



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département : Génie Minier, de la Métallurgie et des Matériaux

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGENIEUR D'ETAT

Spécialité : **GENIE MINIER**

Présenté par
MAADH GHANIMI
ABDERRAHMANE SAAD DERKAOU

TITRE DU MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
**Développement d'un outil de détection des déviations
de forages dans l'industrie extractive**

Encadré par
Dr. Hamza CHENITI
ENSTI

Membres du jury :

▪ Dr. Ali MESSAI	Président	ENSTI
▪ Dr. Amir BOUSTILA	Examineur	ENSTI
▪ Dr. Toufik BATOCHE	Examineur	ENSTI
▪ Dr. Yacine NECHMA	Examineur	ENSTI

École Nationale Supérieure
de Technologie et d'Ingénierie - Annaba



المدرسة الوطنية العليا
للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Nom et Prénom des candidats : DERKAOUI ABDERRAHMANE SAAD & MAADH GHANIMI

Département : Génie Minier, de la Métallurgie et des Matériaux

Filière : Génie Minier

Spécialité : Génie Minier

Diplôme préparé : Ingénieur

Promotion : 2024

Nom et Prénom de l'encadreur : CHENITI Hamza

Thème du projet de fin d'étude : Développement d'un outil de détection des forages dans l'industrie extractive

Appréciation de l'encadrant : Le travail développé par les candidats est très acceptable, particulièrement dans la partie software et simulation. Le logiciel développé est robuste, bien structuré et répond parfaitement aux exigences de l'industrie extractive. L'interface utilisateur est intuitive et les algorithmes de détection sont performants. Après le dépôt de brevet et l'accomplissement de la partie hardware de cet outil, une start-up pourra facilement être créée et trouvera un marché plein de clients en Algérie où l'industrie minière est en plein essor. En conséquence, je donne un avis favorable pour le déroulement de cette soutenance.

Annaba le 22-06-2024

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions notre Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force et la patience pour mener à bien ce projet.

A travers ce projet, nous profitons de l'occasion pour exprimer nos sincères remerciements à toute personne contribuant directement ou indirectement à l'élaboration de cet humble ouvrage.

Nous tenons à remercier Monsieur CHENITI Hamza qui nous a soutenu à chaque étape, et qui nous a encadré et aidé tout au long de notre projet.

Dédicaces

*C'est avec une profonde gratitude et des mots sincères que je dédie Ce travail
de fin d'études :*

À mon doux père, dont le soutien indéfectible m'a toujours inspiré.

*À ma chère mère, dont l'amour et la guidance ont forgé la personne
que je suis aujourd'hui.*

*À mes sœurs et mon frère ; Son encouragement inestimable a été la force
motrice derrière cette réalisation.*

*À mes très chères amies chacun par son nom ; dont la présence et le soutien ont été
des éléments précieux tout au long de ce parcours.*

À toute ma famille et mes proches ;

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Maadh Ghanimi

Je profite de cette occasion pour dédier ce modeste travail :

À celle qui m'est chère et qui m'a appris beaucoup. ... Ma mère ;

À celui qui m'a appris comment affronter la vie en souriant. ... Mon père ;

À Mes sœurs et mon frère ;

À toute ma famille et mes proches ;

À tous mes amis chacun par son nom ;

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Abderrahmane Saad Derkaoui

ملخص

تواجه الصناعة المنجمية اليوم تحديات حقيقية في رصد وتتبع انحرافات الآبار، مما يؤثر بشكل كبير على كفاءة استغلال الموارد الطبيعية ويؤدي إلى تكاليف إضافية بسبب التعديلات والإصلاحات الضرورية إن نجاح أي عملية حفر يعتمد على الدقة في رصد الانحرافات. نهدف في هذا العمل إلى تقديم نظام يتيح التعرف الآلي على انحراف البئر باستخدام الجيروسكوب الكهربائي والذكاء الاصطناعي، ويشكل حلاً مبتكراً لهذه التحديات حيث تتميز هذه التقنية بالقدرة على تحليل البيانات تلقائياً باستخدام الذكاء الاصطناعي، مما يتيح للعاملين في مجال الحفر الاستفادة من هذه التقنيات الحديثة لتحسين كفاءة الإنتاج وتقليل التكاليف الناتجة عن الإصلاحات والتغييرات.

الكلمات المفتاحية: الكشف، الحفر، الجيروسكوب، الصناعات الاستخراجية، البحث، المناجم، الإنتاج، الجزائر.

Résumé

L'industrie minière est aujourd'hui confrontée à de véritables défis en matière de surveillance et de suivi des déviations des puits, ce qui affecte considérablement l'efficacité de l'exploitation des ressources naturelles et entraîne des coûts supplémentaires dus aux ajustements et réparations nécessaires. Le succès de toute opération de forage dépend de la précision dans la détection des déviations. Dans ce travail, nous visons à présenter un système permettant de reconnaître automatiquement les déviations des puits en utilisant le gyroscope électrique et l'intelligence artificielle. Cette solution innovante répond à ces défis en offrant la capacité d'analyser les données automatiquement grâce à l'intelligence artificielle, permettant ainsi aux opérateurs de forage de tirer parti de ces technologies modernes pour améliorer l'efficacité de la production et réduire les coûts associés aux réparations et aux modifications.

Mots clés : détection, Forages, Gyroscope, Industries extractives, Recherche, Mines, Production, Algérie.

ABSTRACT

The mining industry is currently facing significant challenges in monitoring and tracking well deviations, which greatly affects the efficiency of natural resource exploitation and results in additional costs due to necessary adjustments and repairs. The success of any drilling operation depends on the accuracy in detecting deviations. In this work, we aim to present a system that enables the automatic recognition of well deviations using an electric gyroscope and artificial intelligence. This innovative solution addresses these challenges by providing the capability to analyze data automatically through artificial intelligence, thus allowing drilling operators to take advantage of these modern technologies to improve production efficiency and reduce costs associated with repairs and modifications.

Keywords: detection, Drilling, Gyroscope, Extractive industries, Research, Mines, Production, Algeria.

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Définition
MFE	Mine de Fer de l'Est
MWD	Measurement While Drilling (Mesure en cours de Forage)
LWD	Logging While Drilling (Diagraphie en cours de Forage)
STS	Système de Télémessure
RRL	Radio de Télémessure

LISTE DES FIGURES

Figure1.1. Situation géographique de la ville de l'Ouenza	10
Figure 1.2. La mine d'Ouenza.....	11
Figure 1.3. Déviation naturelle des forages causée par les strates du terrain	12
Figure 2.1. Forage au marteau fond de trou.....	14
Figure 2.2. Système de télémessure STS modèle 9100 et la radio de télémessure RRL modèle 9200	15
Figure 3.1. Fenêtres de Contrôle pour l'Envoi de Données au PC et au Téléphone avec Visualisation des Données Réelles sans Courbes	21
Figure 3.2. Représentation tridimensionnelle de la trajectoire du téléphone.....	22
Figure 3.3. Représentation surfacique de la trajectoire du téléphone dans l'espace.....	23
Figure 3.4. Graphiques des déviations en fonction du temps pour les axes X, Y et Z.....	23
Figure 4.1. Représentation du trajet et des directions du téléphone dans l'espace	24

