formation tendre)
Pulse down	Ramp down	✓ Ajuster les deux paramètres de forage augmenté progressivement RPM et WOB jusqu'à la suppression du stick & slip
Ramp down	Pulse up	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ajuster les paramètres de forage augmenté le RPM</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement de formation.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés.</li> <li>✓ Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.</li> </ul>
Pulse up	Pulse up	✓ Ajuster les paramètres de forage réduire le WOB et surveiller le RPM jusqu'à la suppression du stick slip

**CHAPITRE IV : ELABORATION D'UN SYSTEME INTELLIGENT POUR LA  
DETECTION ET L'ATTENUATION DU PHENOMENE STICK-SLIP**

Pulse down	Ramp up	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ajuster les paramètres de forage (diminuer le RPM) et vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue</li> </ul>
FLoctuate	FLoctuate	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ajuster les paramètres de forage jusqu' à la suppression du stick &amp; slip</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement de formation</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés.</li> <li>✓ Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.</li> </ul>
Ramp up	Stable	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Diminuer le RPM</li> </ul>
Stable	Stable	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Vérifier le changement de formation.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés.</li> <li>✓ Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.</li> </ul>
Pulse up	Pulse down	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ajuster les paramètres de forage (augmenter le WOB et surveiller le RPM) jusqu'à la suppression du stick &amp; slip et vérifier si on a un bon nettoyage de fond</li> </ul>
Pulse down	Pulse up	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ajuster les paramètres de forage (augmenter le RPM)</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement de formation.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés.</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.</li> </ul>
Pulse up	Ramp down	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Augmenter progressivement le WOB jusqu'à la suppression de ce phénomène.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement de formation.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés.</li> <li>✓ Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.</li> </ul>
FLoctuate	Ramp up	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ajuster les paramètres de forage (diminuer WOB et ajuster RPM) jusqu' à la suppression du stick &amp; slip</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement de formation</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.</li> <li>✓ Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés.</li> <li>✓ Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.</li> </ul>

### 5. Expériences numériques

Le système que nous avons développé dans notre travail a été appliqué à un échantillon de données de forage, telles que décrites précédemment. Pour illustrer l'efficacité de notre système, la figure présentée ci-dessous montre un exemple d'un événement de stick-slip identifié par notre système, ainsi que l'évolution des deux paramètres de forage qui sont généralement surveillés pour détecter ce phénomène.

Dans cet exemple, seulement la vitesse de rotation de l'outil RPM, et le WOB de la surface sont présentes pour montrer l'efficacité du système proposé dans notre travail.

