

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie minier

Thème

**Optimisation des fluides de forage grâce à un
système virtuel d'intelligence artificielle : Une
approche innovante**

Présenté le 15/10/2023 par :

Aymen HAMIDI

M'hamed MEDJHOUD

Composition du jury:

Présidente	M. S.YAHYAOUI	Pr	ENP
Promoteur	M. R.AKKAL	Pr	ENP
Co-Promoteur	M. M. KHODJA	Dr	IAP
Partenaire socio-économique	M. F.DRIFI	PDG	ENOF
Partenaire socio-économique	M. H.HADOUCHE	DG	DFSP
Représentant de l'incubateur	M. Z.BELOUADAH	MCA	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie minier

Thème

**Optimisation des fluides de forage grâce à un
système virtuel d'intelligence artificielle : Une
approche innovante**

Présenté le 15/10/2023 par :

Aymen HAMIDI

M'hamed MEDJHOUD

Composition du jury:

Présidente	M. S.YAHYAOUI	Pr	ENP
Promoteur	M. R.AKKAL	Pr	ENP
Co-Promoteur	M. M. KHODJA	Dr	IAP
Partenaire socio-économique	M. F.DRIFI	PDG	ENOF
Partenaire socio-économique	M. H.HADOUCHE	DG	DFSP
Représentant de l'incubateur	M. Z.BELOUADAH	MCA	ENP

ملخص :

خلال هذا العمل، تم تنفيذ عملية تحسين لسوائل الحفر بناء على الخوارزميات المستخدمة في الذكاء الاصطناعي بشكل منهجي. يهدف هذا النهج إلى ضبط خصائص السائل بدقة، بما في ذلك كثافته ولزوجته وتركيبه الكيميائي، من أجل التصدي للتحديات الخاصة التي يواجهها الحفر. كان تحسين سوائل الحفر من خلال استغلال خوارزميات الذكاء الاصطناعي محركاً لإنشاء شركتنا الناشئة، التي حصلت على وسم مشروع مبتكر مرموق من وزارة اقتصاد المعرفة والشركات الناشئة. يعتبر هذا الإنجاز ذو أهمية كبيرة، مما يوضح نجاعة وملائمة نهجنا الابتكاري بالإضافة إلى ذلك، أسفر عملنا عن تسجيل براءتي اختراع بارزتين. يتم منح البراءة الأولى لتطوير مخفض لترشيح السوائل ثوري، مما يفتح أفقاً جديدة في تكوين سوائل الحفر. وتعد البراءة الثانية إسهاماً بتطبيقات الذكاء الاصطناعي التي تم تطويرها في إطار شركتنا الناشئة، مما يؤكد موقعنا في مجال التكنولوجيا والابتكار. توضح هذه الإنجازات الأثر الكبير لعملنا في قطاع سوائل الحفر وتشهد على التزامنا بالبحث عن حلول متقدمة

كلمات مفتاحية :

شركة ناشئة، الذكاء الاصطناعي، التحسين، موائع الحفر

Summary :

Throughout this work, a process for optimizing drilling fluids using artificial intelligence (AI) algorithms has been systematically implemented. This approach aims to precisely adjust the fluid's characteristics, including density, viscosity, and chemical composition, to address specific challenges encountered during drilling. Optimizing drilling fluids through the utilization of artificial intelligence algorithms has been the driving force behind the creation of our startup, which was awarded a prestigious label by the Ministry of Innovative Enterprises. This achievement holds great significance, underscoring the boldness and relevance of our innovative approach. Furthermore, our work has resulted in the acquisition of two notable patents. The first patent is

granted for the development of a revolutionary filtrate reducer, opening new horizons in drilling fluid formulation. The second patent acknowledges the AI application developed within the framework of our startup, further solidifying our position in the technology and innovation domain. These accomplishments highlight the significant impact of our work in the drilling fluid sector and demonstrate our commitment to advanced solutions

Keywords :

Startup, Artificial Intelligence (AI), Optimization, Drilling Fluids.

Résumé :

Durant ce travail un processus d'optimisation des fluides de forage basé sur les algorithmes utilisés par l'intelligence artificielle (IA) est systématiquement mis en place. Cette démarche vise à ajuster de manière précise les caractéristiques du fluide, notamment sa densité, sa viscosité ainsi que sa composition chimique, afin de relever les défis spécifiques rencontrés pendant le forage. L'optimisation des fluides de forage à travers l'exploitation d'algorithmes d'intelligence artificielle a été le moteur de la création de notre startup, qui s'est vu décerner un prestigieux label par le ministère des entreprises innovantes. Cet accomplissement revêt une grande importance, illustrant l'audace et la pertinence de notre approche novatrice.