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	9
CHAPITRE 01 : Présentation de la zone d'étude et problématique	10
1. Situation géographique	10
2. Société de la mine de l'Ouenza	10
3. Le gisement de l'Ouenza	10
4. Géologie du gisement	11
5. Réseau hydrographique de gisement	11
6. Exploitation du gisement.....	11
7. Problématique.....	12
CHAPITRE 02 : Etat de l'art antérieur	13
1. Causes des déviations de forage	13
2. Importance de la détection des écarts de forage	13
3. Rôle Crucial dans la Sécurité	13
4. Méthodes modernes pour déterminer l'écart pendant le forage.....	14
4.1. Systèmes de mesure du fond de trou (MWD)	14
4.2. Outils de navigation par gyroscope.....	14
4.3. Systèmes de télémétrie par outils de forage (LWD)	14
5. Forage dirigé.....	15
6. Modélisation et simulation de forage.....	15
CHAPITRE 03 : Description du modèle de détection proposé	16
1. L'idée du projet	16
2. Produit ou service proposé	16
3. L'innovation	16
4. Les différents composants du modèle	16
5. Fonctionnement du modèle	17
7. Déroulement de la simulation.....	17
7.1 Création d'un serveur pour recevoir des données	17
7.2 Lissage des données à l'aide d'une moyenne pondérée	17
7.3 Calcul du déplacement basé sur les données du gyroscope	18
7.4 Application des limites maximales et minimales :	18
7.5 Mise à jour des coordonnées :.....	18
7.6 Tracé des données en trois dimensions	19

7.7	Limites du tracé.....	19
7.8	Réinitialisation du tracé si nécessaire.....	19
7.9	Démarrage et arrêt des mises à jour :	19
7.10	Utilisation de l'accéléromètre pour mesurer les déviations	19
7.11	Conversion de l'accélération en vitesse	20
7.12	Conversion de la vitesse en déplacement (déviation)	20
8.	Comment envoyer et recevoir les données entre le smartphone et l'ordinateur ?	20
8.1	Collecte des données du smartphone	20
8.2	Envoi des données depuis le smartphone	20
8.3	Réception des données sur l'ordinateur	21
9.	Etapes de réalisation du test	22
9.1	Mouvement du smartphone	22
9.2	Transmission des données	22
9.3	Réception et visualisation des données	22
10.	Résultats du test	22
CHAPITRE 04 : Evaluation des performances du modèle proposé		25
1.	Discussion et analyse des résultats des testes.....	25
2.	Interprétation des résultats	25
3.	Faisabilité et Marché.....	26

INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de l'industrie extractive, qui joue un rôle crucial dans l'approvisionnement mondial en ressources naturelles essentielles comme les minéraux, les métaux et les hydrocarbures, la précision des opérations de forage est d'une importance capitale. Toutefois, ces opérations sont souvent entravées par des problèmes de déviation de trou de forage, qui peuvent avoir des conséquences considérables sur l'efficacité et la viabilité économique des projets. Ces déviations, généralement dues à des conditions géologiques imprévues, des erreurs opérationnelles ou des limites des équipements utilisés, peuvent entraîner des pertes économiques importantes et augmenter l'empreinte écologique des activités extractives.

Le développement d'un outil de détection de déviation de trou de forage vise à adresser ces défis en fournissant une solution technologique avancée. Ce système innovant emploierait des capteurs de haute technologie et des algorithmes sophistiqués pour surveiller la trajectoire du forage en temps réel et signaler immédiatement toute déviation par rapport à un plan prédéfini. L'outil permettrait ainsi des ajustements en temps réel, améliorant la précision du forage et réduisant les risques d'erreurs coûteuses.

En plus de ses avantages opérationnels, l'outil de détection de déviation offre des bénéfices environnementaux significatifs. En assurant que le forage reste sur la trajectoire prévue, il est possible de minimiser la perturbation des écosystèmes environnants et de réduire la quantité de déblais générés. Cela est particulièrement pertinent dans des régions sensibles où la conservation de l'environnement est une préoccupation majeure.

Economiquement, la capacité de forer avec plus de précision permet une meilleure évaluation des gisements, une planification plus efficace des exploitations et, par conséquent, une réduction des coûts de production.

La perspective d'avenir pour cette technologie est prometteuse, car elle s'aligne avec les tendances globales vers une automatisation accrue et une plus grande responsabilité environnementale dans l'industrie extractive. À mesure que les exigences réglementaires deviennent plus strictes et que les normes de durabilité se renforcent, l'outil de détection de déviation pourrait devenir un composant essentiel des opérations de forage modernes.

CHAPITRE 01 : Présentation de la zone d'étude et problématique

1. Situation géographique

La Daïra de l'Ouenza, située en Algérie, se trouve à 90 kilomètres au nord du chef-lieu de la Wilaya de Tébessa, et à 120 kilomètres au Sud-sud-est d'Annaba. Elle est délimitée à l'est par la frontière Algéro-tunisienne et au nord par la Wilaya de Souk-Ahras. [1] Cette région est reliée à Annaba par la route nationale N°82B, ainsi que par une voie ferrée spécifique qui sert au transport d'une partie de la production de son unité minière vers l'installation portuaire où elle serait expédiée vers le complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Figure 1.1).

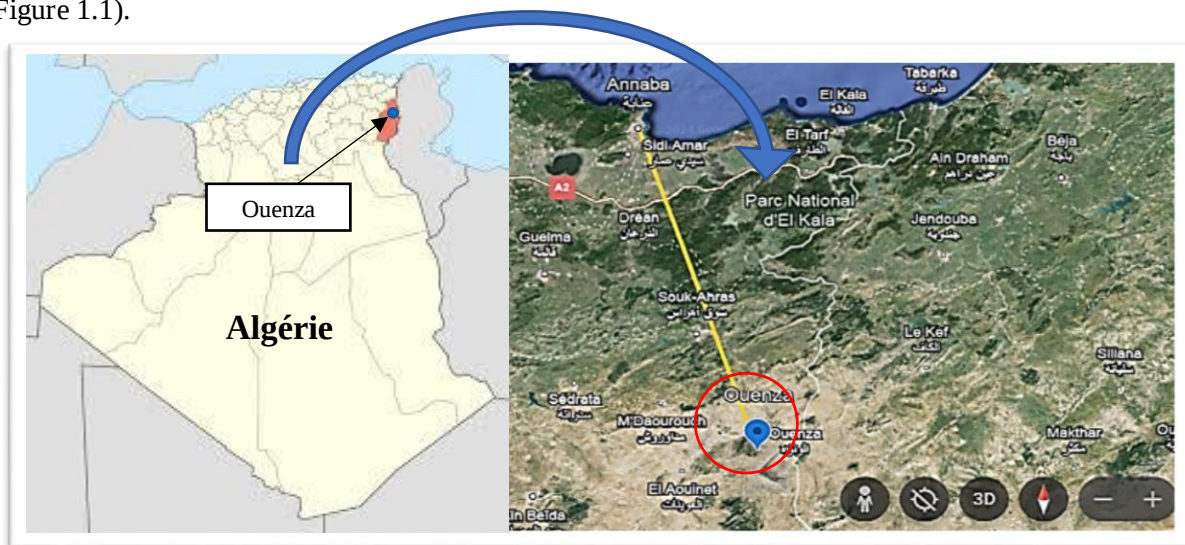


Figure1.1. Situation géographique de la ville de l'Ouenza (Google Earth 2024)

2. Société de la mine de l'Ouenza

Le complexe minier de l'Ouenza est une importante unité de production de minerai de fer. La société qui le gère se concentre principalement sur l'extraction et la commercialisation du minerai vers le complexe sidérurgique d'El Hadjar, situé dans la wilaya d'Annaba, et vers le nouveau complexe turc appelé « TUNCH » situé à quelques mètres de la mine d'Ouenza. La mine d'Ouenza est la plus grande du pays, avec une réserve estimée à 120 millions de tonnes de minerai ayant une teneur moyenne de 55%. Cette mine est gérée par l'entreprise MFE.