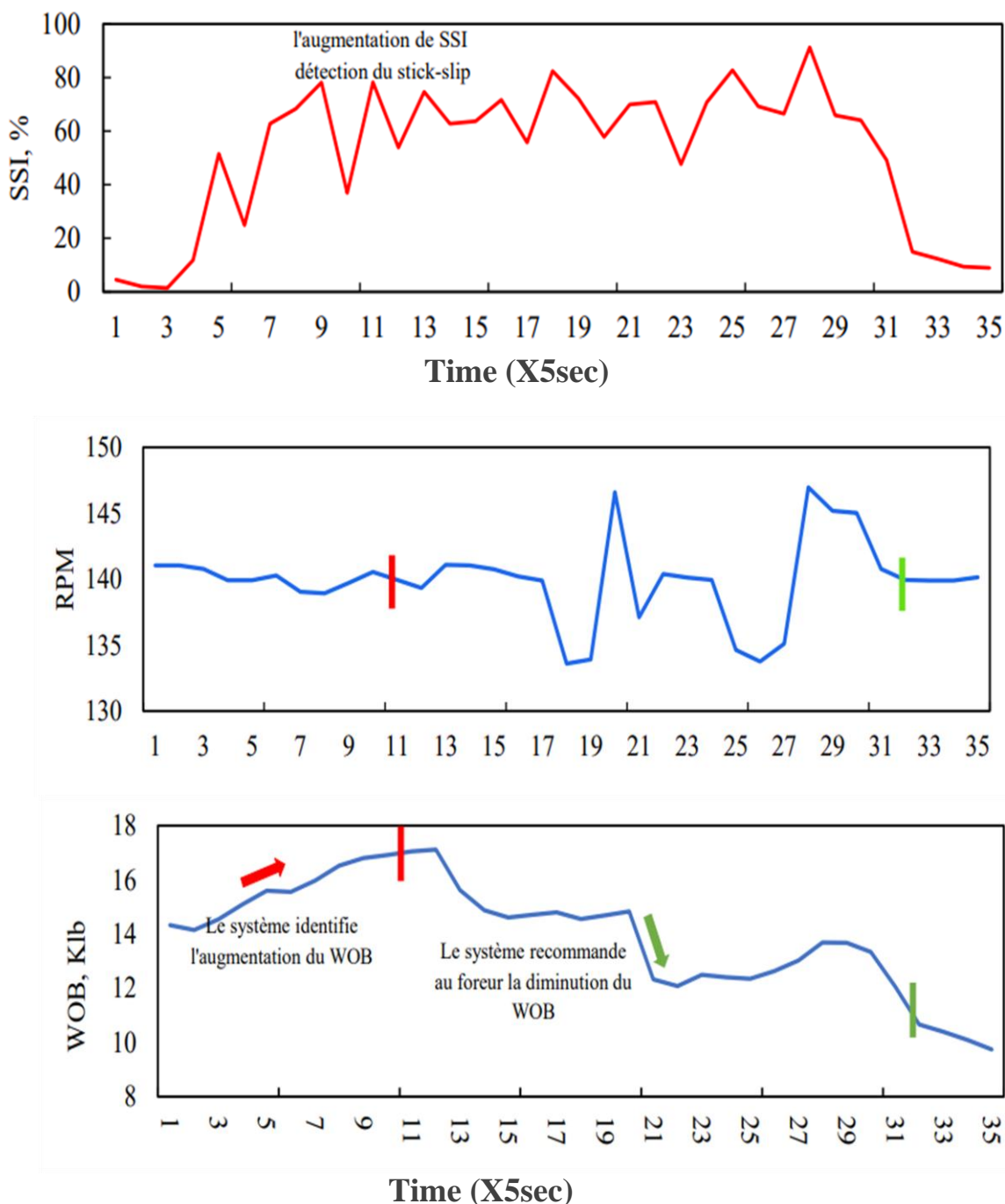


Figure IV. 5 : Exemple d'une détection et atténuation d'événement stick slip.

La Figure IV.5 montre un événement de stick slip détecté par notre système, le graphe en rouge représente l'évolution de l'indice de stick slip (SSI) en fonction du temps. D'après ce graphe, le SSI a augmenté et a dépassé la valeur de 80% ce qui indique un état sévère de stick-slip. La durée totale de cet événement était d'environ 110 secondes.

La ligne verticale rouge marque le début de l'événement de stick-slip, indiquant le moment où le phénomène a été détecté par notre système. Alors que la ligne verticale verte marque la fin de l'évènement, indiquant lorsque les vibrations de stick-slip ont été atténuées et que le forage est revenu à un état plus stable.

Après avoir détecté le phénomène de stick-slip, le système a extrait un intervalle de données de WOB et de RPM enregistrés avant l'apparition du stick-slip correspondant à la période précédant la ligne verticale rouge dans la figure au-dessus. L'objectif était de déterminer la cause de cet événement en analysant l'évolution de ces paramètres.

En examinant les données, nous avons constaté que le RPM de surface variait entre 138 et 141 tour/min, sans aucun changement significatif. Par conséquent, il est peu probable que le RPM de surface soit le déclencheur de cet événement de stick-slip. En revanche, en analysant l'évolution du WOB, notre système a détecté une augmentation du WOB avant l'apparition du phénomène de stick-slip, comme indiqué par la flèche rouge (dans la Figure IV.5). Cette augmentation du WOB est susceptible d'avoir contribué à l'événement de stick-slip.

Sur la base des résultats de l'analyse du changement des paramètres de forage, en particulier le WOB et le RPM, qui ont probablement contribué au déclenchement de l'événement de stick-slip, le système est en mesure de recommander, au foreur et à l'équipe de forage, une action spécifique à prendre pour atténuer l'événement de stick-slip.

Dans le cas présent, le système a recommandé la réduction du poids sur l'outil, ce qui correspond à l'action prise par le foreur. Cette recommandation est appuyée par les observations suivantes : après que le poids sur l'outil a été réduit, comme le montre la flèche verte dans la Figure IV.5, le stick-slip a été atténué, ce qui se traduit par une diminution de l'indice SSI.