De plus, notre travail a abouti à l'acquisition de deux brevets notables. Le premier brevet est attribué pour la mise au point d'un réducteur de filtrat révolutionnaire, ouvrant de nouvelles perspectives en matière de formulation de fluides de forage. Le second brevet est une reconnaissance de l'application IA développée dans le cadre de notre startup, consolidant ainsi notre position dans le domaine de la technologie et de l'innovation. Ces accomplissements illustrent l'impact significatif de notre travail sur le secteur des fluides de forage et témoignent de notre engagement envers la recherche de solutions avancées. .

Mots clés :

Startup, Intelligence artificielle (IA), Optimisation, Fluides de forages

Remerciements :

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes chers parents pour leur soutien inconditionnel, leur encouragement constant et leurs sacrifices tout au long de mon parcours académique.

Mes remerciements vont également à mon encadrant, M. AKKAL, pour ses précieux conseils, son encadrement rigoureux et sa disponibilité sans faille tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'études.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance envers le co-promoteur, M. KHODJA, pour sa contribution précieuse, son expertise et son suivi attentif qui ont grandement enrichi ce travail.

Mes remerciements s'étendent également à Monsieur S.YAHYAOUI le chef de département du Génie Minier ainsi qu'à tous les enseignants du département pour leur dévouement, leur soutien pédagogique et leurs précieux conseils tout au long de mon parcours universitaire.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les responsables de l'incubateur pour leur appui et leurs conseils précieux dans le cadre de ce projet de fin d'études axé sur la création de notre startup.

Un remerciement particulier est adressé à Monsieur F.DRIFI le PDG du groupe ENOF pour son soutien continu et son engagement en faveur de la création de notre startup. Mes remerciements vont également à Monsieur H.HADOUCHE le Directeur Général de DFSP pour son précieux soutien et ses conseils avisés.

Enfin, j'exprime ma profonde reconnaissance aux ingénieurs du laboratoire de l'entreprise DRILLING FLUIDS SERVICES AUX PUITES « DFSP » et à mes amis, chacun nommément, pour leur soutien indéfectible, leur camaraderie et leur encouragement tout au long de cette expérience. Je suis également reconnaissant envers ma famille pour son soutien inconditionnel et son amour qui ont été les piliers de ma réussite.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, votre soutien a été inestimable.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	12
1 Généralités sur les fluides de forage :	15
1.1 Introduction générale sur les fluides de forage	15
1.1.1 Définition d'un fluide de forage :	16
1.1.2 Rôles des fluides de forage :	17
1.1.3 Les types de fluide de forage :	18
1.1.4 Interaction entre les fluides de forage et la formation géologique :	20
1.1.5 Composants et des propriétés clés des fluides de forage	24
1.1.6 Optimisation des fluides de forage pour maximiser la productivité :	29
1.2 Les problèmes rencontrés :	35
2 Présentation du projet	38
2.1 L'idée de projet (la solution proposée)	38
2.2 Les Valeurs proposées :	39
2.2.1 Calculateur de boue de laboratoire (Lab Mud Calculator)	39
2.2.2 Laboratoire virtuel (Virtual Laboratory)	41
2.2.3 Optimiseur de fluides de :	42
2.3 L'équipe	43
2.3.1 Le rôle des élèves ingénieurs :	44
2.4 Les Objectifs du projet et la part du marché :	45
2.4.1 Les objectifs tracés :	45

2.4.2	La part du marché	47
2.5	Le planning de réalisation du projet	50
3	Aspects innovants	52
3.1	La nature des innovations :	52
3.1.1	Les innovations croissantes :	53
3.1.2	Les innovations technologiques :	53
3.2	Les domaines d'innovation	54
3.2.1	Nouveaux processus :	54
3.2.2	L'IA offre des services améliorés :	55
3.2.3	L'IA offre de Nouveaux clients :	56
3.2.4	L'intelligence artificielle assure l'acquisition de nouveaux clients :	57
3.2.5	Offre de produits innovants :	58
4	Analyse stratégique du marché	60
4.1	Le segment du marché	60
4.1.1	Le marché potentiel :	60
4.2	Le marché cible :	62
4.2.1	Pourquoi avons-nous choisi ce marché ?	62
4.2.2	La détermination de la possibilité de conclure des contrats d'achat :	63
4.3	Mesure de l'intensité de la concurrence :	65
4.3.1	Déterminez qui sont nos concurrents directs et indirects	66
4.3.2	Déterminer leur nombre et leurs parts de marché :	67
4.3.3	Identifier leurs forces et leurs faiblesses	67
4.4	La stratégie marketing	68
5	Plan de production et organisation	70
5.1	Le processus de production	70
5.1.1	Le processus de développement et d'utilisation de la solution	72
5.1.2	Étapes de Développement d'une Solution AI SaaS :	75
5.1.3	La modélisation par le Machine Learning	77