3. Le gisement de l'Ouenza

Le gisement ferrifère de l'Ouenza repose sur le flanc nord d'un massif montagneux qui culmine à 1288m au niveau du pic, il est d'environ 12km de longueur sur 5km de largeur. Les amas métallifères se présentent sous la forme de mamelons grossièrement elliptiques. Le minerai affleure sur des longueurs atteignant parfois 250 mètres et des hauteurs de 45 mètres, réalisant les conditions types pour l'exploitation à ciel ouvert (Figure 1.2). [2]



Figure 1.2. La mine d'Ouenza

4. Géologie du gisement

Le massif de l'Ouenza fait partie des confins Algéro-tunisiens qui sont géologiquement connus par leur caractère presque exclusivement sédimentaire. Les formations les plus anciennes exposées en surface sont les évaporites entremêlées (marnes bariolées à gypse, blocs de dolomies plus ou moins stratifiées, calcaires, cargneules, grès et rarement des ophites) du trias. [3]

La structure du massif de l'Ouenza correspond à un anticlinal dissymétrique de direction NE-SW avec une terminaison périclinale vers le SW. Son flanc sud-est se redresse près de la terminaison périclinale (Koudiate Tébaga) et devient chevauchant au sud-est (Koudiat el Kahkouh). L'ensemble de cette structure est affecté par des failles inverses et décrochantes de directions WSW-ENE et WNW-ESE. La présente structure du massif est due aux effets de la poussée diapirique du trias. [4]

Le minerai de fer est constitué principalement d'hématite et sa teneur moyenne en fer est de 50 à 60 %, elle contient en outre 2 % de manganèse, 0,005 % de phosphore, 0,03 % de soufre, 0,02 à 0,03 % de silice et accompagnée par d'autres oxydes et hydroxydes de fer.

Il occupe généralement la charnière de l'antiforme de l'Ouenza au niveau des calcaires à Miliolites. [1]

5. Réseau hydrographique de gisement

Le réseau hydrographique est représenté principalement par les cours d'Oued Mellègue au nord et Oued Kseub au sud-est, distants respectivement de 3.5 km et 6.5 km à vol d'oiseau de la mine.

Le comportement hydrogéologique des terrains existants à Ouenza ; se résume comme suit :

- Les terrains triasiques contenant du gypse et du sel et du fait de leur hétérogénéité sont perméables dans lesquels les eaux s'infiltrant et y circulent mais deviennent saumâtres et conviennent donc que pour l'emploi industriel ;
- Les calcaires s'ils sont fissurés, permettent l'infiltration des eaux et même leur circulation. [5]

6. Exploitation du gisement

L'exploitation du minerai de fer se fait à ciel ouvert suivant un chapelet de carrières implantées suivant l'alignement de l'arête antiforme appelée « axe du 6 mai » et représenté par les quartiers de Douamis, Hallatif, Conglomérats, saint barbe, ilot, changoura nord, changoura sud et le pic. [3]

Le mode d'exploitation appliqué sur le gisement de l'Ouenza, est par fonçage avec un seul bord exploitable, le contour de la mine n'étant pas fermé. L'exploitation de tels gisements, disposés sur un flanc de coteau de pente 35°, se fait de haut en bas. L'extraction du minerai est réalisée par gradin de 13 à 15 m

de hauteur, un angle du talus de 75 à 80° et une largeur des bermes de 7 à 12 m. L'exploitation du minerai et du stérile se fait par les tirs d'abattage par explosifs.

7. Problématique

Les déviations incontrôlées des forages (Figure 1.3) engendrent des problèmes de production, se traduisant notamment par une mauvaise fragmentation des roches.



Figure 1.3. Déviation naturelle des forages causée par les strates du terrain (à gauche :avec tige guide pour limiter les déviations ; à droite : sans tige guide) D'après Meyer,2002

CHAPITRE 02 : Etat de l'art antérieur

1. Causes des déviations de forage

Il y'en a plusieurs causes des déviations de forage, parmi ces causes il peut y avoir :

- **erreur de positionnement d** : Dans la pratique, par suite du mauvais réglage de la plate-forme (la Banquette) entraînant des difficultés de mise en place de la machine, ou des déplacements des repères, les erreurs de positionnement sont beaucoup plus importantes. Les erreurs de positionnement peuvent aller de plusieurs décimètres à 2 m, dans les cas extrêmes. [6]

- **erreur d'alignement da** : les erreurs d'alignement pouvaient se faire dans toutes les directions et qu'à 9m de profondeur elles pouvaient être de l'ordre de 40 centimètres. [6]

Pour une maille théorique de $1,7 \times 1,7 \text{ m}$ ($= 2,89 \text{ m}^2$), la maille réelle à 9 m de profondeur peut ainsi varier de $1,30$ à $5,10 \text{ m}^2$, soit dans un rapport de 1 à 4. [6]

- **déviations de trajectoire dt** : Les déviations de trajectoire sont parfois importantes, souvent impressionnantes, mais pour un massif donné elles sont généralement systématiques et toujours dans le même sens et n'ont donc pas d'incidence majeure sur le minage.

2. Importance de la détection des écarts de forage

La détection de la déviation des puits, également connue sous le nom de relevé directionnel, implique l'utilisation d'outils et de techniques sophistiqués pour mesurer l'angle de déviation par rapport à la verticale et la direction du trou de forage. [7] Cette information cruciale permet aux foreurs de diriger le puits avec précision, de naviguer dans des formations géologiques complexes et d'atteindre la cible souterraine prévue avec la plus grande exactitude.

L'importance de la détection de la déviation des puits va bien au-delà de la simple atteinte de la cible. [8] Elle joue un rôle crucial dans l'optimisation de la production du réservoir en permettant aux foreurs de placer le puits dans les zones les plus productives du réservoir. En évitant les formations non productives ou dangereuses, les exploitants peuvent minimiser le gaspillage de ressources, réduire les coûts de forage et améliorer la viabilité économique globale de leurs projets.

3. Rôle Crucial dans la Sécurité

La sécurité est au premier plan de l'industrie pétrolière et gazière, et la détection de la déviation des puits joue un rôle essentiel dans la protection du personnel, de l'environnement et des infrastructures précieuses. [9] Une déviation incontrôlée peut entraîner des événements catastrophiques tels que des éruptions incontrôlées, l'effondrement de puits ou des dommages aux formations environnantes. La surveillance continue de la trajectoire du puits permet d'identifier et de corriger rapidement tout problème de déviation, minimisant ainsi les risques et garantissant le bon déroulement des opérations de forage.