### **Conclusion**

Notre étude a présenté un système intelligent développé pour la détection et l'atténuation du phénomène de stick-slip observé dans le processus de forage. Ce système s'articule sur l'analyse du temps réel des paramètres de forage, notamment le poids sur l'outil WOB et la vitesse de rotation de l'outil RPM, pour détecter l'événement de stick-slip et recommander des solutions appropriées.

En utilisant les techniques telles que la conversion des séries temporelles en chaînes symboliques (SAX) et l'apprentissage automatique avec un classifieur SVM, le système est capable de reconnaître automatiquement les modèles d'évolution des paramètres de forage associés au phénomène de stick-slip. Ce système peut fournir ainsi des recommandations précises pour atténuer ce phénomène indésirable.

Le système que nous avons développé dans cette étude présente une grande capacité à identifier et à atténuer le phénomène de stick-slip avec une grande précision et une efficacité temporelle accrue par rapport aux méthodes traditionnelles basées sur l'être humain (le foreur). Il peut ainsi fournir des conseils réactifs aux foreurs ce qui contribue à la sécurité et l'efficacité des opérations de forage.

## Conclusions générales

Les plates-formes pétrolières et gazières modernes sont dotées d'un réseau étendu de capteurs qui collectent une grande quantité de données. Cependant, détecter certains problèmes et anomalies peut souvent s'avérer difficile. Une étude réalisée par le BCG (Boston Consulting Group) a démontré que l'intelligence artificielle (IA) peut contribuer à détecter les premiers signes de problèmes de forage pétrolier qui passent généralement inaperçus, prévenant ainsi d'éventuels dommages supplémentaires. L'utilisation de l'IA permet d'obtenir des informations supplémentaires, ce qui permet de réagir plus rapidement aux problèmes survenant sur la plate-forme. Grâce à cette approche proactive, il devient possible d'éviter les interruptions et les pannes, optimisant ainsi l'efficacité et la fiabilité des opérations.

L'intégration de l'intelligence artificielle dans les activités de forage se réalise à travers des systèmes intégrés comprenant des plates-formes, des interfaces et des programmes, offrant aux entreprises la possibilité de contrôler le processus de forage à distance. L'utilisation de l'intelligence artificielle présente plusieurs avantages, notamment :

- Réduction du temps de forage et des périodes improductives ;
- Mise en place d'un système de prise de décisions automatisé ;
- Optimisation de la trajectoire de l'outil lors des déviations de perçage ;
- Développement d'un système de contrôle des vibrations et surveillance en temps réel des paramètres inférieurs.

En combinant ces capacités, l'intelligence artificielle contribue à une meilleure gestion et optimisation et automatisation du processus de forage, améliorant ainsi l'efficacité globale des opérations pétrolières et gazières.

L'objectif de notre travail est de développer un système intelligent basé sur des algorithmes d'apprentissage automatique et des données de forage permettant la détection et l'atténuation d'un phénomène, couramment observé pendant le processus de forage qui est le phénomène de stick-slip qui limite les performances de forage. Ce phénomène a été expliqué dans le chapitre 2 tout en présentant ses causes, conséquence et les recommandations proposées aux foreurs pour limiter l'effet négatif de stick slip. Pour aboutir à cet objectif, nous avons appliqué des algorithmes tels que les machines à vecteurs de support (SVM) et la méthode d'approximation symbolique (SAX) et les arbres de décision.

Lors de la détection de phénomène de stick-slip, le système convertit une série temporelle de paramètres de forage en une série symbolique à l'aide de la méthode SAX. Ensuite, cette chaîne symbolique est soumise au classifieur SVM pour reconnaître l'évolution des paramètres de forage. En fonction de l'évolution identifiée automatiquement par notre système intelligent, des recommandations sont fournies au foreur pour ajuster les paramètres de forage, tels qu'augmenter la valeur de RPM ou diminuer la valeur de WOB, afin d'atténuer le phénomène de stick-slip.

Ces avancées technologiques permettent d'améliorer la réactivité du processus de forage et de prendre des mesures préventives pour minimiser l'impact du stick-slip. Grâce à ce système intelligent développé, les foreurs disposent d'indications précieuses pour ajuster leurs

## CONCLUSIONS GENERALES

opérations en temps réel, réduisant ainsi les risques de perturbations et d'interruptions dans le processus de forage.

