



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : BERKANA Abderrahmane

LAZHARI Kada

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie gazier

Thème

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

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
ABDELMOUIZ AHMED	MCB	Président
HADJADJ ASMA	MCB	Examinatrice
YOUCEFI MOHAMED RIAD	MAB	Rapporteur

Promotion : JUIN 2022

Remerciements

A notre dieu

Nous remercions Dieu « ALLAH » le miséricordieux de nous avoir donnée foi, volonté Et courage pour atteindre nos objectifs.

A monsieur l'encadreur « Mr. YUCEFI MOHAMED RIAD »

Nous tenons à exprimer nos sincères gratitudees à Monsieur maitre assistante à l'université de Laghouat. Pour son savoir, sa patiences ces conseils, ces encouragement, sa disponibilités et ses énergies.

Nos vifs remerciements sont adressés aux examinatrice « Mr. HADJADJ

ASMA » pour vouloir accepter de juger notre travaille et de donner plus de valeur à ce document.

Nous remercions également toutes les personnes, ayant contribués de prés ou de loin à la Réalisation de ce travail.

Merci

Titre du mémoire :

Développement d'un système intelligent pour la détection et l'atténuation du phénomène Stick-Slip à l'aide des algorithmes d'apprentissage automatique.

Nom : Barkana, Lazhari

Prénom : Abderrahmane, Kada

Encadreur : YOUCEFI Mohamed Riad

Résumé : Le phénomène de stick-slip qui peut survenir lors des opérations de forage pétrolier est responsable de la fatigue mécanique, de l'usure des équipements et de l'augmentation des coûts. L'objectif de ce travail est de créer un système intelligent capable d'identifier automatiquement la présence de l'événement stick-slip et de recommander au foreur la solution optimale pour minimiser l'effet stick-slip. Pour cela, plusieurs méthodes, à savoir l'algorithme d'apprentissage automatique SVM et la méthode de représentation des séries temporelles SAX, ont été appliquées dans notre travail pour établir un système robuste pouvant supporter l'équipe de forage en se basant sur les données de surface. Les résultats de l'analyse du changement des paramètres de forage WOB et RPM à travers le système développé dans cette étude ont montré que les approches d'apprentissage automatique peuvent automatiser le processus de forage en temps réel pour forer plus efficacement.

Mots clés : Forage, vibrations de torsion, apprentissage automatique, intelligence artificielle, paramètres de forage

ملخص: ظاهرة الاهتزاز التي يمكن أن تحدث أثناء عمليات التنقيب عن النفط هي المسؤولة عن الإجهاد الميكانيكي وتآكل المعدات وزيادة التكاليف. الهدف من هذه الأطروحة هو إنشاء نظام ذكي قادر على التعرف تلقائيًا على وجود ظاهرة الاهتزاز وتقديم توصيات للحفار بالحل الأمثل لتقليل تأثير ظاهرة الاهتزاز. لهذا، تم تطبيق العديد من الطرق، منها خوارزمية التعلم الآلي SVM وطريقة تمثيل السلاسل الزمنية SAX، في عملنا لإنشاء نظام قوي يمكنه دعم فريق الحفر استنادًا إلى بيانات السطح. أظهرت نتائج تحليل تغيير معاملات الحفر WOB و RPM من خلال النظام الذي تم تطويره في هذه الدراسة أن مناهج التعلم الآلي يمكنها تطوير عملية الحفر في الوقت الفعلي للحفر بشكل أكثر كفاءة

كلمات مفتاحية: الحفر، الاهتزازات، التعلم الآلي، الذكاء الاصطناعي، معاملات الحفر

Abstract: The stick-slip phenomenon that can occur during drilling operations is responsible for mechanical fatigue, equipment wears and increased costs. The objective of this thesis is to create an intelligent system able to automatically identify the presence of the stick-slip event and to recommend to the driller the optimal solution to minimize the stick-slip effect. For this purpose, several methods, namely the SVM machine learning algorithm and the SAX time series representation method, were applied in our work to establish a robust system that can support the drilling team based on the surface data. The results of the analysis of the change in WOB and RPM drilling parameters using the system developed in this study indicated that machine learning approaches can automate the drilling process in real time to drill more efficiently.

Key words: Drilling, torsional vibrations, machine learning, artificial intelligence, drilling parameters

Dédicaces

Ya ALLAH merci de nous avoir montré ce jour.

*Je dédie ce modeste travail tout d'abord à mes parents qui sont pour moi
symbole d'amour et d'affection ;*

*Ma mère, qui m'a soutenu, encouragé, de par son amour, ses sacrifices,
ses conseils, sa présence et sa confiance. Merci d'être là maman.*

*Mon père, qui peut être fier maintenant d'avoir vu le résultat de
nombreuses privations afin qu'on puisse en arrivé là, merci papa pour
les valeurs et les principes inculqué ainsi que pour le soutien.*

En plus je remercie mon frère « MOHAMED »

*Ensuite, à la famille BERKANA de BENELMOUAZE qui m'ont
montré un amour et un soutien inconditionnel.*

*A mes sœurs qui ont un don spécial pour me remonter le moral à chaque
difficulté.*

ABDERRAHMANE

Dédicaces

À la grâce de Dieu, je dédie ce mémoire :

À la personne qui m'a toujours servi de modèle dans la vie et j'espère que par ce travail je pourrais l'honorer : mon père.

À ma mère, sur l'aide logistique interne des besoins m'aidant sur l'aisance de mon travail.

À ma belle-famille. en qui je leur dois l'offre morale dont ils m'ont soutenu

À mes frères de m'avoir soutenue sur le côté moral dans le but de continuer dans la bonne humeur.

Aussi, je le dédie à mes amies en qui leur précieuse contribution m'a beaucoup aidé.

KADA

Table des matières

Introuction générale	1
Chapitre I : Principe et description d'un système de forage.	2
1. Le principe de forage	2
2. Les équipements de l'appareil de forage	3
2.1. Les équipements de surface.....	3
2.1.1. Mât de forage	3
2.2. La garniture de forage.....	6
3. Paramètres de forage.....	8
3.1. Facteurs mécaniques.....	8
3.2. Facteurs hydrauliques	9
Chapitre II : Vibrations des garnitures de forage	11
1. Vibrations de Torsion	11
2. Le phénomène de stick-slip	12
3. Paramètres affectant les vibrations de torsion	13
3.1. Effet des paramètres de forage	13
3.2. Effet de type de l'outil.....	13
3.3. Effet du puits	14
4. Conséquences des vibrations	14
4.1. Endommagement des outils de forage.....	14
4.2. Défaillance des équipements de fond	14
4.3. Augmentation du temps non productif	15
4.4. Mesure des vibrations en cours de forage	15
5. Gestion des vibrations en temps réel	16
Chapitre III : Représentation des séries temporelles et apprentissage automatique : Une revue des algorithmes et leurs implémentations en python.	17

1.	La méthode d'approximation par agrégats symboliques (SAX)	17
1.1.	Principe de l'algorithme	17
1.2.	Implémentions de la méthode SAX en python.....	18
2.	Les machines à vecteurs support SVM.....	21
2.1.	Apprentissage supervisé	21
2.2.	La prédiction avec SVM.....	22
2.3.	Implémentation de SVM en Python	23
Chapitre IV : Élaboration d'un système intelligent pour la détection et l'atténuation du phénomène stick-slip		25
1.	Description et traitement des données	25
2.	Détection du phénomène stick-slip en utilisant l'indice SSI	26
3.	Détection automatique de l'évolution du WOB et RPM pendant un évènement du stick-slip	27
3.1.	Représentation des séries temporelles par la SAX	27
4.	Classification des représentations des séries temporelles par l'algorithme SVM ..	29
4.1.	Génération des données d'apprentissage.....	29
4.2.	Application du SVM pour la classification des représentations SAX.....	30
5.	Expériences numériques	30
Conclusion.....		31
Références		32

Listes des figures

Figure I-1 Structure de Forage Pétrolier	7
Figure I-2 Outils de Forage (gauche : outil tricône, droite : outil PDC).....	8
Figure II-1 Modes de Vibration de Torsion.....	12
Figure II-2 Le Phénomène du Stick-Slip	12
Figure II-3 Plages des vibrations en fonction des paramètres de forage	13
Figure II-4 Usure de l’outil PDC. (a) fracture d'une dent, (b) perte d'une dent.....	14
Figure II-5 Rupture d'une Tige de Forage.....	15
Figure II-6 Mesure de vibration	15
Figure III-1 Les différentes étapes de SAX.....	18
Figure III-2 Importation des données de séries temporelles.....	19
Figure III-3 Normalisation des données de séries temporelles.....	19
Figure III-4 Transformation de la série temporelle en une représentation PAA	20
Figure III-5 Transformation de la représentation PAA en chaîne symbolique.....	21
Figure III-6 Illustration de la classification supervisée	22
Figure III-7 Infinité d’hyperplans séparent les deux classes : points négatifs et points positive.....	22
Figure IV-1 Procédure suivie dans cette étude pour détecter et éliminer le stick-slip.....	28
Figure IV-2 Exemple d'une détection et atténuation d'événement stick slip	31

Liste des tableaux

Tableau IV-1 Description de la section de la section intermédiaire	25
Tableau IV-2 Les plages des paramètres	26
Tableau IV-3 Échantillon de données générées pour l'apprentissage du classifieur SVM	29

Introduction générale

Le forage est un ensemble d'opérations qui permet de creuser un trou de diamètre centimétrique à décimétrique, généralement vertical et utilisé à des fins scientifiques ou économiques.