4. Méthodes modernes pour déterminer l'écart pendant le forage

L'industrie du forage a connu des progrès significatifs ces dernières années dans le domaine de la détermination de l'écart pendant le forage. Ces méthodes modernes permettent aux foreurs de mieux contrôler la trajectoire du puits, ce qui est essentiel pour atteindre la cible en toute sécurité et efficacement, en particulier dans les formations complexes ou difficiles.

Voici quelques-unes des méthodes modernes les plus courantes pour déterminer l'écart pendant le forage :

4.1. Systèmes de mesure du fond de trou (MWD)

Les systèmes MWD sont installés sur la tête de forage (Figure 2.1) et fournissent des mesures en temps réel de l'inclinaison, de l'azimut et de la direction du puits. [10] Ces données sont transmises à la surface par câble ou par onde électromagnétique et permettent aux foreurs de surveiller en permanence la trajectoire du puits et de faire les ajustements nécessaires.



Figure 2.1. Forage au marteau fond de trou [8]

4.2. Outils de navigation par gyroscope

Les outils de navigation par gyroscope utilisent des gyroscopes et des accéléromètres pour mesurer l'orientation et la vitesse de rotation du train de forage. Ces informations sont ensuite intégrées pour déterminer la position et l'inclinaison du puits. [7] Les outils de navigation par gyroscope sont particulièrement utiles dans les formations où les signaux électromagnétiques sont atténués ou inexistent.

4.3. Systèmes de télémétrie par outils de forage (LWD)

Les systèmes LWD utilisent des capteurs installés sur la tête de forage (Figure 2.2) pour mesurer une variété de paramètres, tels que la résistivité, la porosité et la densité de la formation. Ces données peuvent être utilisées pour construire un profil géologique du puits et aider les foreurs à identifier les zones de potentiel de production et à éviter les obstacles.



Figure 2.2. Système de télémesure STS modèle 9100 et la radio de télémesure RRL modèle 9200 [9]

5. Forage dirigé

Le forage dirigé est une technique qui utilise des systèmes MWD et des outils de navigation par gyroscope pour contrôler la trajectoire du puits avec une grande précision. [10] Cela permet aux foreurs de forer des puits déviés, horizontaux ou même à plusieurs branches, ce qui est particulièrement utile pour atteindre des cibles situées sous des zones inaccessibles ou dangereuses.

6. Modélisation et simulation de forage

Les logiciels de modélisation et de simulation de forage permettent de prédire la trajectoire du puits en tenant compte de divers facteurs, tels que la géologie de la formation, la conception du puits et les paramètres de forage. Ces outils peuvent être utilisés pour optimiser la trajectoire du puits et éviter les problèmes potentiels pendant le forage.

L'utilisation de ces méthodes modernes permet aux foreurs de déterminer l'écart avec une plus grande précision et de mieux contrôler la trajectoire du puits. Cela a permis d'améliorer la sécurité et l'efficacité du forage, en particulier dans les environnements de forage complexes ou difficiles.

En plus des méthodes mentionnées ci-dessus, il existe un certain nombre d'autres techniques de pointe en cours de développement pour la détermination de l'écart pendant le forage. Ces technologies prometteuses incluent l'utilisation de capteurs optiques et acoustiques, ainsi que le développement de systèmes de forage autonomes.

Ces progrès contribuent à garantir que le forage est effectué de manière sûre, efficace et respectueuse de l'environnement.

CHAPITRE 03 : Description du Système de détection proposé

1. L'idée du projet

Cette invention vise à fournir une solution complète pour améliorer les performances de l'industrie du forage en combinant des technologies de pointe telles qu'un gyroscope électrique, elle offre une méthode précise et efficace pour mesurer et analyser les déviations lors des opérations de forage.

Grâce à l'utilisation d'un contrôleur intelligent, cette solution permet une gestion proactive des déviations, ce qui se traduit par une amélioration notable des performances globales du forage.

2. Produit ou service proposé

Cette invention concerne un système automatisé avancé pour mesurer et cartographier les déviations de puits à l'aide de techniques de gyroscope électrique.

Le système vise à identifier les écarts indésirables, ce qui contribue à minimiser les erreurs commises dans la prospection des ressources, à accroître l'efficacité de l'extraction des ressources et à réduire les coûts associés aux ajustements ultérieurs.

3. L'innovation

Certains éléments de l'innovation ne seront pas dévoilés dans le cadre de ce travail, car ils feront l'objet d'un dépôt de brevet. Seule la partie logicielle du système sera présentée dans ce mémoire. L'innovation dans notre système réside dans sa convivialité, son interopérabilité, son indépendance énergétique et sa compatibilité avec différents types de foreuses.

4. Les différents composants du système

Le système sera composé des appareils suivants :

- **Gyroscope électrique** : Il utilise des techniques modernes pour mesurer les angles et les changements de direction du puits avec une grande précision. Grâce à sa capacité à mesurer la direction des puits avec une grande précision inférieure à 0,01 degré, le gyroscope permet de reconnaître les opérations de forage de manière plus précise et plus efficace.
- **Systèmes de capteurs multiples** : des systèmes de capteurs avancés permettent de surveiller les variables de forage et de fournir des données précises.
- **Contrôleur intelligent** : Il comprend un contrôleur intelligent capable d'analyser et d'analyser automatiquement les données sur la base des écarts observés.
- **Technologie de communication (ordinateur)** : Il utilise la technologie de communication pour transférer des données en temps réel entre le puits et le centre de contrôle.
- **Panneaux solaires** : pour alimenter les deux moteurs en générant de l'énergie électrique.

5. Fonctionnement du modèle

Tout d'abord, le gyroscope est descendu dans le trou à une vitesse constante à l'aide d'un moteur électrique. Le gyroscope détecte les orientations du forage, lesquelles sont ensuite traduites en coordonnées. Ces coordonnées sont ensuite transmises à un microcontrôleur programmé, qui les traite et les envoie à un ordinateur. Notre programme utilise ces données pour générer une représentation tridimensionnelle du trou.

6. Simulation du modèle et validation de principe

Pour des raisons de confidentialité et afin de ne pas divulguer des idées sans protection par un dépôt de brevet, nous avons décidé d'utiliser le gyroscope intégré dans les smartphones au lieu du gyroscope réel habituellement utilisé dans les expériences scientifiques. Ce choix a été fait après une étude approfondie des capacités des gyroscopes dans les smartphones modernes, où nous avons constaté qu'ils offrent une grande précision et peuvent fournir les données requises de manière fiable.

De plus, pour améliorer le transfert de données et tirer le meilleur parti de la technologie disponible, nous avons opté pour le Wi-Fi comme moyen de réception et de transmission des informations entre le gyroscope du téléphone et l'ordinateur, ce choix s'est avéré efficace pour fournir une connexion rapide et continue, ce qui nous a permis d'obtenir et d'analyser les données instantanément, sans avoir besoin de connexions complexes ou d'utiliser l'Arduino comme intermédiaire.

En utilisant cette stratégie, nous avons pu simplifier le processus de simulation et économiser du temps et des ressources, ce qui nous a permis de nous concentrer sur l'analyse des résultats et d'atteindre les objectifs du projet plus efficacement et rapidement.