## Perspectives

Dans le contexte de notre travail qui se concentre sur la réduction du phénomène de stick-slip, nous avons développé un système intelligent de détection et d'atténuation en utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique et des données de forage. Ces avancées ouvrent la voie à de nombreuses perspectives et opportunités d'amélioration.

Tout d'abord, en combinant les algorithmes d'apprentissage automatique avec les données de forage, nous pouvons affiner la détection des autres modes de vibration et améliorer la précision des recommandations d'ajustement des paramètres de forage. En explorant des modèles plus sophistiqués tels que les réseaux de neurones profonds, nous pourrions capturer des relations complexes entre les données de forage et les événements de vibrations, ce qui permettrait d'améliorer encore la capacité de prédiction et de prévention du système intelligent.

De plus, grâce à notre système intelligent, il serait possible de mettre en place des stratégies de prévention proactives. En utilisant les informations fournies par le système, nous pourrions établir des seuils d'alerte anticipés pour détecter les signes précurseurs du mode de vibration étudié, ce qui permettrait d'agir avant que le phénomène ne se produise. Cela contribuerait à réduire considérablement les risques et les perturbations liés aux vibrations de stick-slip.

Enfin, une autre perspective intéressante serait de mener des études plus approfondies sur les effets à long terme de l'atténuation des vibrations sur les performances globales du forage. Par exemple, nous pourrions évaluer l'impact de l'atténuation des vibrations sur la durée de vie des équipements, la réduction des coûts de maintenance et l'augmentation de la productivité. Ces analyses permettraient de mieux comprendre les avantages économiques et opérationnels de l'utilisation de notre système intelligent.

En explorant ces différentes perspectives, notre travail contribue à l'évolution continue des pratiques de forage pétrolier et à l'amélioration des performances opérationnelles. En minimisant les risques associés au phénomène de stick-slip et en optimisant les opérations de forage, le système intelligent développé dans ce travail offre des possibilités prometteuses pour l'industrie, tant en termes de sécurité que d'efficacité.