Durant un forage rotary, plusieurs modes de vibrations peuvent se produire simultanément et il est difficile de les identifier et étudier séparément. On identifie trois modes de vibrations : latéral, axial et de torsion mais les vibrations latérales sont reconnues comme le mode le plus nocif. Le (whirling), qui se produit pendant près de 40% du temps de forage est une forme sévère des vibrations latérales

Les vibrations sévères provoquent des dysfonctionnements de forage et sont à l'origine d'une multiplication du coût et de la durée de forage surtout pour les puits à long déport, les puits directionnels et les puits multilatéraux. La recherche s'intéresse alors à la compréhension et à la modélisation de ce phénomène dynamique considéré comme complexe vu le nombre élevé de variables et paramètres qui entrent en jeu, les plus importants sont :

- le poids sur l'outil et la vitesse de rotation des tiges de forage ;
- la configuration de la garniture de forage ;
- l'architecture du puits.
- les conditions de forage (frottement, densité et viscosité de la boue...).

Le but de ce travail est de développer un système intelligent qui peut détecter la présence des vibrations de torsion en se basant sur les données de forage. Pour cela, des algorithmes tels que l'algorithme d'apprentissage automatique Les machines à vecteurs support (SVM) la méthode d'approximation par agrégats symboliques (SAX) ont été appliqués dans ce travail. La méthodologie proposée dans notre mémoire consiste d'abord à détecter la présence stick-slip. Ensuite, une série temporelle des paramètres de forage est convertie en une chaîne symbolique par la méthode SAX. Cette chaîne symbolique est traduite par un classificateur SVM pour reconnaître l'évolution des paramètres de forage. En se basant sur l'évolution de chaque identifiée automatiquement par le système intelligent, ce dernier recommande au foreur un ajustement des paramètres de forage pour atténuer le phénomène de stick-slip

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

Introduction

Le procédé essentiel de l'exploration et de l'exploitation des gisements pétrolifères reste le forage rotary qui permet d'atteindre de grandes profondeurs dans de bonnes conditions techniques et de sécurité. Cette technique consiste à utiliser un outil de forage vissé à l'extrémité basse d'un train de tiges (garniture de forage) et sur lequel sont appliquées une force et une rotation. La force, appelée poids sur l'outil (WOB) et la rotation, combinées, permettent de détruire la roche. La rotation est appliquée le plus souvent en surface. Le poids est assuré par un ensemble de tiges lourdes (masses-tiges) qui constituent la partie inférieure de la garniture. Les tiges permettent aussi d'acheminer sous pression du fluide de forage (la boue). Celle-ci refroidit l'outil et assure l'évacuation des débris de roche. Pour assurer la solidité à long terme du puits et le préserver contre les venues d'eau, des tubages sont descendus et cimentés à la paroi du puits.

1. Le principe de forage

Seul le chef de poste œuvre aux commandes du treuil. La table de rotation tourne et entraîne l'outil de forage par l'intermédiaire de l'ensemble de la garniture de forage et de la tige d'entraînement. La commande principale est le levier de frein. Le chef de poste contrôle et régle la descente du crochet de forage par action sur ce frein. Les trépons sont utilisés à poids constant. Le poids de tout ce qui est pendu au crochet est constant et connu du foreur par la lecture du poids suspendu au crochet avant de toucher le fond (off bottom). Le poids appliqué sur l'outil est la différence entre le poids au crochet outil suspendu et outil posé. C'est cette différence que le foreur lit sur l'indicateur de poids (communément appelé Martin Decker) et qu'il doit maintenir constante en laissant descendre la tige d'entraînement à la même vitesse que l'avancement de l'outil de forage. Les deux autres paramètres : rotation et débit de boue sont en général fixes, le foreur contrôle et ajuste les valeurs suivant le programme et surtout vérifie que la pression de refoulement aux pompes est et reste conforme[1].

Lorsque l'outil a foré une longueur de tige (30 ft), il faut rallonger la garniture de forage d'autant en vissant sous la tige d'entraînement une tige de forage. Les différentes séquences sont décrites :

Pendant le forage les ouvriers de plancher ont placé une tige dans un fourreau appelé mouse-hole situé à proximité de la table de rotation.

Le chef de poste embraye le treuil pour soulever la garniture jusqu'à la première tige de forage sous la tige d'entraînement. Les sondeurs mettent les cales, la tige d'entraînement peut être dévissée car la garniture est alors suspendue sur la table de rotation. Naturellement, la circulation de boue est alors arrêtée. Les sondeurs présentent la tige d'entraînement sur le filetage femelle de la tige mise en place dans le mouse-hole. Le visage et blocage sont effectués sur le mouse-hole.

En actionnant le treuil, le chef de poste soulève l'ensemble tige d'entraînement et tige de forage. Le visage et le blocage de la nouvelle tige sur la garniture étant faits, le chef de poste remet la circulation du fluide de forage.

Le foreur positionne le carré d'entraînement de la kelly dans la table de rotation et le forage peut reprendre. Lorsque l'outil est usé ou lorsque l'on a atteint la profondeur souhaitée, il faut remonter la totalité de la garniture soit pour changer l'outil soit pour descendre les tubes casing. La première opération est de décrocher la tête d'injection du crochet de forage et de ranger dans un fourreau appelé rat-hole l'ensemble tige d'entraînement, tête d'injection toujours reliées aux pompes par le flexible. Les sondeurs de plancher ferment l'élévateur sous le tool-joint de la première tige et le chef de poste manœuvre le treuil pour soulever la garniture sur une hauteur correspondant à trois tiges. La quatrième tige est coincée dans la table par les cales et on dévisse cette connexion avec des clés. Un ensemble de trois tiges est alors suspendu à l'élévateur. Les sondeurs de plancher repoussent l'extrémité inférieure de cette longueur (stand) pour l'appuyer sur un sommier de gerbage (set back), dès que cela est fait l'accrocheur qui se trouve sur une passerelle dans la tour, ouvre l'élévateur, maintient la longueur puis range l'extrémité supérieure de cette même longueur dans des râteliers. On continue ainsi jusqu'aux masses-tiges que l'on stocke également verticalement par trois. La longueur de gerbage est fonction de la hauteur de la tour. Les plus gros appareils manœuvrent en triple, les appareils légers en double et pour les plus petits en simple.

La manœuvre de descente (tripping in) se fait identiquement. Il faut remarquer que pendant cette opération, on ne peut ni tourner la garniture ni circuler. Pour ce faire, si besoin était, il faut reprendre la tige d'entraînement hors du rat-hole et revisser l'ensemble sur les tiges.

2. Les équipements de l'appareil de forage

2.1. Les équipements de surface

2.1.1. Mât de forage

Ils permettent de réaliser les mêmes fonctions que les tours. Leur avantage est le gain de temps qu'ils apportent lors du montage et démontage. Il a remplacé la tour [derrick] grâce à la rapidité de son montage et démontage, il peut être du type qui ne se démonte pas pour le déménagement, ou de celui qui se démonte en un petit nombre d'éléments. Il est dressé tout monter sur la plate-forme de forage. Il est composé de deux montants reliés par des entretoises et des croisillons qui reposent sur une substructure.

Une plate-forme installée au sommet, comportant des traverses de forte capacité, supporte le moufle fixe. Une passerelle d'accrochage est installée à une hauteur de 26 mètres du plancher pour permettre l'accrochage des longueurs de tiges. Elle est accrochée au mât par deux attaches, repose sur deux jambes de force, et est maintenue en haut par deux câbles. Elle comprend deux rangées pour le stockage des tiges et masses tiges. Les rangées de stockage sont divisées en plusieurs autres rangées séparées par des traverses munies chacune d'un dispositif de

sécurité pour empêcher les tiges d'en sortir. La longueur maximale d'une longueur de tiges à stocker dans le mât ne doit pas dépasser 30 mètres, si non les tiges risquent de se déformer de façon permanente. A environ 9 mètres du plancher est montée une passerelle de tubages qui permet le guidage de ces derniers lors de leur vissage. La hauteur de cette passerelle est ajustable entre 6 et 12 mètres à l'aide d'un treuil à air. Les tiges et tubages sont préparés sur des traîtresses situées de part et d'autre d'un plan horizontal appelé. Ces tiges et tubages sont roulés sur ces traîtreux jusqu'à atteindre le (Wal k-way), puis ils sont remontés sur le plancher à l'aide du treuil à air[2].

2.1.2. Moufle fixe (crow-block)

Le moufle fixe a des poulies alignées 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. Pour prolonger la durée de vie des poulies et assurer une usure uniforme, il est recommandé d'intervertir la position des poulies tous les ans environ en interchangeant le brin actif et le brin mort, ce qui est facilement réalisable avec les moufles fixes symétriques, par rotation de 180°.

2.1.3. Moufle mobile et crochet

Le moufle mobile comporte une poulie de moins que le moufle fixe correspondant. Les poulies sont montées sur le même axe par l'intermédiaire de roulements à rouleaux coniques Cet axe est monté sur des paliers situés sur des flasques, en tôle très épaisse, qui reçoivent à leur partie inférieure le crochet ou l'attache du crochet. L'axe est percé pour permettre le graissage des roulements. Un carter entoure complètement les poulies, laissant seulement passer les brins du mouflage. Les moufles sont simples et robustes. L'entretien principal est le graissage régulier des roulements. Il est aussi nécessaire, de temps en temps, de vérifier l'état d'usure des gorges des poulies pour éviter les dommages que cette usure peut causer au câble.

2.1.4. Treuil de forage

C'est le cœur d'un appareil de forage. Sa capacité caractérise un rig 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.
- Sur certains appareils, il assure l'entraînement de la table de rotation par l'intermédiaire de cardans ou de chaînes de pignons.
- L'entraînement d'un arbre secondaire permettant de dévisser et visser les tiges et les tubages (cabestan).
- Le déplacement de lourdes charges à de grandes vitesses.