7. Déroulement de la simulation

Nous avons utilisé le langage Python dans notre programme de simulation pour :

- Recevoir et traiter les données du gyroscope ;
- Calculer le déplacement en fonction de ces données.

Voici une explication des opérations et des équations utilisées avec son code Python correspondant :

7.1 Création d'un serveur pour recevoir des données :

L'objectif est de recevoir les données du gyroscope à partir d'un appareil externe via une connexion réseau (socket). Les données reçues contiennent les valeurs du gyroscope sur les axes x , y et z .

7.2 Lissage des données à l'aide d'une moyenne pondérée :

Les valeurs du gyroscope reçues sont stockées dans des vecteurs représentant une fenêtre de lissage de longueur N . La moyenne pour chaque axe est calculée à l'aide de l'équation :

$$\text{gyro_x_avg}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t \text{gyro_x}(i)$$

Code Python:

```
gyro_x_avg = np.mean(self.gyro_x_buffer)
```

$$\text{gyro_y_avg}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t \text{gyro_y}(i)$$

Code Python :

```
gyro_y_avg = np.mean(self.gyro_y_buffer)
```

$$\text{gyro_z_avg}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t \text{gyro_z}(i)$$

Code Python :

```
gyro_z_avg = np.mean(self.gyro_z_buffer)
```

7.3 Calcul du déplacement basé sur les données du gyroscope :

Les coordonnées (x, y, z) sont mises à jour en utilisant les moyennes calculées des valeurs du gyroscope et la durée Δt entre les mesures. Si les coordonnées au temps précédent $t - 1$ sont x_{t-1} , y_{t-1} , et z_{t-1} , les nouvelles coordonnées au temps t sont calculées comme suit :

$$x_t = x_{t-1} - \text{gyro_x_avg}(t) \times \Delta t$$

Code Python :

```
new_x = max(min(last_x - smoothed_gyro_x * 0.1, self.x_max), self.x_min)
```

$$y_t = y_{t-1} - \text{gyro_y_avg}(t) \times \Delta t$$

Code Python :

```
new_y = max(min(last_y - smoothed_gyro_y * 0.1, self.y_max), self.y_min)
```

$$z_t = z_{t-1} + \text{gyro_z_avg}(t) \times \Delta t$$

Code Python :

```
new_z = max(min(last_z + smoothed_gyro_z * 0.1, self.z_max), self.z_min)
```

7.4 Application des limites maximales et minimales :

Pour éviter que les valeurs ne dépassent la plage spécifiée, les limites maximales et minimales sont appliquées aux nouvelles coordonnées :

$$x_t = \max(\min(x_t, x_{\max}), x_{\min})$$

Code Python :

```
new_x = max(min(new_x, self.x_max), self.x_min)
```

$$y_t = \max(\min(y_t, y_{\max}), y_{\min})$$

Code Python :

```
new_y = max(min(new_y, self.y_max), self.y_min)
```

$$z_t = \max(\min(z_t, z_{\max}), z_{\min})$$

Code Python :

```
new_z = max(min(new_z, self.z_max), self.z_min)
```

7.5 Mise à jour des coordonnées :

En se basant sur les nouvelles valeurs calculées, les coordonnées sont mises à jour :

$$x = x_t$$

$$y = y_t$$

$$z = z_t$$

Code Python :

```
self.coordinates.append((new_x, new_y, new_z))
```

7.6 Tracé des données en trois dimensions :

Lors du tracé des données en trois dimensions, les coordonnées mises à jour sont utilisées. Supposons que nous avons n points calculés jusqu'à présent, les vecteurs xs , ys , et zs contiennent toutes les coordonnées :

$$xs = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

Code Python :

```
xs, ys, zs = zip(*self.coordinates)
```

$$ys = [y_1, y_2, \dots, y_n]$$

Code Python :

```
ys, zs = zip(*self.coordinates)
```

$$zs = [z_1, z_2, \dots, z_n]$$

Code Python :

```
ys, zs = zip(*self.coordinates)
```

7.7 Limites du tracé :

Pour éviter que les valeurs ne dépassent la plage spécifiée, le tracé est ajusté pour rester dans ces limites :

$$\begin{aligned} x_{\min} &\leq x \leq x_{\max} \\ y_{\min} &\leq y \leq y_{\max} \\ z_{\min} &\leq z \leq z_{\max} \end{aligned}$$

7.8 Réinitialisation du tracé si nécessaire :

En appuyant sur le bouton "Clear", les coordonnées sont réinitialisées au point initial (0,0,0).

Code Python :

```
self.coordinates = [(0, 0, 0)]
```

7.9 Démarrage et arrêt des mises à jour :

En appuyant sur le bouton "Start", le processus de réception des données et de mise à jour des coordonnées commence chaque période de temps spécifiée (par exemple, 100 millisecondes). En appuyant sur le bouton "Stop", le processus s'arrête.

Code Python :

```
self.timer.start(100) # Démarrer la mise à jour toutes les 100 ms
self.timer.stop() # Arrêter la mise à jour
```

7.10 Utilisation de l'accéléromètre pour mesurer les déviations :

Nous utilisons l'accéléromètre du téléphone pour mesurer les accélérations dans les axes X , Y et Z .

Pour obtenir des mesures précises de l'accélération linéaire, nous devons d'abord enlever l'effet de la gravité. Nous appliquons un filtre passe-bas simple pour isoler la composante de la gravité et la soustraire des données brutes de l'accéléromètre. Ensuite, nous intégrons ces valeurs d'accélération linéaire

pour calculer la vitesse, et enfin, nous intégrons la vitesse pour déterminer le déplacement ou la déviation dans les axes X et Y . Ce processus nous permet de suivre les mouvements du téléphone de manière précise et de calculer les déviations en mètres.

7.11 Conversion de l'accélération en vitesse :

Nous commençons avec l'accélération que nous obtenons des capteurs (ajustée pour la gravité), et nous calculons le changement de vitesse à l'aide de l'équation :

$$v(t) = v(t - 1) + a(t) \cdot \Delta t$$

Où :

- $v(t)$ est la vitesse au temps t .
- $v(t - 1)$ est la vitesse au temps précédent $t - 1$.
- $a(t)$ est l'accélération au temps t .
- Δt est l'intervalle de temps entre le temps t et le temps $t - 1$.

7.12 Conversion de la vitesse en déplacement (déviation) :

Une fois que nous avons la vitesse, nous calculons le changement de déplacement à l'aide de l'équation :

$$d(t) = d(t - 1) + v(t) \cdot \Delta t$$

Où :

- $d(t)$ est le déplacement au temps t .
- $d(t - 1)$ est le déplacement au temps précédent $t - 1$.
- $v(t)$ est la vitesse au temps t .
- Δt est l'intervalle de temps entre le temps t et le temps $t - 1$.