**Références bibliographiques**

- [1] J.L. LUMMUS et J.J. AZAR, Drilling fluids optimization: a practical field approach, 1986.
- [2] O. LAVOISY, Premier puits de pétrole, Encyclopaedia Universalis.
- [3] J.P. NGUYEN, technique d'exploitation pétrolière : le forage, Edition technip. Paris, 1993
- [4] D. BRIGANT et A. LEBLOND, Forages, Encyclopædia Universalis.
- [5] C. MENDIL, M. KIDOUCHE, M.Z. DOGHMANE et al, Modeling of hydrocarbons rotary drilling systems under torsional vibrations: a survey. In: Artificial Intelligence and Renewables Towards an Energy Transition 4, Springer International Publishing, 2021, p.243-251.
- [6] F. ABDULGALIL, Commande non linéaire dans les systèmes de forage pétrolier : contribution à la suppression du phénomène de « stick-slip », Thèse de doctorat. Université Paris Sud-Paris XI, 2006.
- [7] M. CHERIFI, Etude et maintenance de treuil de forage OIL WELL 840E, PFE, Université de Chlef, 2012.
- [8] H. KAROUÏ, S. ABBASSI et C. KHANIFAR, Etude comparative entre le tubage encours de forage (CWD) et le forage conventionnel Cas d'étude : le puits ST 69, PFE, Université de Ouargla, 2019.
- [9] F. OUELLABI, B. MOSBAH, et D. LIA, Appareil De Forage, Etude Et Dimensionnement-champ Oued Mya Ghardaïa-puit MJR1, PFE, Université de Ouargla, 2017.
- [10] A. BOUCHERCHEM, A. BOUSSABOUA, W. KAMLI, Contrôle de pression en forage conventionnel avec MPD (Cas d'étude site Gassi Touil-Algérie), PFE, Université de Bejaia, 2015.
- [11] T. HASI et I. SOMAA, Appareil de forage, étude et dimensionnement cas : Champs Hassi Messaoud, PFE. Université de Ouargla. 2012.
- [13] [Http://fr.wikipedia.org/wiki/Blow\\_Out\\_Preventer\\_](http://fr.wikipedia.org/wiki/Blow_Out_Preventer_)
- [14] A. SLIMANI et M. DADDOU, Module M3, formation JDF, Division forage SONATRACH, 2004.
- [15] F. GRONDIN, Module M2, formation JDF, Division forage SONATRACH, 2004.
- [16] S. TABET, A. SOUAG et S. KATFI, Contrôle et suivi de la trajectoire du forage horizontal en short radius. Application sur le puits md-56, PFE, Université de Ouargla, 2016.
- [17] N. ANDREA, MWD Drilling & Measurements, Schlumberger, 2007.
- [18] A. BA, Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier, Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech, 2010.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [19] M. BEBBOUKHA et H. BOUTA, Prédiction de coincement de la garniture de forage par les techniques des fouilles des Données, 2016
- [20] R. RIANE, M.Z. DOGHMANE, M. KIDOUICHE et al, Stick-Slip Vibration Suppression in Drill String Using Observer-Based LQG Controller, *Sensors*, 2022, vol. 22, no 16, p. 5979.
- [21] B. SALDIVAR, S. MONDIÉ S.I. NICULESCU et al, A control oriented guided tour in oilwell drilling vibration modeling. *Annual reviews in Control*, 2016, vol. 42, p. 100-113.
- [22] J. WANG, S.X. TANG et M. KRSTIC, Adaptive output-feedback control of torsional vibration in off-shore rotary oil drilling systems, *Automatica*, 2020, vol. 111, p. 108640.
- [23] A. SOUSSA, Etude des instabilités dans une tige de forage pétrolier influence du frottement visqueux, Thèse de doctorat, Université de Batna 2. 2012.
- [24] P. PASTUSEK, E. SULLIVAN et T. HARRIS, Development and utilization of a bit-based data-acquisition system in hard-rock PDC applications, In: *SPE/IADC Drilling Conference*, OnePetro, 2007.
- [25] I. KESSAI, S. BENAMMAR, M.Z. DOGHMANE et al, Drill bit deformations in rotary drilling systems under large-amplitude stick-slip vibrations, *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no 18, p. 6523.
- [26] M.B.S. MÁRQUEZ, I. BOUSSAADA, Islam, H. MOUNIER et al, Analysis and control of oilwell drilling vibrations: a time-delay systems approach, Springer, 2015.
- [27] D.E. ODESA et A. DOSUNMU, Analyzing Lateral and Torsional Vibrations Models and Their Effect on Drilling Efficiency Using PDC Bits in Directional and Multilateral Wells, In : *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*, OnePetro, 2015.
- [28] U. GALVANETTO, S.R. BISHOP et L. BRISEGHIELLA, Mechanical stick-slip vibrations. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1995, vol. 5, no 03, p. 637-651.
- [29] V. VAZIRI, M. KAPITANIAK et M. WIERCIGROCH, Suppression of drill-string stick-slip vibration by sliding mode control: Numerical and experimental studies. *European Journal of Applied Mathematics*, 2018, vol. 29, no 5, p. 805-825.
- [30] V. VAZIRI, M. KAPITANIAK et M. WIERCIGROCH, Suppression of drill-string stick-slip vibration, In: *MATEC Web of Conferences*. 2018.
- [31] C. MENDIL, M. KIDOUICHE et M.Z. DOGHMANE, Hybrid sliding PID controller for torsional vibrations mitigation in rotary drilling systems. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci*, 2021, vol. 22, no 1, p. 146-158.
- [32] P.D. SPANOS, A.M. CHEVALLIER, N.P. POLITIS et al, Oil and gas well drilling: a vibrations perspective. *The Shock and Vibration Digest*, 2003, vol. 35, no 2, p. 85-103.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [33] X. ZHU, L. TANG et Q. YANG, A literature review of approaches for stick-slip vibration suppression in oilwell drillstring. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, vol. 6, p. 967952.
- [34] T.M. MATVIYKIV, Use of influence diagrams for decision support in drilling automation, *Journal of Global Research in Computer Science*, 2013, vol. 4, no 4, p. 1-7.
- [35] Y. SHEN, Z. ZHANG, J. ZHAO et al, The origin and mechanism of severe stick-slip. In: *SPE annual technical conference and exhibition*, OnePetro, 2017.
- [36] Z. HUANG, D. XIE, Dou, B. XIE et al, Investigation of PDC bit failure base on stick-slip vibration analysis of drilling string system plus drill bit, *Journal of Sound and Vibration*, 2018, vol. 417, p. 97-109.
- [37] <https://www.paradigm.eu/paradigm-drilling-services>.
- [38] <https://www.drillingmanual.com/pdc-drilling-bit-design-guide-components/>
- [39] R. Wedel et al, Mitigating bit related stick slip with a torsional impact hammer, *Proceedings of the AADE National Technical Conference and Exhibition*. 2011.
- [40] K.S. SELNES, C. CLEMMENSEN et N. REIMERS, Drilling difficult formations efficiently with the use of an antistall tool, In: *IADC/SPE drilling conference*, OnePetro, 2008.
- [41] J. LIN, E. WEI, Li et al, Experiencing SAX: a novel symbolic representation of time series. *Data Mining and knowledge discovery*, 2007, vol. 15, p. 107-144
- [42] F. MUHAMMAD, M. MUHAMMAD et P.F. MARTEAU, Enhancing the symbolic aggregate approximation method using updated lookup tables. In: *Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems: 14th International Conference, KES 2010, Cardiff, UK, September 8-10, 2010, Proceedings, Part I 14*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 420-431
- [43] J. LIN, E. KEOGH, L. WEI et S. LONARDI, Experiencing SAX: a novel symbolic representation of time series, 2007, 15(2), 107–144.
- [44] B. LKHAGVA, Y. SUZUKI et K. KAWAGOE, Extended SAX: Extension of symbolic aggregate approximation for financial time series data representation. *DEWS2006 4A-i8*, 2006, vol. 7.
- [45] J. SHIEH et E. KEOGH, i SAX: indexing and mining terabyte sized time series, In : *Proceedings of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, 2008, p. 623-631.
- [46] [https://jmotif.github.io/sax-vsm\\_site/morea/algorithm/SAX.html](https://jmotif.github.io/sax-vsm_site/morea/algorithm/SAX.html)
- [47] E. ALPAYDIN, *Introduction to machine learning*. MIT press, 2020.
- [48] <https://www.edureka.co/blog/support-vector-machine-in-python/>