Un treuil de forage est caractérisé par sa puissance maximale de levage.

2.1.5. Câble de forage

Un câble est constitué de plusieurs torons disposés en spirale autour d'une âme. Chaque toron est lui-même constitué de plusieurs fils calibrés également disposés en hélice sur plusieurs couches.

- Câblage normal (ou croisé) : le sens d'enroulement des fils constituant les torons est contraire à celui des torons.
- Câblage inverse (ou Lang) : le sens d'enroulement des fils et des torons est le même.

2.1.6. Table de rotation

En cours de forage, la table de rotation transmet le mouvement de rotation à la garniture de forage, par l'intermédiaire de fourrures et de la tige d'entraînement, 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 $49''^{1/2}$. La motorisation de la table de rotation se fait par l'intermédiaire d'une roue d'entrée et chaîne soit à partir du treuil, soit, sur les appareils lourds, par moteur électrique indépendant de la transmission du treuil.

La table de rotation se compose de 3 parties :

- Le bâti,
- La partie tournante,
- L'arbre d'entraînement.

Le corps repose sur la substructure à laquelle il est solidement fixé. La partie tournante repose sur le bâti par l'intermédiaire d'un roulement à billes ou à rouleaux qui assure en même temps sa rotation.

2.1.7. Tige d'entraînement

De section carrée, hexagonale ou triangulaire, elle est entraînée en rotation par la table et par l'intermédiaire du carré (Kelly drive brushing) monté autour de sa longueur courante. Ce carré est constitué de quatre rouleaux à axe horizontal de forme approprié pour transmettre le couple à la tige et par conséquent à la garniture de forage vissée sous le raccord inférieur. L'ensemble peut coulisser longitudinalement de longueur totale 40 ou 54 ft, elle dispose respectivement d'une longueur utile de 37 ou 51 ft. Pour des raisons de sécurité vis-à-vis d'éruption possible par l'intérieur de la garniture, on monte des vannes à chaque extrémité de la tige d'entraînement. Ces deux vannes sont opérées par rotation d'un quart 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.

2.1.8. Les pompes

Les pompes sont des machines servant à élever les liquides ou les mélanges de liquides d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, ou refouler les liquides d'une région à faible pression vers une région à haute pression. Le fonctionnement d'une pompe consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue, ...etc.) de la pompe. Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique de son moteur d'entraînement en énergie hydraulique.

2.2. La garniture de forage

Le forage rotary exige l'utilisation d'un arbre de forage creux appelé garniture de forage, qui a pour principales fonctions :

- Entraîner l'outil en rotation,
- Appliquer un certain effort,
- Apporter l'énergie hydraulique nécessaire à l'évacuation des déblais.

Une garniture de forage est constituée des principaux éléments suivants :

- Les tiges.
- Les tiges lourdes.
- Les masse-tiges.
- Les équipements de fond
- Les tiges

2.2.1. Les tiges de forage

Les tiges de forage permettent la transmission de la rotation de la table à l'outil et le passage du fluide de forage jusqu'à ce dernier. Elles doivent travailler en tension pour éviter leur frottement contre les parois du puits, qui peuvent causer leur usure et les éboulements des parois, et la déviation.

2.2.2. Les massetiges

Les masse-tiges permettent de :

- Mettre du poids sur l'outil pour éviter de faire travailler les tiges de forage en compression. Le poids utilisable des masse-tiges ne devra pas excéder 80% de leur poids total dans la boue.
- Jouer le rôle du plomb du fil à plomb pour forer un trou aussi droit et vertical que possible. Elles ne rempliront pleinement ces conditions que si elles sont aussi rigides que possible donc aussi largement dimensionnées que possible.

Une masse-tige est caractérisée par : Ses diamètres extérieur et intérieur. Le diamètre intérieur est normalisé par l'API en fonction du diamètre extérieur.

Lorsqu'il y a un choix possible, il est avantageux de choisir le plus petit diamètre intérieur de façon à augmenter la résistance de la connexion fileté. Il existe plusieurs profils des masses tiges: lisse, spiralé ou carré.

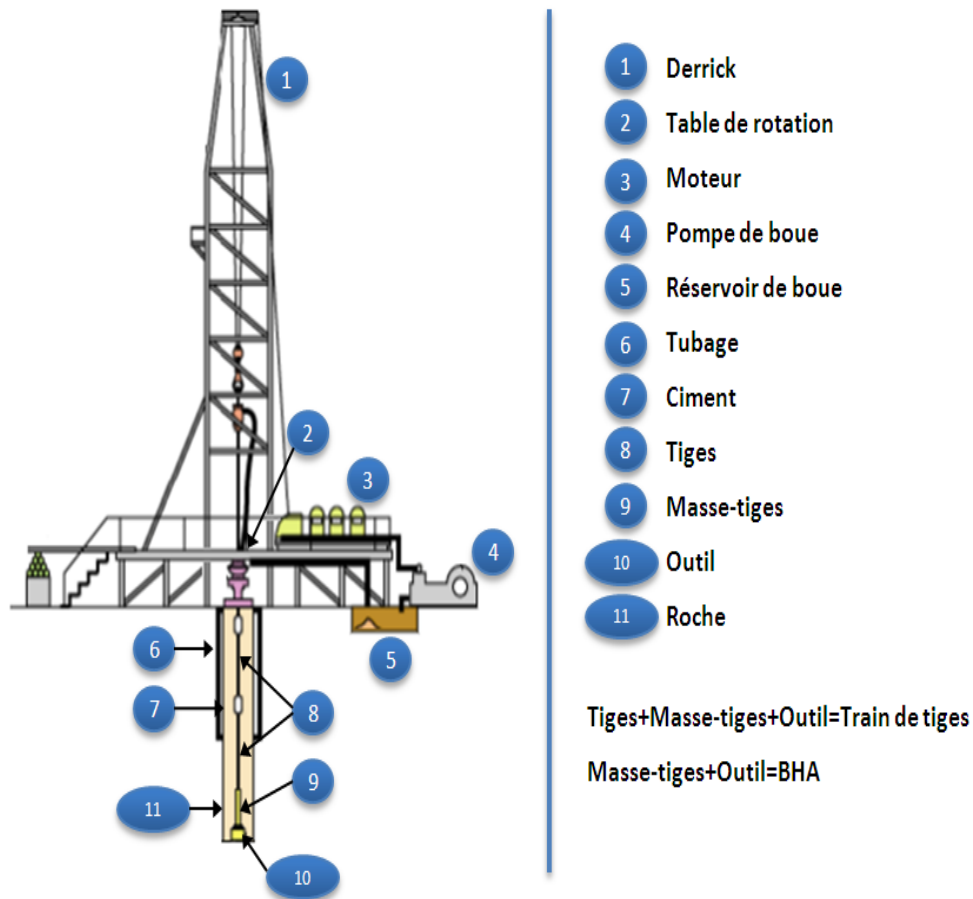


Figure I-1 Structure de Forage Pétrolier

2.2.3. L'outil de forage

L'outil de forage est la pièce la moins volumineuse mais la plus importante pour réaliser un puits de forage. C'est le premier élément à s'attaquer aux terrains. Le choix d'un outil de forage dépend essentiellement de la nature des terrains à traverser. Les outils de forage se distinguent par le mode de destruction des roches.

Les outils de forage se classent en deux catégories :

- a. **Les outils à molettes** : Ils sont constitués de trois cônes 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.

- b. Les outils diamant :** Ils 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. Les outils ont évolué au cours du temps pour répondre aux problèmes techniques du forage qui s'avèrent de plus en plus complexes.



Figure I-2 Outils de Forage (gauche : outil tricône, droite : outil PDC)

3. Paramètres de forage

Les paramètres de forage sont les différents facteurs mécaniques et hydrauliques (les grandeurs physiques) agissant sur la vitesse de progression « Rate of Penetration » (LeROP correspond à la profondeur forée par heure (mètres /heures)). L'optimisation de la vitesse de progression est un aspect très important dans l'analyse du processus de forage car c'est directement lié au temps passé sur une installation sur terre ou marine.

3.1. Facteurs mécaniques

Les principaux paramètres mécaniques sont : la vitesse de rotation, le poids sur l'outil et le couple exercé sur l'outil.

3.1.1. La vitesse de rotation

Le choix de la vitesse de rotation dépend de celle du poids sur l'outil (WOB). En surface, elle peut être contrôlée mais elle peut être différente de la vitesse de rotation de l'outil (trépan). Les vitesses de rotation usuelles s'étendent entre 60 et 250 (tours/min).

3.1.2. Le poids sur l'outil WOB (Weight on Bit)

Le poids sur l'outil WOB (Weight on Bit) désigne la force appliquée par la garniture de forage sur l'outil suivant son axe de rotation. Cette force dépend du poids de la garniture de forage, et de la tension du câble de soutien de la garniture. Les grandeurs usuelles de WOB s'étendent entre 10kN et 10^3 kN.

3.1.3. Le couple exercé sur l'outil

Le couple exercé sur l'outil T_{TOB} (Torque On Bit). Le couple exercé sur l'outil correspond au couple transmis par la garniture au trépan suivant la révolution de son axe de rotation. Compte tenu des frottements des trains de tiges contre la paroi du puits de gaz ou du pétrole, ce couple est nettement inférieur à celui mesuré en surface. Le couple T_{TOB} représente les effets combinés du couple réactif et des forces de frottement non linéaires sur la longueur du BHA (Bottom Hole Assembly). La valeur du couple en surface varie typiquement entre 200 et 3000 Kg.m.

3.2. Facteurs hydrauliques

L'opération de forage se réalise en présence d'un système de la lubrification se trouvant à la surface et géré par un système hydraulique[3].