8. Comment envoyer et recevoir les données entre le smartphone et l'ordinateur ?

8.1 Collecte des données du smartphone :

a. Activation des capteurs :

L'application sur le smartphone commence par activer les capteurs de gyroscope et d'accéléromètre en utilisant la bibliothèque 'plyer'. Cela se fait par les commandes 'gyroscope.enable()' et 'accelerometer.enable()'.

b. Collecte des données sensorielles :

Les données du gyroscope (orientation angulaire) et de l'accéléromètre (accélération linéaire) sont collectées périodiquement en utilisant la bibliothèque Clock qui appelle la fonction de mise à jour toutes les 0,1 seconde.

c. Traitement des données :

Pour garantir la précision des données, nous utilisons un filtre passe-bas pour isoler la force de gravité des données de l'accéléromètre. L'équation $\text{gravity_data} = \alpha * \text{gravity_data} + (1 - \alpha) * \text{acceleration_data}$ est appliquée pour isoler la gravité, puis l'accélération linéaire est calculée en soustrayant l'effet de la gravité des valeurs d'accélération d'origine.

8.2 Envoi des données depuis le smartphone :

a. Préparation des données :

Après avoir collecté et traité les données, nous préparons les données pour les envoyer sous forme de JSON. Les données envoyées comprennent les valeurs des trois axes du gyroscope (X, Y, Z) et les valeurs des trois axes de l'accélération linéaire (X, Y, Z).

b. Configuration de la connexion :

Une connexion TCP est établie avec l'ordinateur en utilisant la bibliothèque `socket`. L'adresse IP de l'hôte (ordinateur) et le numéro de port sont spécifiés. Dans cet exemple, l'adresse IP est '192.168.1.102' et le port est '5000'.

La connexion est créée en utilisant ``self.client_socket.connect((self.host, self.port))`

c. Envoi des données :

Les données sont envoyées via la connexion réseau en utilisant la fonction 'send', où les données JSON encodées sont envoyées avec un séparateur de ligne "\n" pour chaque ensemble de données afin de garantir leur réception correcte sur l'ordinateur.

8.3 Réception des données sur l'ordinateur :**a. Création de la connexion réseau :**

Un serveur TCP est configuré sur l'ordinateur en utilisant la bibliothèque `socket`. Cela se fait en créant une socket et en la liant à l'adresse IP 0.0.0.0 (qui permet d'écouter sur toutes les interfaces) et au port 5000. Ensuite, le serveur écoute les connexions entrantes en utilisant `'server_socket.listen(1)`.

b. Réception des données :

Lorsque le smartphone se connecte au serveur, ce dernier accepte la connexion en utilisant `client_socket, addr = server_socket.accept()`. Ensuite, l'ordinateur commence à recevoir les données en utilisant `client_socket.recv(1024).decode('utf-8')`.

Les données reçues sont stockées dans un tampon et séparées lorsque le séparateur de ligne "\n" est trouvé pour garantir la réception complète des messages JSON.

c. Traitement des données :

Après avoir décodé les données reçues de JSON en valeurs originales, l'interface utilisateur est mise à jour avec les nouvelles données et affichée en temps réel en utilisant des bibliothèques telles que Mayavi pour l'affichage 3D et Matplotlib pour tracer des courbes de données temporelles (Figure 3.1).

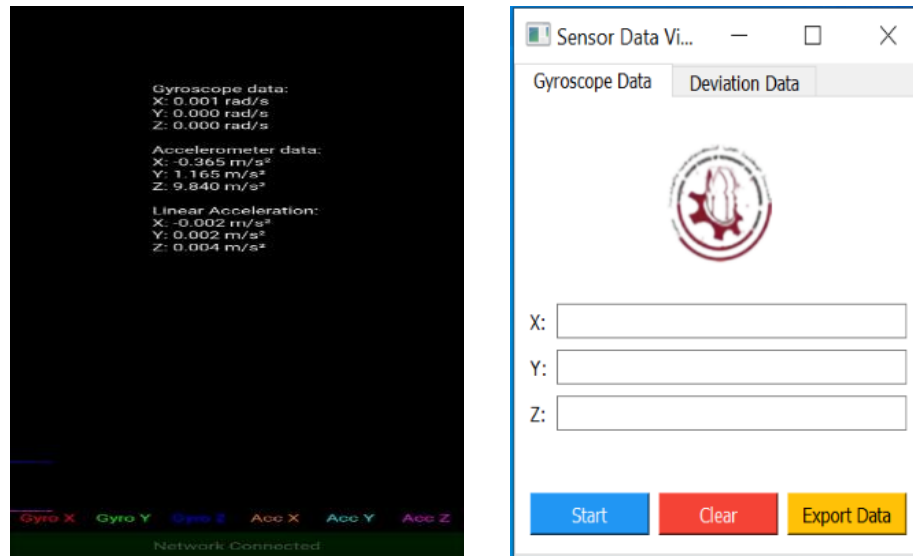


Figure 3.1. Fenêtres de Contrôle pour l'Envoi de Données au PC et au Téléphone avec Visualisation des Données Réelles sans Courbes

9. Etapes de réalisation du test

9.1 Mouvement du smartphone :

Le smartphone est déplacé dans différentes directions pour générer des données variées. Les mouvements incluent des rotations, des inclinaisons et des accélérations dans plusieurs axes.

9.2 Transmission des données :

Les données collectées par le smartphone sont envoyées en temps réel à l'ordinateur via la connexion TCP.

9.3 Réception et visualisation des données :

L'ordinateur reçoit les données, les traite et les affiche en temps réel, permettant de visualiser les mouvements du smartphone de manière précise et instantanée.

Ce test permet de valider la capacité du système à collecter, transmettre et analyser les données de mouvement en temps réel, offrant ainsi une solution efficace pour détecter les déviations des puits.

10. Résultats du test

Le résultat est que Si le téléphone se déplace vers la gauche, le tracé se déplace également vers la gauche. De même, si le téléphone se déplace vers la droite, le haut ou le bas, le tracé se déplace respectivement dans la même direction. Cela signifie que les mouvements du téléphone sont directement reflétés dans le tracé en temps réel, permettant une visualisation précise et intuitive des déplacements du téléphone dans l'espace. Cette simulation permet de modéliser avec précision les mouvements du gyroscope à l'intérieur des puits pour mesurer ses inclinaisons. En analysant ces mouvements, on peut déterminer les angles d'inclinaison du gyroscope par rapport aux axes x, y et z, offrant ainsi une compréhension détaillée de son comportement et de sa stabilité en conditions variées.

Les résultats de la détection apparaissent sous forme tridimensionnelle par la méthode de la Triangulation de Delaunay dans les sorties de notre programme (Figure 3.2).

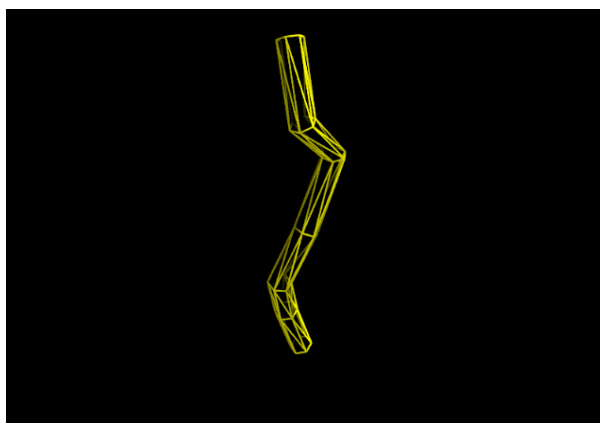


Figure 3.2. Représentation tridimensionnelle de la trajectoire du téléphone

Et puis ; par une simple interpolation des points on peut générer une surface continue génération (Figure 3.3).