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [49] <https://datascientest.com/APPRENTISSAGE-NON-SUPERVISE>
- [50] V.N. VAPNIK, An overview of statistical learning theory. IEEE transactions on neural networks, 1999, vol. 10, no 5, p. 988-999.
- [51] D. ZHANG et al, Fundamentals of image data mining, Springer International Publishing, 2019.
- [52] M.R. YOUCEFI et al, Utilisation des réseaux de neurones dans l'optimisation des paramètres de forage des puits des hydrocarbures en temps réel, Thèse de doctorat. Université de Boumerdes, 2021
- [53] A. CRIMINISI, J. SHOTTON et E. KONUKOGLU, Decision forests for classification, regression, density estimation, manifold learning and semi-supervised learning [internet], Microsoft Research, 2011
- [54] J. Blanchard, Un système de visualisation pour l'extraction, l'évaluation, et l'exploration interactives des règles d'association, Diss. Université de Nantes, 2005.
- [55] J.R. QUINLAN, Induction of decision trees. Machine learning, 1986, vol. 1, p. 81-106.
- [56] H. EZZIKOURI et M. FAKIR, Algorithmes de classification : ID3 et C4. 5.
- [57] <https://www.imo.universite-paris-saclay.fr>
- [58] R. RAKOTOMALALA, Arbres de décision, Revue Modulad, 2005, vol. 33, p. 163-187.
- [59] D. ERTAS, J.R. BAILEY, L. WANG et al, Drillstring mechanics model for surveillance, root cause analysis, and mitigation of torsional vibrations, SPE Drilling & Completion, 2014, vol. 29, no 04, p. 405-417.
- [60] J.R. BAILEY, E.A.O. BIEDIGER, V. GUPTA et al, Drilling vibrations modeling and field validation, In : IADC/SPE Drilling Conference. OnePetro, 2008.
- [61] Y. AREVALO et A. FERNANDES, Quantification of drillstring-integrity-failure risk using real-time vibration measurements, SPE Drilling & Completion, 2012, vol. 27, no 02, p. 216-222.
- [62] J. ZHAO, Y. SHEN, W. CHEN, et al, Machine learning-based trigger detection of drilling events based on drilling data, In : SPE Eastern Regional Meeting. OnePetro, 2017.