3.2.1. Fluide de forage.

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.

3.2.2. Pression et débit hydraulique

Le problème d'évacuation des déblais ne dépend pas uniquement des propriétés du fluide et du débit qui lui sont imposés, mais la surface de la colonne d'évacuation et les pertes sont d'autres facteurs à prendre en compte. Le fluide (boues ayant une densité et une composition affectée au forage) dans un forage est un élément clé, car il évacue les déblais qui s'accumulent au fond du trou, il stabilise les parois du trou lorsque ce dernier est encore sans cuvelage (protection des constructions situées en sous-sol contre les pressions hydrostatiques horizontales) et enfin il peut aussi lubrifier et refroidir l'outil en activité. La perte du fluide mène habituellement à une diminution de la pression, ce qui peut poser des problèmes majeurs au foreur. Nous nous intéressons au fluide en "circulation directe", celui qui descend par le train de tiges. Le fluide en "circulation inverse" est celui qui monte par l'espace annulaire. La pression et le débit hydraulique représentent les variables physiques qui doivent favoriser une bonne évacuation des déblais et éviter des problèmes d'encrassement du trépan ou du puits.

3.2.3. Densité de la boue

L'obtention des informations relatives au puits et particulièrement 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.

Chapitre II : Vibrations des garnitures de forage

Introduction

Le phénomène de vibrations est récurrent au cours des opérations de forage pétrolier, et constitue la cause majeure de la fatigue des systèmes de forage. Les foreurs connaissent les vibrations intimement associées au forage par leur 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, répercussions sur l'indicateur de poids. Les phénomènes de vibrations liés au forage. Les vibrations de la garniture sont décomposées selon trois modes : axial, de torsion et latéral.

Les vibrations axiales qui peuvent se propager facilement vers la surface, sont se produisent quand l'outil est en contact intermittent avec le fond du trou. L'outil tricône est plus propice pour développer ce type de vibrations. Le « bit bounce » est une forme sévère des vibrations axiales.

Les Vibrations latérales sont pratiquement indétectables en surface, ce qui empêche d'éviter les dommages qu'elles peuvent causer. Ce mode de vibrations est dû au non alignement de la garniture par rapport à l'axe du forage, à son interaction avec les parois du forage ainsi qu'aux fluctuations du poids sur l'outil. Le mouvement tourbillonnaire ou "whirl" est un cas spécifique de vibrations latérales. Il peut s'initier soit au niveau de l'outil (bit whirl), soit au niveau de la BHA (BHA whirl).

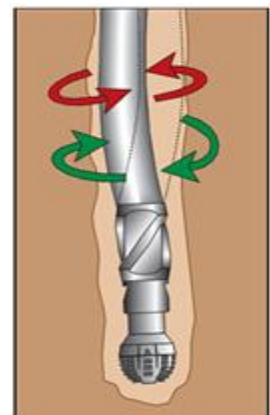
Les vibrations de torsion se manifestent sous la forme d'un phénomène d'adhérence glissement s'appelle "stick-slip". Le phénomène de stick slip associé aux vibrations de torsion provoque des arrêts cycliques de l'outil sur des périodes pouvant représenter jusqu'à cinquante pour cent du temps de forage.

Généralement, les trois types de vibrations se produisent simultanément durant le processus de forage et dans certains cas il est difficile de les identifier séparément. Les vibrations les plus sévères se produisent au niveau de la BHA[4]. Elles sont responsables de la réduction de la vitesse du forage et donc de l'augmentation des coûts.

Ce chapitre décrit le mode de vibrations de torsion en accordant une importance particulière au phénomène stick-slip que nous avons traité dans le cadre de notre travail.

1. Vibrations de Torsion

Des variations du couple de torsion en surface sont souvent observées au cours du forage. Par ailleurs, même si la vitesse de rotation est maintenue constante en surface, des mesures fond de trou montrent



que la vitesse de rotation de l'outil de forage peut présenter des fluctuations.

Ces observations mettent en évidence l'existence des vibrations de torsion au niveau de la garniture (**Figure II-1**).

L'interaction garniture-formation est la cause primaire de ces vibrations. Les vibrations de torsion sont nocives puisqu'elles causent l'usure de tiges, l'endommagement des raccords de tiges et de l'outil de forage

Figure II-1 Modes de Vibration de Torsion

2. Le phénomène de stick-slip

Le phénomène de stick-slip est la forme sévère des vibrations de torsion, il se produit généralement au niveau de l'outil et est caractérisé par une alternance de phases d'arrêt et d'accélération de l'outil[5]. Pendant la phase d'accélération, la vitesse de rotation de l'outil peut atteindre plusieurs multiples de la vitesse de consigne en surface. Tandis que pendant ces périodes d'arrêt, les tiges, entraînées en rotation depuis la surface, sont mises en torsion grâce à leur élasticité propre. L'outil ne redémarrera que lorsque le couple au fond sera supérieur au couple de frottement statique. 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 avec une vitesse de rotation instantanée peut atteindre le triple, voire plus, de la vitesse de surface (**Figure II-2**).

Le stick-slip est un phénomène auto-entretenu, donc une fois initié il ne sera pas atténué naturellement. Les vibrations de torsion et le stick-slip se développent surtout lors de l'utilisation des outils PDC, plus consommateurs de couple que les outils tricônes.

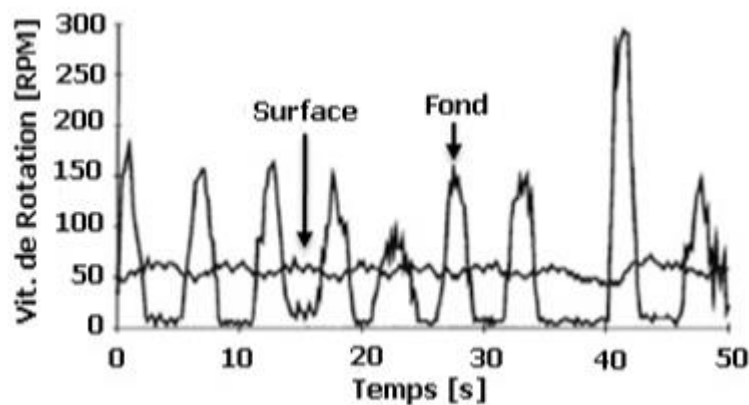


Figure II-2 Le Phénomène du Stick-Slip

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. 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. Paramètres affectant les vibrations de torsion

De nombreux paramètres jouent un rôle dans la vibration de torsion

3.1. 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[6].

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-3** représente un exemple des plages des vibrations en fonction des paramètres de forage.

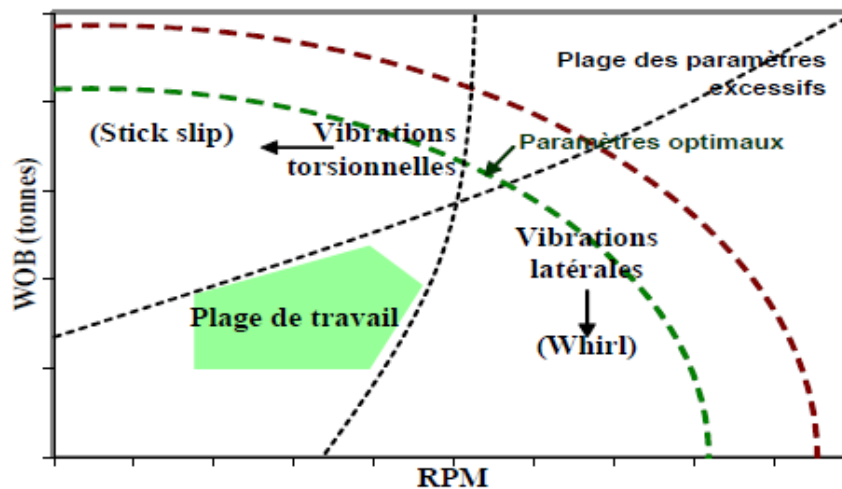


Figure II-3 Plages des vibrations en fonction des paramètres de forage

3.2. 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 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[7].

3.3. 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

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.

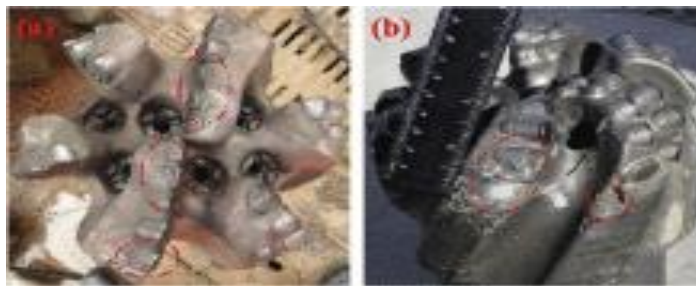


Figure II-4 Usure de l'outil PDC. (a) fracture d'une dent, (b) perte d'une dent.

4.2. Défaillance des équipements de fond

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



Figure II-5 Rupture d'une Tige de Forage

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[8].

4.4. Mesure des vibrations en cours de forage

Les sondes de mesure des vibrations utilisent trois axes, Les trois axes 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. 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.

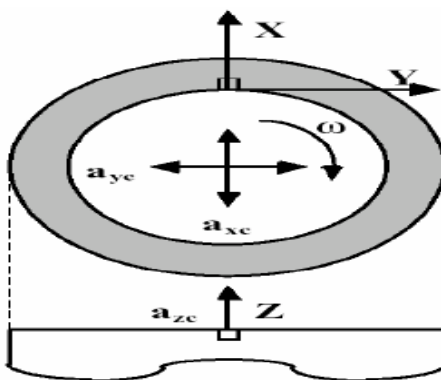


Figure II-6 Mesure de vibration

5. 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.