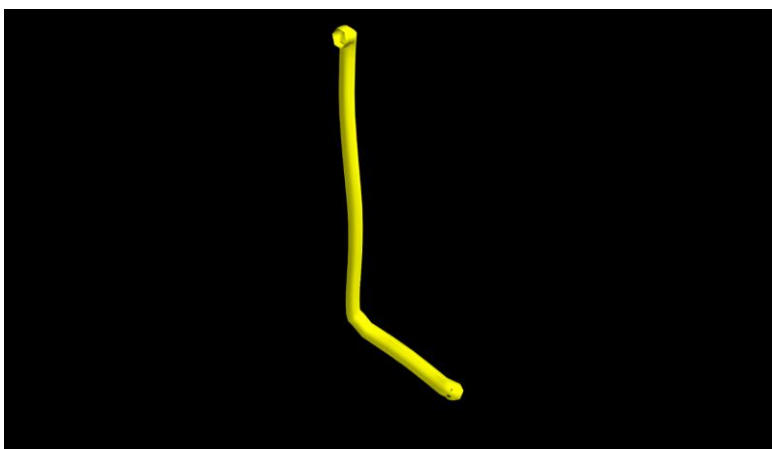


Figure 3.3. Représentation surfacique de la trajectoire du téléphone dans l'espace

Après l'arrêt du programme, ce graphique apparaît (Figure 3.4), représentant les données collectées par le gyroscope le long des axes X, Y et Z, ainsi que leurs déviations correspondantes au fil du temps. Les trois graphiques à gauche montrent les valeurs du gyroscope pour chaque axe : Gyro X, Gyro Y et Gyro Z en fonction du temps en secondes. Les trois graphiques à droite montrent les déviations pour les mêmes axes : Déviation X, Déviation Y et Déviation Z.

Les valeurs du gyroscope indiquent les mouvements de l'appareil dans l'espace, tandis que les déviations montrent les écarts par rapport à une position de référence ou à une trajectoire moyenne. Ces représentations graphiques permettent une analyse détaillée des mouvements et des variations pour chaque axe, facilitant ainsi l'interprétation des données du gyroscope.

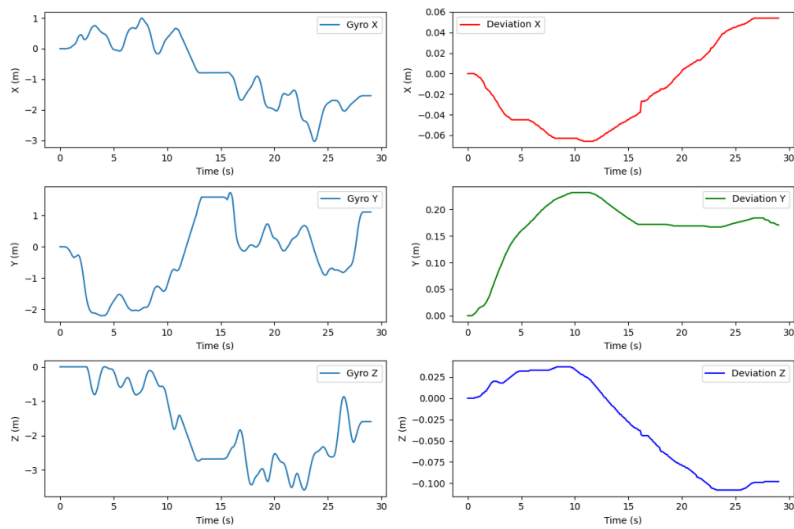


Figure 3.4. Graphiques des données gyroscopiques et déviations pour les axes X, Y et Z

CHAPITRE 04 : Evaluation des performances du modèle proposé

1. Discussion et analyse des résultats des testes

Lors de la réalisation du test, on a observé que la détection du mouvement et de la direction du téléphone à l'aide du gyroscope a offert de bonnes performances. Le gyroscope a permis une mesure précise des rotations et des orientations du téléphone, ce qui a facilité le suivi des mouvements angulaires, et on a obtenu une représentation de trajet qui reflète bien le mouvement du Téléphone (Figure 4.1).

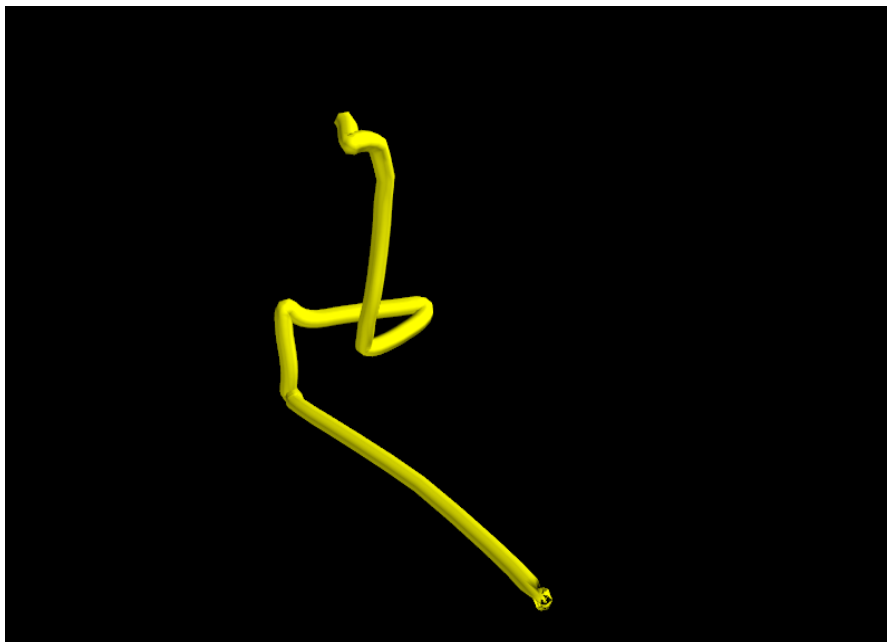


Figure 4.1. Représentation du trajet et des directions du téléphone dans l'espace

En revanche, l'évaluation de la distance parcourue en utilisant l'accéléromètre a montré des performances quelque peu limitées. Cela est principalement dû à la qualité de l'accéléromètre intégré dans le téléphone, qui peut être sujette à des erreurs et des bruits. De plus, l'absence d'un mouvement à vitesse constante a contribué à l'accumulation d'erreurs lors de l'intégration des valeurs d'accélération pour obtenir la vitesse et, par conséquent, le déplacement. Ces facteurs ont rendu le calcul de la distance parcourue moins fiable par rapport à la détection de l'orientation avec le gyroscope.