ANNEXES

Annexe 1

Tableau 1 : Echantillon du tableau de données de forage utilisées dans cette étude.

Depth(m)	Bit Depth(m)	Block Position(m)	WOB - max(psi)	WOB - avg(psi)	WOB - min(psi)	Hookload - max(ton)	Hookload - avg(ton)	Hookload - min(ton)	Rotary Torque - max(ft.lb)	Rotary Torque - avr (ft.lb)	Rotary Torque - min(ft.lb)	RPM - max(rpm)	RPM - avg(rpm)	RPM - min(rpm)	SSI index
1284,05	1284,05	30,66	2,881	2,881	2,332	89,949	89,011	88,028	6103,0233	3887,3802	1507,165	66,81	66,81	66,81	118,225079
1284,07	1284,07	30,64	2,893	2,893	2,378	89,903	89,56	88,988	3237,2725	2815,34	2223,6027	138,09	138,09	138,09	36,0052356
1284,08	1284,08	30,63	3,179	3,179	2,836	89,445	89,274	88,988	2807,3804	2465,1176	2244,8283	137,62	137,62	137,62	22,8204975
1284,1	1284,1	30,61	2,584	2,584	2,287	89,994	89,72	89,537	3168,2893	2616,35	1963,5891	138,75	138,75	138,75	46,0450704
1284,18	1284,18	30,52	3,43	3,43	2,744	89,308	88,357	87,067	7435,0771	5108,5155	3736,1478	142,07	142,07	142,07	72,4071269
1284,22	1284,22	30,48	5,534	5,534	5,214	86,701	86,45	85,878	9138,6526	7937,9322	7244,0467	140,99	140,99	140,99	23,8677511
1284,31	1284,31	30,4	5,82	5,82	5,26	87,021	86,541	86,198	8947,5485	7761,4944	5821,7841	141,01	141,01	141,01	40,2727135
1284,39	1284,39	30,32	7,409	7,409	6,083	85,284	84,255	83,5	12848,1947	10518,464	8300,094	140,87	140,87	140,87	43,2392096
1284,41	1284,41	30,29	8,404	8,404	8,187	85,009	84,197	83,82	12710,2283	10879,2992	9053,6765	141,03	141,03	141,03	33,6101778
1284,42	1284,42	30,28	4,322	4,322	4,025	88,851	88,279	87,89	4293,3198	3726,8616	2998,4108	133,16	133,16	133,16	34,7452935
1284,45	1284,45	30,25	2,726	2,726	2,15	90,131	89,647	89,445	3263,8045	2664,1076	2117,4747	138,72	138,72	138,72	43,02866
1284,51	1284,51	30,2	3,522	3,522	2,653	89,171	88,256	87,616	6071,1849	5192,902	3884,727	142,19	142,19	142,19	42,1047403
1284,57	1284,57	30,14	5,122	5,122	4,665	87,342	86,964	86,701	7249,3531	6783,6428	6442,7066	144,35	144,35	144,35	11,8910521
1284,65	1284,65	30,05	6,094	6,094	5,442	86,564	85,729	85,009	10300,8279	8879,8919	7233,4339	143,7	143,7	143,7	34,5431457
1284,76	1284,76	29,95	7,958	7,958	7,272	84,415	83,9	83,317	13002,0803	12070,7334	10433,5616	140,44	140,44	140,44	21,2788951
1284,85	1284,85	29,85	9,296	9,296	8,964	82,951	82,837	82,722	13792,8076	13348,3966	12980,8547	140,97	140,97	140,97	6,08277477
1284,95	1284,95	29,76	9,536	9,536	9,467	82,951	82,802	82,722	13936,1541	13152,0598	12535,1171	140,95	140,95	140,95	10,6526052
1285,04	1285,04	29,67	9,524	9,524	9,33	82,768	82,711	82,539	13362,9892	13002,0803	12731,4539	141,03	141,03	141,03	4,85718658
1285,12	1285,12	29,58	9,547	9,547	9,467	83,088	82,814	82,631	13352,3764	12776,5583	12237,885	141,03	141,03	141,03	8,7229391

**Annexe 2**

Tableau 2 : Echantillon des données générées pour l'apprentissage du classifieur SVM  
(Valeurs affichées par le programme Python)