Chapitre III : Représentation des séries temporelles et apprentissage automatique : Une revue des algorithmes et leurs implémentations en python.

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 [9] transforme une série temporelle X de longueur n en une chaîne de caractères de longueur arbitraire ω , où $\omega \ll n$, en utilisant un alphabet A de taille $a > 2$. L'algorithme se compose de trois étapes : (i) dans la première étape, les séries temporelles sont normalisées. (ii) il transforme la série temporelle originale en une représentation PAA (en anglais : PiecewiseAggregate Approximation PAA).

PAA c'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'AAP, 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[10].

La représentation PAA de la série temporelle est ensuite discrétisée. La discrétisation de la représentation PAA d'une série temporelle 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) = nombre des points d'arrêt +1.

Leurs emplacements sont déterminés par des tables de consultation statistiques de sorte que ces points de découpage produisent des zones de taille égale sous la curve Gaussienne. On assigne à l'intervalle situé entre deux points de découpage successifs un symbole de l'alphabet, et chaque morceau de PAA qui se trouve dans cet intervalle est discrétisé par ce symbole. La dernière étape de SAX consiste à utiliser la mesure de similarité suivante :

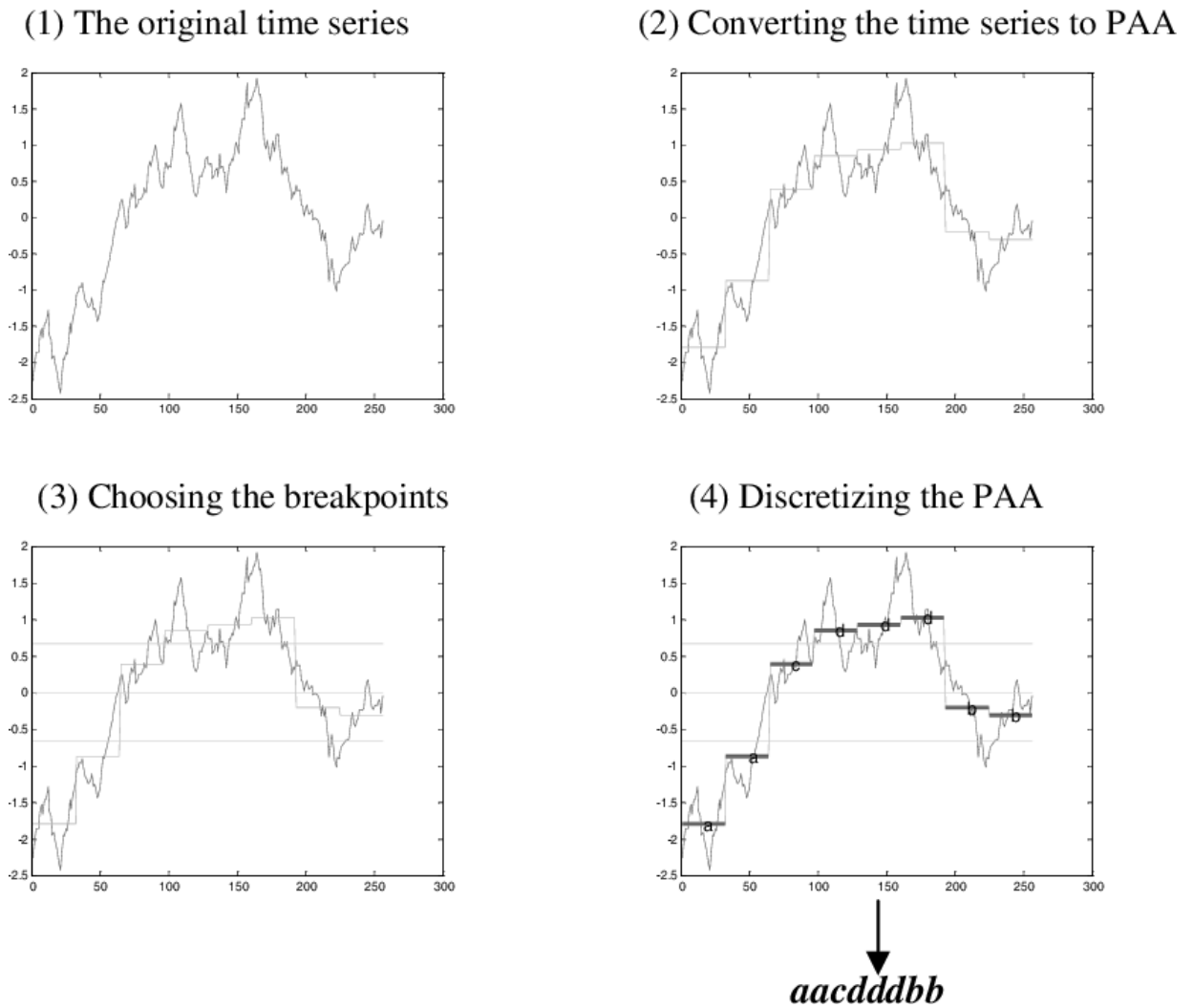


Figure III-1 Les différentes étapes de SAX

1.2. 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 III-1**.

1.2.1. 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.

```
Data= pd.read_csv(r'C:\file location\filename.csv')
Ts1=Data1[in1:in2,1]
Ts2=Data1[in1:in2,2]
```

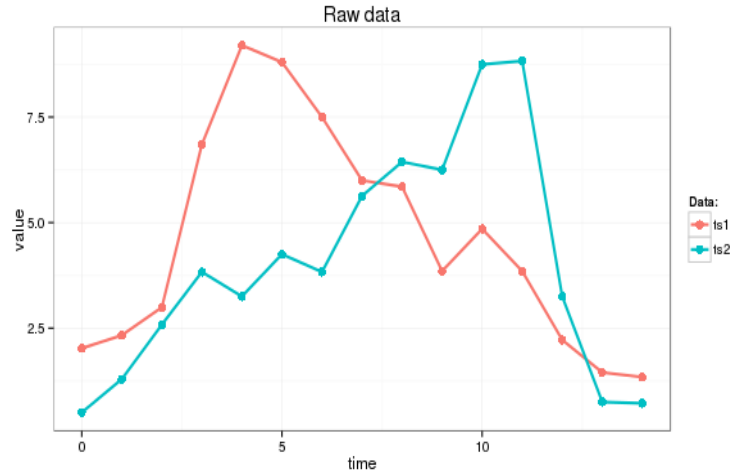


Figure III-2 Importation des données de séries temporelles

Nous allons transformer ces deux séries temporelles en chaînes de longueur 9 dont les symboles proviennent de 4 alphabets.

1.2.2. Normalisation

Avant de transformer les séries temporelles avec SAX, nous normalisons d'abord les données 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)
```

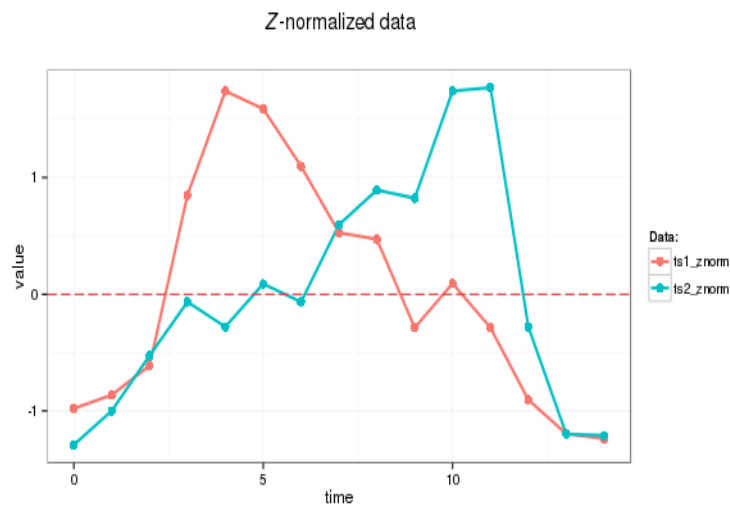


Figure III-3 Normalisation des données de séries temporelles

1.2.3. Transformation de la série temporelle en une représentation PAA