2. Interprétation des résultats

En se basant sur les résultats obtenus lors des tests, nous pouvons tirer plusieurs conclusions importantes concernant l'efficacité du modèle proposé pour la détection des mouvements et des orientations à l'aide des capteurs intégrés dans le smartphone.

a. Précision du gyroscope

Le gyroscope a démontré une grande précision dans la mesure des rotations et des orientations du téléphone. Cela s'explique par la capacité du gyroscope à fournir des données angulaires détaillées, ce qui permet un suivi précis des mouvements de rotation. La faible sensibilité aux bruits externes a également contribué à la fiabilité des données recueillies par le gyroscope. Cette performance indique que le gyroscope est bien adapté pour les applications nécessitant un suivi précis de l'orientation, comme la détection des déviations des puits.

b. Limites de l'accéléromètre

En revanche, l'utilisation de l'accéléromètre pour évaluer la distance parcourue a révélé certaines limitations. L'accéléromètre, bien qu'efficace pour détecter les changements de vitesse et les mouvements linéaires, est susceptible à des erreurs de mesure et des bruits. Ces inexactitudes sont exacerbées par l'absence de mouvements à vitesse constante, ce qui entraîne une accumulation d'erreurs lors de l'intégration des valeurs d'accélération pour obtenir la vitesse et le déplacement. Ainsi, le calcul de la distance parcourue à partir des données de l'accéléromètre s'est avéré moins fiable.

c. Implications pour la détection des déviations des puits:

Les résultats suggèrent que pour des applications telles que la détection des déviations des puits, l'utilisation du gyroscope pour le suivi de l'orientation est très prometteuse. Cependant, pour une évaluation précise de la distance ou de la position, il serait judicieux de combiner les données de l'accéléromètre avec d'autres sources de données ou d'utiliser des techniques de filtrage avancées pour réduire les erreurs accumulées.

En conclusion, bien que le modèle proposé présente des forces notables dans la détection des orientations à l'aide du gyroscope, des améliorations sont nécessaires pour améliorer la précision de la mesure de la distance parcourue avec l'accéléromètre. Ces ajustements permettront d'optimiser le système pour une utilisation efficace dans des applications critiques telles que la surveillance et la correction des déviations des puits.

3. Faisabilité et Marché

La faisabilité de cette innovation repose sur plusieurs facteurs clés. Tout d'abord, les technologies utilisées, telles que le gyroscope électrique et le contrôleur intelligent, sont bien établies et disponibles sur le marché, ce qui facilite leur intégration dans notre système. De plus, les avancées récentes dans le domaine de la mesure et de l'analyse des données permettent une précision accrue et une meilleure gestion des déviations lors des opérations de forage.

En ce qui concerne le marché, l'industrie du forage est en constante évolution, et cherche continuellement des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité et la rentabilité des opérations. Notre produit répond à ce besoin en offrant une solution complète et adaptée, capable de s'adapter à divers types de foreuses et de répondre aux exigences spécifiques des entreprises du secteur.

4. Business Model canvas (BMC)

Key Partners 	Key Activities 	Value Propositions 	Customer Relationships 	Customer Segments 
-Fournisseurs des composants électroniques ; -Partenaires industriels pour la production et la distribution ; -Institutions académiques pour la recherche (ENSTI).	-Assemblage des composants électriques ; -Conception et fabrication mécanique ; -Recherche et développement ; -Support technique ; -Maintenance et formation.	-Outil de détection précis des déviations de forage ; -Amélioration de la sécurité des opérations ; -Réduction des coûts ; -Augmentation de la productivité.	-Support technique dédié ; -Formation à l'utilisation de l'outil ; -Service après-vente.	-Industrie minière ; -Entreprises de forage ; -Compagnies pétrolières et gazières ; -Entreprises de construction.
	Key Resources  Technologie de gyroscope électrique, intelligence artificielle, capteurs multiples, panneaux solaires, moteurs électriques pas à pas		Channels  -Vente directe ; -Partenariats avec des entreprises de forage et de construction ; -Expositions et foires industrielles.	
Cost Structure  -Développement technologique ; -Production ; -Marketing et distribution ; -Support technique.		Revenue Streams  -Vente de l'outil de détection ; -Contrats de maintenance et de service ; -Licences de technologie.		

Conclusion Générale

En conclusion, notre projet de reconnaissance automatisée de la déviation des puits de forage représente une avancée technologique significative pour l'industrie extractive. Cette innovation permet de surmonter les défis liés aux déviations incontrôlées des forages, en offrant une solution précise et efficace pour la gestion des trajectoires de forage.

Les tests réalisés par simulation ont démontré la précision de notre modèle dans la mesure des déviations et des orientations, ce qui en fait un outil idéal pour le suivi des déviations des puits. Cependant, des améliorations sont nécessaires pour optimiser la mesure de la distance parcourue à l'aide de l'accéléromètre, afin de garantir une précision accrue dans les applications critiques telles que la surveillance et la correction des déviations des puits.

L'intégration de cette technologie dans l'industrie du forage pourrait transformer les pratiques actuelles, en réduisant les coûts associés aux erreurs de forage et en optimisant l'utilisation des ressources. De plus, elle offre des avantages environnementaux significatifs en minimisant l'impact des opérations de forage sur les écosystèmes environnants.

La faisabilité de cette innovation est renforcée par la disponibilité des technologies utilisées et par les avancées récentes dans le domaine de la mesure et de l'analyse des données. Le marché de l'industrie du forage, en constante évolution, est en quête de solutions innovantes pour améliorer l'efficacité et la rentabilité des opérations. Notre produit répond à ce besoin en offrant une solution complète, adaptable à divers types de foreuses et capable de répondre aux exigences spécifiques des entreprises du secteur.

En somme, cette technologie s'aligne avec les tendances globales vers une automatisation accrue et une plus grande responsabilité environnementale, promettant ainsi un avenir prometteur pour l'industrie extractive.

Bibliographies

- [1] Benboulkhras.M.I, 2020 « Prise en compte des discontinuités dans l'évaluation de la de la stabilité des gradins d'une carrière à ciel ouvert : cas de la mine de fer de l'Est de l'Ouenza, 151p »
- [2] Chain R., 2006 « Influence des travaux de forage et de tir sur la stabilité des talus et des gradins des mines à ciel ouvert (cas : mine de fer de l'Ouenza), option ; exploitation des mines. Thèse doctorat d'état. Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 145p »
- [3] Narsis.S, 2012 " Contribution à l'étude d'impact de l'exploitation du gisement ferrifère de la mine de l'Ouenza sur l'environnement (Algérie), 68p".
- [4] Bouzenoune.A, 1993 « Minéralisations péri diapiriques de l'Aptien calcaire : les carbonates de fer du gisement hématique de l'Ouenza, (Algérie orientale). Thèse de doctorat, université de Paris IV, France, 208p »
- [5] Dubourdieu.B, 1956 « Etude géologique de la région de l'Ouenza (Confins Algériens tunisiens). Thèses des sciences, Paris. Publications du service de la carte géologique de l'Algérie, Bulletin n°10. VOL 1, 659p »
- [6] Héraud.H, 1994 « étude des déviations de foration incidence sur le minage »
- [7] Forage directionnel n.d. https://hmn.wiki/fr/Directional_drilling (accessed April 29, 2024).
- [8] Nehari.S, 2021 « Gestion des déviations qualité en production pharmaceutique, un enjeu pour l'amélioration continue (Algérie) 100p »
- [9] STS. La télémétrie d'impulsion via la boue : transmissions de données MWD avec des capteurs de pression. STS France, 2020. <https://www.stssensors.com/fr/blog/2020/07/01/mud-pulse-telemetry-mwd-data-transmission-with-pressure-sensors/> (accessed April 29, 2024).
- [10] Les systèmes de télémesure STS modèle 9100 et la radio de télémesure RRL modèle 9200 n.d.<https://www.solinst.com/francais/produits/brochure-generale/25> (accessed May 1, 2024).