La représentation SAX	L'évolution du paramètre
[0, 0, 0, 0, 0]	stable
[0, 0, 0, 0, 1]	stable
[0, 0, 0, 1, 0]	stable
[0, 0, 1, 0, 0]	stable
[0, 1, 0, 0, 0]	stable
[1, 0, 0, 0, 0]	stable
[0, 0, 0, 0, 2]	stable
[0, 0, 0, 2, 0]	stable
[0, 0, 2, 0, 0]	stable
[0, 2, 0, 0, 0]	stable
[2, 0, 0, 0, 0]	stable
[0, 0, 0, 1, 1]	ramp up
[0, 0, 1, 0, 1]	fluctuate
[0, 0, 1, 1, 0]	pulse up
[0, 1, 0, 0, 1]	fluctuate
[0, 1, 0, 1, 0]	fluctuate
[0, 1, 1, 0, 0]	pulse up
[1, 0, 0, 0, 1]	pulse down
[1, 0, 0, 1, 0]	fluctuate
[1, 0, 1, 0, 0]	fluctuate
[1, 1, 0, 0, 0]	ramp down
[0, 0, 0, 1, 2]	ramp up
[0, 0, 0, 2, 1]	pulse up
[0, 0, 1, 0, 2]	fluctuate
[0, 0, 1, 2, 0]	pulse up

## Annexe 3

**Affichage de la solution recommandée, au foreur, donnée par l'arbre de décision selon le programme Python**

--- Results for j = 8520 to 8531 ---

1) La profondeur correspond au point de stick&slip est : 1786.08  
 2) la valeur de stick&slips index cest : 86.82700755319966  
 3) l'interval de wob c'est: [15.093 15.596 15.55 15.973 16.522]  
 4) l'interval de rpm c'est: [139.91 139.91 140.27 139.03 138.93]  
 4) la representation de chaine temporelle de WOB en chaine symbolique c'est: [[0 1 0 1 2]]  
 5) la representation de chaine temporelle de RPM en chaine symbolique c'est: [[2 2 2 0 0]]  
 ['the wob evolution is: ramp up']  
 ['the RPM evolution is: ramp down']  
 6) la décision a prendre:  
 Diminuer le WOB et augmenter si nécessaire le RPM.  
 Vérifier s'il y a un changement de formation (une formation dure).  
 Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.  
 Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés.  
 Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.

1) La profondeur correspond au point de stick&slip est : 1786.1  
 2) la valeur de stick&slips index cest : 83.89604559737734  
 3) l'interval de wob c'est: [15.55 15.973 16.522 16.808 16.911]  
 4) l'interval de rpm c'est: [140.27 139.03 138.93 139.72 140.54]  
 4) la representation de chaine temporelle de WOB en chaine symbolique c'est: [[0 0 2 2 2]]  
 5) la representation de chaine temporelle de RPM en chaine symbolique c'est: [[2 0 0 1 2]]  
 ['the wob evolution is: ramp up']  
 ['the RPM evolution is: pulse down']  
 6) la décision a prendre:  
 ajuster les paramètres de forage (diminuer le WOB) jusqu'à la suppression du stick & slip  
 Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement de formation.  
 Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.  
 Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés.  
 Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.

1) La profondeur correspond au point de stick&slip est : 1786.12  
 2) la valeur de stick&slips index cest : 83.60354987391335  
 3) l'interval de wob c'est: [16.522 16.808 16.911 17.05 17.116]  
 4) l'interval de rpm c'est: [138.93 139.72 140.54 139.93 139.34]  
 4) la representation de chaine temporelle de WOB en chaine symbolique c'est: [[0 1 1 2 2]]  
 5) la representation de chaine temporelle de RPM en chaine symbolique c'est: [[0 1 2 1 0]]  
 ['the wob evolution is: ramp up']  
 ['the RPM evolution is: pulse up']  
 6) la décision a prendre:

## ANNEXES

ajuster les paramètres de forage (diminuer le WOB et ajuster le RPM )  
Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement de formation.  
Si le phénomène persiste, vérifier s'il y a un changement dans la rhéologie de la boue.

Si le phénomène persiste, effectuer une remontée de la garniture pour inspecter et remplacer l'outil et le BHA usés.

Ensuite, ajuster les paramètres de forage si nécessaire.

-----