```

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)

```

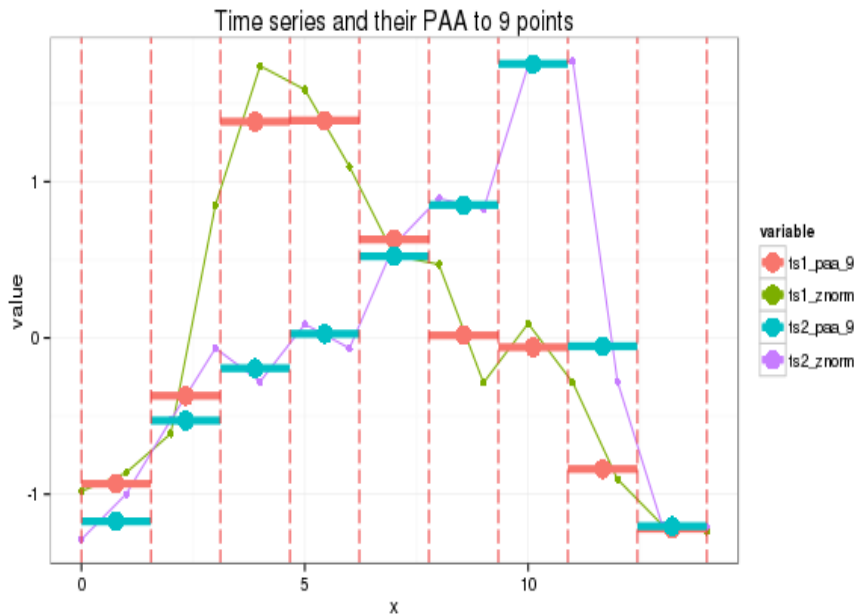


Figure III-4 Transformation de la série temporelle en une représentation PAA

1.2.4. Transformation de la représentation PAA en chaîne symbolique

Dans cet exemple, on a utilisé quatre niveaux de où 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.

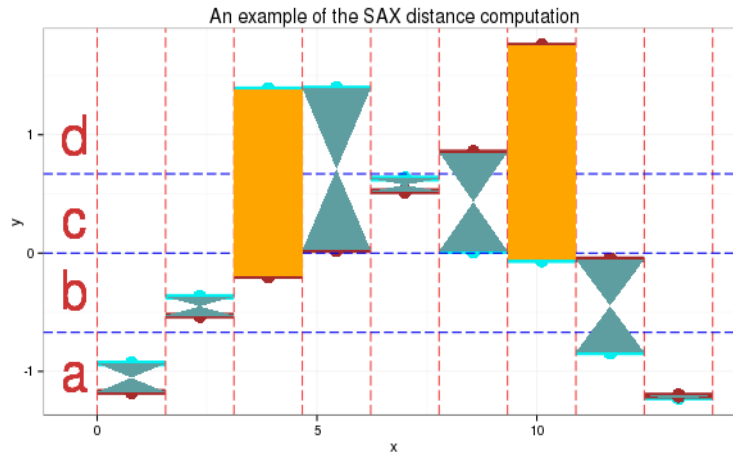


Figure III-5 Transformation de la représentation PAA en chaîne symbolique

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

Transformation SAX de ts1: "abddccbaa"

Transformation SAX de ts2: "abbccddba"

2. 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[11] dans les années 1990 pour la classification supervisée.

2.1. Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé est la branche d'apprentissage qui 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 $(\vec{x}_i, \vec{y}_i) \in E \times F$, $f(\vec{x}_i) \approx \vec{y}_i$

Un problème d'apprentissage supervisé dans lequel l'espace des variables forme des ensembles discrets et finis dont leurs étiquettes y correspondent à des catégories à identifier, est appelé un problème de classification supervisée. 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 multiclassée. La **Figure II-6** illustre la un problème de classification.

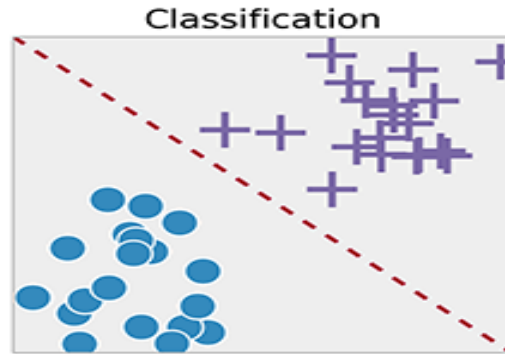


Figure III-6 Illustration de la classification supervisée

2.2. 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 III-7** 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 :

$$\begin{cases} w \cdot x_i + b > 0 & \text{si } y_n = 1 \\ w \cdot x_i + b < 0 & \text{si } y_n = -1 \end{cases} \quad \text{(II. 3)}$$

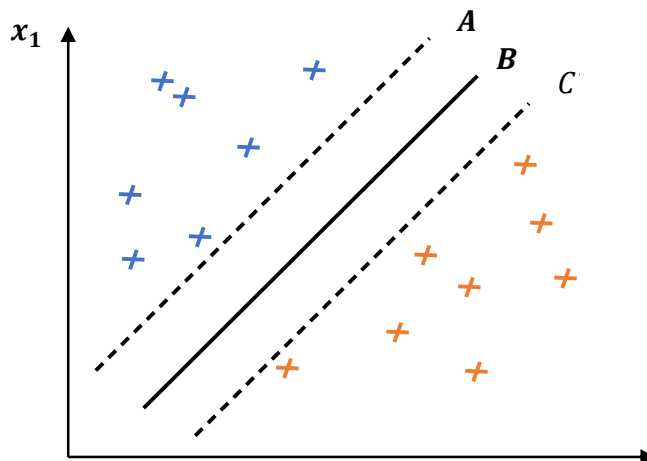


Figure III-7 Infinité d'hyperplans séparent les deux classes : points négatifs et points positive

Il est évident que les trois hyper plans décrits dans **Figure III-7** 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 :

$$w \cdot x_i + b = M \tag{II. 4)}$$

Aétant symétrique de B par rapport à C son équation est alors :

$$w \cdot x_i + b = -M \tag{II. 5)}$$

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 :

$$(x_+^* - x_-^*) \frac{w}{\|w\|} = \frac{1}{\|w\|} \tag{II. 6)}$$

Le problème que doivent résoudre les machines à vecteurs support est formulé comme suit [12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{sous contrainte } y_i(w^T \cdot x_i + b) \geq 1 \end{array} \right. \tag{II. 7)}$$

2.3. 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 ScikitLearn, comme décrit ci-dessous :

2.3.1. Importation de l'ensemble de données

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

2.3.2. Division et ajustement des données d'entraînement d'apprentissage d 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
```

2.3.3. 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
```

2.3.4. Prédire les classes pour l'ensemble de test

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

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

1. Description et traitement des données

Les données ont été enregistrées en fonction du temps à l'aide de divers capteurs installés en surface lors du forage de la section la section intermédiaire. Cette section est forée à partir une profondeur de 1284 m à travers plusieurs couches comme le montre le **Tableau IV-1**.

Tableau IV-1 Description de la section de la section intermédiaire

Stratigraphie	Épaisseur (m)
Turonien	58
Cénomanién	216
Albien	159
Aptien	30
Barremien	314

Après l'acquisition des données de forage, on a passé à l'étape du traitement des données de forage en appliquant les différentes stratégies pour la suppression des données affectées par les perturbations et le bruit, la suppression des données de manœuvre, et enfin la normalisation des données. Les mesures erronées et le bruit peuvent être trouvés dans pratiquement toutes les données en raison d'une mauvaise calibration ou un dysfonctionnement des capteurs. Pour cette raison, nous avons d'abord traité les données collectées en supprimant les points de données contenant des valeurs irréalistes telles que des valeurs négatives. Ensuite, nous avons divisé les données en deux ensembles : les données mesurées pendant le forage et les données mesurées pendant les manœuvres de remonte et de descente.

Dans notre étude, on a établi cette classification à travers un algorithme MATLAB. Cet algorithme calcule la différence entre la profondeur mesurée et la position de l'outil et l'utilise comme un paramètre clé pour la ségrégation des données. L'ensemble de données de forage correspond aux observations où la différence entre la profondeur mesurée et la position de l'outil est inférieure ou égale à 0.1 m, le train de tiges est entraîné par le mouvement de rotation et le moufle mobile se déplace vers le bas et les pompes à boue sont en marche, tandis que les données de manœuvres sont identifiées lorsque l'outil de forage est loin du fond du trou, le torque diminue de manière significative et le WOB prit des valeurs nulles. Après la classification

des données, seules les données de forage ont été utilisées pour la détection et l'atténuation du stick-slip. Cet ensemble des données se compose de 11040 observations de sept paramètres, y compris la profondeur, la position de l'outil, la position du moufle mobile, le WOB, le RPM, le débit, le torque de forage. La description statistique des données de forage est illustrée dans le **Tableau IV-2**.

Tableau IV-2 Les plages des paramètres

Parameters	Valeur_max	Valeur_min
La profondeur (m)	2212,98	1284,05
WOB (lb*10 ³)	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

A commune méthode utilisé pour mesurer l'effet des vibrations de torsion est le calcul de l'indice de stick-slip qui peut être calculé par le RPM de fond ou le torque de surface comme le montre l'équation 1 et 2[13], respectivement.

$$SSI = \frac{bit\ RPM_{Max} - bit\ RPM_{Min}}{bit\ RPM_{Avrege}} \quad 1)$$

$$SSI = \frac{Surface\ torque_{Max} - Surface\ torque_{Min}}{Surface\ torque_{Avrege}} \quad 2)$$

avec SSI représente l'indice du stick-slip, et *bit RPM* est la vitesse de rotation de l'outil de forage au fond du puits.

Dans notre étude, seulement les données de surface sont disponibles donc on a utilisé l'équation 2 pour calculer le stick slip index. Un seuil de SSI de valeur égale à 0.8 a été fixé dans notre étude pour détecter le phénomène du stick-slip. Si la valeur de SSI dépasse 0.8, l'observation est considérée comme un événement de stick-slip. Le seuil de SSI est fixé à 0,8 dans notre étude car pour une valeur de SSI supérieure à 0.8, l'outil de forage est considéré dans un état sévère de stick slip. Une valeur de SSI supérieure à 0.8 représente le cas où l'outil de forage est stationnaire et non rotatif. De plus, les études [14,15]ont montré que le maintien de SSI inférieur à un seuil de 1 est essentiel pour éviter les dysfonctionnements de forage.

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

3.1. Représentation des séries temporelles par la SAX

Une fois le système extrait une série temporelle contenant dix observations ou chaque observation est enregistrée chaque cinq secondes (c'est-à-dire cette série chronologique cumule les observations enregistrées 50 secondes avant la détection du phénomène stick-slip), on applique la méthode de SAX pour convertir cette série temporelle en une chaîne symbolique qui se compose des cinq alphabets (a ~ e), où chaque alphabet représente cinq observations des données comme illustré dans l'organigramme de la **Figure IV-1**.

Généralement, la méthode SAX suppose que les séries temporelles sont distribuées de manière Gaussienne[16]. Cependant, de nombreux intervalles de données de forage ne sont pas distribués de manière Gaussienne. Pour cette raison, nous attribuons directement l'état « constant » à l'intervalle des données qui présente de petites fluctuations au lieu d'appliquer la méthode SAX.

Pour cela, le système commence par le calcul des valeurs maximale V_{max} et minimale V_{min} du WOB. Ensuite, la variance $V_{max} - V_{min}$ entre la valeur maximale et minimale 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 les valeurs V_{max} et V_{min} , il existe trois scénarios possibles :

- Si la différence $V_{max} - V_{min}$ est supérieure au seuil, la méthode SAX est appliquée à la série temporelle.
- Si la différence $V_{max} - V_{min}$ est inférieure au seuil, la série temporelle présente de petites fluctuations et donc l'évolution du paramètre est considérée comme constante.
- Si les valeurs V_{max} et V_{min} sont nulles, le paramètre est nul.

En suivant le flux de travail susmentionné, le système intelligent développé dans ce chapitre extrait les séries temporelles des paramètres de forage puis les converties en chaînes symboliques en utilisant la méthode SAX.

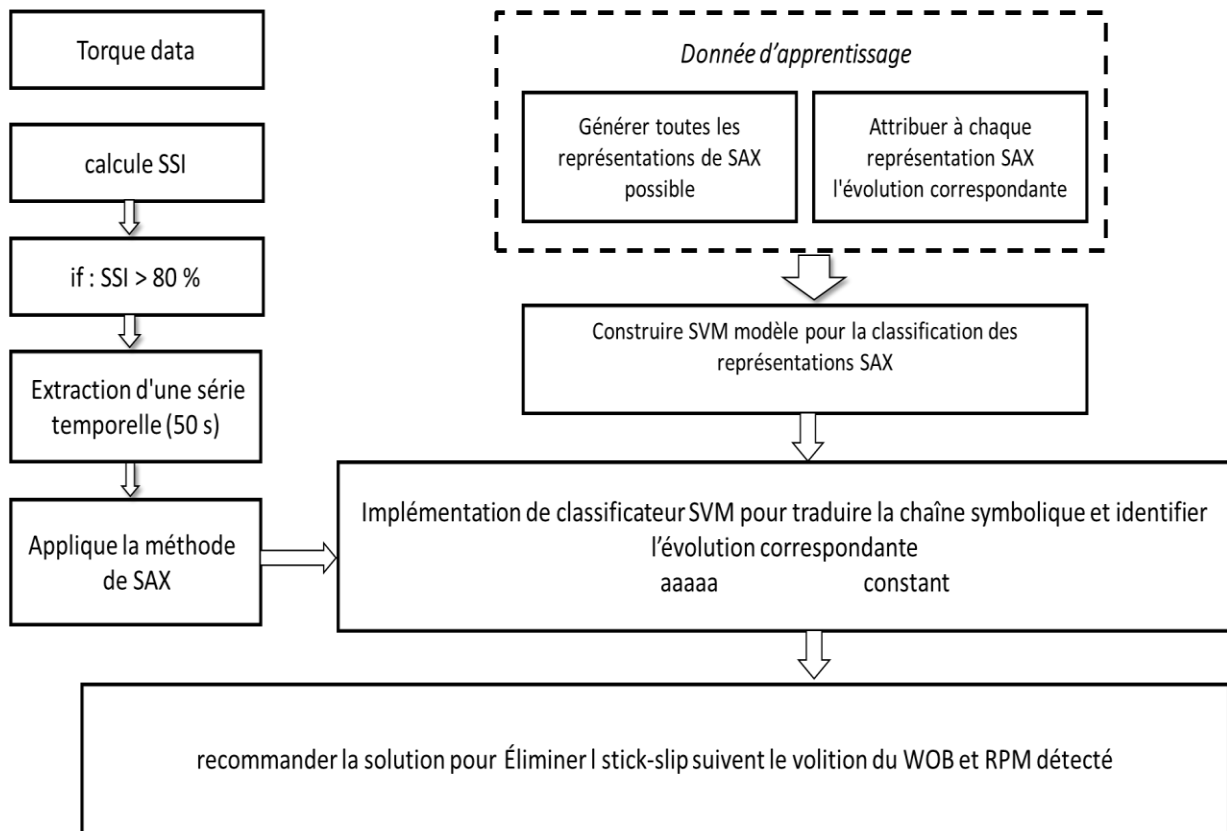


Figure IV-1 Procédure suivie dans cette étude pour détecter et éliminer le stick-slip

4. Classification des représentations des séries temporelles par l'algorithme SVM

Comme décrit dans la **Figure IV-1**, une fois 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 50 secondes. Un classifieur SVM qui peut reconnaître l'évolution des paramètres à partir de la chaîne symbolique fournie par la méthode SAX est développé dans cette section.

4.1. Génération des données d'apprentissage

Pour élaborer un modèle de classification des représentations SAX, nous avons généré toutes les combinaisons possibles entre les trois alphabets a, b, et c. Ayant trois alphabets et une taille de la chaîne symbolique égale à cinq, le nombre de combinaisons égal à $3^5 = 243$. Après la génération de toutes les 243 combinaisons possibles que la méthode SAX peut produire pour représenter les séries temporelles, nous avons attribué manuellement à chaque chaîne symbolique l'évolution appropriée qu'elle représente. **Tableau IV-3** révèle un échantillon des combinaisons générées 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
a	a	a	a	a	a	Constant
c	b	b	a	a	c	Diminuer
c	b	b	a	c	c	Diminuer puis Augmenter
a	a	b	c	a	a	Augmenter puis Diminuer
c	b	c	a	b	c	Fluctuer
a	b	b	c	c	a	Augmenter

À partir de ce tableau, on peut noter que la base des données d'apprentissage générée se compose de cinq vecteurs des variables d'entrée dont chaque variable décrit une unité temporelle par l'un des alphabets suivants : a, b, et c. De plus, ces données contiennent un vecteur de variable de sortie qui décrit l'évolution de paramètre dans les 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 : augmentation, diminution, fluctuation, augmentation puis diminution, diminution et augmentation.

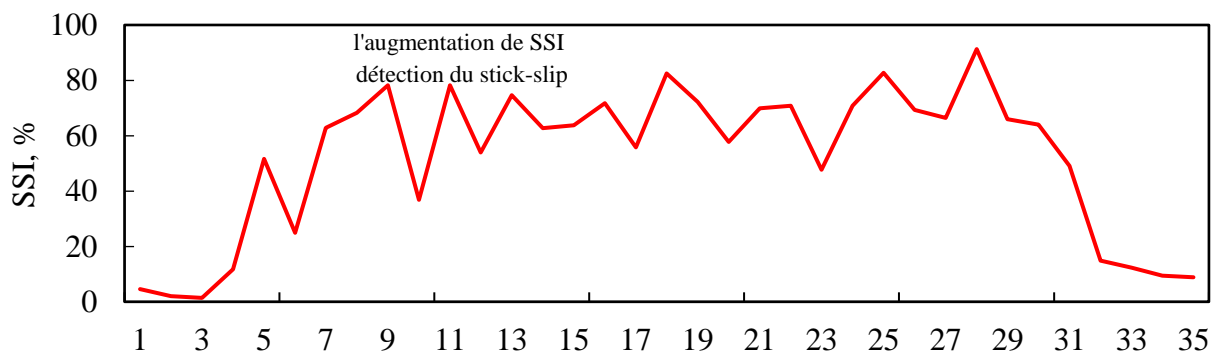
4.2. Application du SVM pour la classification des représentations SAX

Ensuite, la base des données décrit dans la section précédente a été utilisé pour l'apprentissage d'un modèle SVM qui reçoit la chaîne symbolique de chaque paramètre, et renvoie l'évolution appropriée. Le modèle SVM a été entraîné en utilisant le langage Python.

Après l'entraînement du classifieur SVM, on a testé si le SVM construit peut classer correctement toutes les combinaisons possibles que la méthode SAX peut produire. Les résultats de ce test ont montré le système développé dans cette section a présenté une grande capacité à identifier automatiquement l'évolution du WOB et RPM. Ce système intelligent peut reconnaître l'évolution de plusieurs paramètres dans un temps réduit qui ne dépasse pas une seconde et avec une grande précision, ce qui est impossible à réaliser par l'humain. Cela, confirme que ce système dépasse les capacités du personnel de forage en termes de temps de calcul.

5. Expériences numériques

Le système développé dans notre travail a été appliqué pour traiter un échantillon de données de forage (ces données sont décrites dans la section IV.1. **Figure IV-2** illustre un exemple d'un événement stick-slip identifié par notre système et l'évolution des deux paramètres de forage qui sont généralement surveillées pour détecter l'événement stick slip. Ici seulement le RPM, et le WOB de la surface sont présentes pour monter l'efficacité du système proposé dans notre travail.



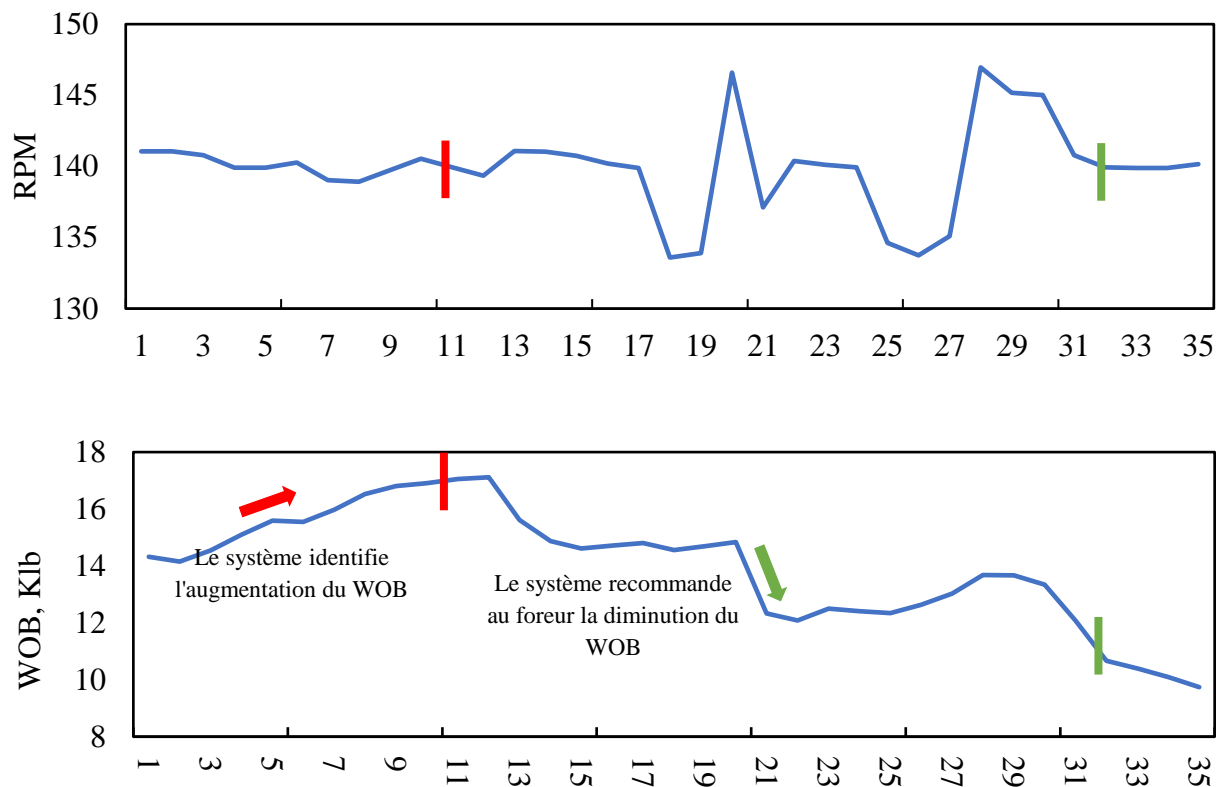


Figure IV-2 Exemple d'une détection et atténuation d'événement stick slip

La **Figure IV-2** indique un événement du stick slip déclenché par le système, le graphe tracé en rouge représente l'évolution de l'indice du stick slip en fonction du temps. Comme le montre ce graphe, le SSI a augmenté à une valeur supérieure à 80% ce qui est considéré comme un état sévère de stick slip. La durée de cet événement était d'environ 110 s, comme le montre la **Figure IV-2**, la ligne verticale rouge représente le début de l'événement de stick/slip et la ligne verticale verte représente la fin de l'événement.

Après la détection du stick-slip, le système a extrait un intervalle du WOB et du RPM situé avant la lignes verticale c'est à dire avant le système a extrait un intervalle du WOB et du RPM enregistré avant l'apparition du stick-slip pour déterminer la cause de cet évènement. En appliquant la procédure décrite dans la section IV.3 et IV.4, le système a pu identifier automatiquement l'évolution de chaque paramètre pour détecter la cause du stick-slip. Le RPM de surface a varié entre 138 et 141 tour/min, il n'y a pas eu de changement important de RPM. Par conséquent, il est peu probable que le RPM de surface soit le déclencheur de cet évènement. En vérifiant le poids sur l'outil, notre système a détecté une évolution du type 'augmentation' de WOB (flèche rouge) avant le début de l'évènement, ce qui signifie que l'augmentation du WOB est susceptible d'avoir induit l'évènement de stick-slip.

Sur la base des résultats de l'analyse du changement des paramètres de forage WOB et RPM qui ont le plus probablement la cause du déclenchement du l'évènement de stick/slip, le

système peut recommander au foreur et à l'équipe de forage l'action qui doit être exécutée pour atténuer l'événement de stick/slip. Comme on peut le voir sur la **Figure IV-2**, le système recommande la réduction du poids sur l'outil qui est la même action qui a été prise par le foreur. Pour renforcer cette recommandation, on peut voir que le stick/slip a été atténué (diminution du SSI) après que le WOB ait été réduit, comme le montre la flèche verte.

Conclusion

Les plates-formes pétrolières et gazières modernes sont équipées d'un grand nombre de capteurs. Ceux-ci collectent vraiment une énorme quantité de données. Mais repérer certains problèmes et anomalies est très difficile, voire impossible. Dans une étude du BCG, il a été démontré que l'IA peut aider à détecter les premiers signes de problèmes de forage pétrolier qui passent généralement inaperçus et à prévenir d'autres dommages. Ces informations supplémentaires vous permettent de réagir plus rapidement aux problèmes qui surviennent. De cette façon, il devient possible d'éviter les interruptions et les pannes.

Les résultats de ce travail montrent que les méthodes d'IA peuvent améliorer et automatiser le processus de forage pour forer plus efficacement. Comme l'intelligence artificielle assiste les activités de forage grâce à l'utilisation de systèmes intégrés comprenant des plates-formes, des interfaces et des programmes que les entreprises peuvent utiliser pour contrôler le processus de forage à distance. De plus, l'utilisation de l'intelligence artificielle peut fournir :

Réduisez le temps de creusement et le temps improductif.

Développer un système décisionnel automatisé.

Optimisez la trajectoire de l'outil lors des déviations de perçage.

Développement d'un système de contrôle des vibrations.

Surveillez les paramètres inférieurs en temps réel.

Réduire le phénomène de stick-slip, et c'est ce que nous avons fait dans notre travail que nous avons développé un système intelligent de détection et d'atténuation du phénomène de dérapage brutal à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique et basé sur des données de forage. Pour cela, des algorithmes tels que l'algorithme d'apprentissage automatique, les machines vectorielles (SVM) et la méthode d'approximation symbolique (SAX) ont été appliquées dans ce travail.

Après détection de la présence d'un glissement collant, une série temporelle de paramètres de forage est convertie en une série symbolique par la méthode SAX. Cette chaîne symbolique est traduite par le classifieur SVM pour reconnaître l'évolution des paramètres de forage. En fonction de l'évolution de chaque système identifié automatiquement par le système intelligent, ce dernier recommande au foreur d'ajuster les paramètres de forage pour atténuer le phénomène de stick-slip en augmentant la valeur RPM ou en diminuant la valeur WOB

Références

- [1] J.-P. Nguyen, *Le forage*, Editions OPHRYS, 1993.
- [2] A.T. Bourgoyne, K.K. Millheim, M.E. Chenevert, F.S. Young, *Applied drilling engineering*, Society of Petroleum Engineers Richardson, 1986.
- [3] P. Skalle, *Drilling fluid engineering*, Bookboon, 2011.
- [4] P.D. Spanos, A.M. Chevallier, N.P. Politis, M.L. Payne, Oil and gas well drilling: a vibrations perspective, *Shock Vib. Dig.* 35 (2003) 85–103.
- [5] U. Galvanetto, S.R. Bishop, L. Briseghella, Mechanical stick-slip vibrations, *Int. J. Bifurc. Chaos.* 5 (1995) 637–651.
- [6] Y. Shen, Z. Zhang, J. Zhao, W. Chen, M. Hamzah, R. Harmer, G. Downton, The origin and mechanism of severe stick-slip, in: *SPE Annu. Tech. Conf. Exhib.*, OnePetro, 2017.
- [7] Z. Huang, D. Xie, B. Xie, W. Zhang, F. Zhang, L. He, Investigation of PDC bit failure base on stick-slip vibration analysis of drilling string system plus drill bit, *J. Sound Vib.* 417 (2018) 97–109.
- [8] X. Zhu, L. Tang, Q. Yang, A literature review of approaches for stick-slip vibration suppression in oilwell drillstring, *Adv. Mech. Eng.* 6 (2014) 967952.
- [9] J. Lin, E. Keogh, L. Wei, S. Lonardi, Experiencing SAX: a novel symbolic representation of time series, *Data Min. Knowl. Discov.* 15 (2007) 107–144.
- [10] M.M. Muhammad Fuad, P.-F. Marteau, Enhancing the symbolic aggregate approximation method using updated lookup tables, in: *Int. Conf. Knowledge-Based Intell. Inf. Eng. Syst.*, Springer, 2010: pp. 420–431.
- [11] V.N. Vapnik, An overview of statistical learning theory, *IEEE Trans. Neural Networks.* 10 (1999) 988–999.
- [12] YOUCEFI Mohamed Riad, *Utilisation des réseaux de neurones dans l’optimisation des paramètres de forage des puits des hydrocarbures en temps réel*, UNIVERSITE M’HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2021.
- [13] D. Ertas, J.R. Bailey, L. Wang, P.E. Pastusek, Drillstring mechanics model for surveillance, root cause analysis, and mitigation of torsional vibrations, *SPE Drill. Complet.* 29 (2014) 405–417.
- [14] J.R. Bailey, E. Biediger, V. Gupta, D. Ertas, W.C. Elks, F.E. Dupriest, Drilling vibrations modeling and field validation, in: *IADC/SPE Drill. Conf.*, OnePetro, 2008.
- [15] Y. Arevalo, A. Fernandes, Quantification of drillstring-integrity-failure risk using real-time vibration measurements, *SPE Drill. Complet.* 27 (2012) 216–222.
- [16] J. Zhao, Y. Shen, W. Chen, Z. Zhang, S. Johnston, Machine learning–based trigger detection of drilling events based on drilling data, in: *SPE East. Reg. Meet.*, OnePetro, 2017.