5.1.4	Les pratiques des opérations de ML MLOps pour la mise en production des modèles d'IA	79
5.2	L'approvisionnement	81
5.3	La main d'œuvre	83
5.3.1	La détermination du nombre de postes	83
5.3.2	La nature et le type de main-d'œuvre	85
5.4	Les principaux partenaires	86
6	Plan financier	88
6.1	Les coûts et les charges	88
6.1.1	Les modes et sources d'obtention de financement appropriés :	91
6.1.2	L'obtention d'un remboursement	93
6.2	Le chiffre d'affaires	94
6.2.1	La présentation de deux scénarios :	95
6.3	Les comptes de résultats escomptés	97
6.3.1	Les ventes réalisées et charges engagées :	97
6.3.2	Le besoin en fonds de roulement (BFR) :	99
6.4	Le plan de trésorerie	100
6.4.1	Le délai de récupération du capital investi (DR)	101
6.4.2	Le taux moyen de rentabilité (TMR)	101
7	Prototype expérimental	102
7.1	Développement des modèles ML :	103
7.1.1	Définitions des objectifs :	104
7.1.2	Collecte et Préparation des Données	105
7.1.3	Choix de l'Algorithme	118
7.1.4	Le Déploiement des modèles ML	127
7.1.5	La partie d'une application ou Backend :	128
7.1.6	Interface utilisateur (Frontend) :	129
7.1.7	Interface utilisateur	131
	Conclusion Générale	132

Table des figures

1.1	Circuit de circulation du fluide de forage pour un système conventionnel.	19
1.2	Les types de fluide de forage.	20
1.3	Interaction entre les fluides de forage et la formation géologique	21
1.4	Processus d'infiltration du fluide de forage	24
1.5	Les différents composants des fluides de forage (les boues à base d'huile et les boues à base d'eau)	25
1.6	Les modèles rhéologiques des fluides de forage.	27
2.1	Le planing générale de notre stratup	51
3.1	La nature des innovations	52
5.1	Modèle et Notation des Processus Métier (Business Process Model and Notation : BPMN) pour le procédé intelligent d'optimisation des fluides de forage	74
5.2	les étapes de développement d'un modèle machine learning	79
5.3	Les algorithmes du ML selon SKleran	80
5.4	Le cycle de MLOps selon Databricks	81
7.1	Tableau de Données des Tests de Déplacement (Permiabilité de Retour)	106
7.2	Tableau de Données des Formulations en Laboratoire	107
7.3	Un diagramme de chaleur (heatmap) qui offre une représentation visuelle globale des données.	109
7.4	Une scatter plot, qui représente la distribution de quelques variables.	110
7.5	Une heatmap, qui représente la matrice de corrélation entre certaines variables.	111

7.6	L'arbre de décision utilisé comme estimateur dans le modèle.	113
7.7	L'algorithme KNN pour la classification des variables.	114
7.8	Le résultat des trois méthodes de traitement des valeurs manquantes	115
7.9	Les courbes de distribution des sorties réelles et des sorties prédites par le modèle prédictif pour les trois méthodes de gestion des valeurs manquantes	115
7.10	La méthode de Cross Validation selon Scikit learn	117
7.11	Exemple de Régression Linéaire	119
7.12	Illustration des arbres de décision (Decision Tree) selon Azure Microsoft	120
7.13	Illustration des Forêts Aléatoires (Random Forest) selon Azure Microsoft	121
7.14	Illustration de l' SVM selon Azure Microsoft	122
7.15	Illustration d'un réseau de neurones artificiel (ANN)	124
7.16	Schématisation de la Machine de Déplacement utilisée pour la mesure de la perméabilité de retour (Akkal, 2014).	125
7.17	Courbes d'apprentissage pour la méthode SVM	126
7.18	Courbes d'apprentissage pour la méthode ANN (Réseau de Neurones Artificiels)	126
7.19	Logo du framework FastAPI de python.	128
7.20	La documentation de notre API selon FastAPI docs 1.	129
7.21	La documentation de notre API selon FastAPI docs 2.	129
7.22	Logo du Flutter	130
7.23	Capture d'écran du MVP	130
7.24	Capture sur l'avancement de la conception de l'interface utilisateur du premier produit	131

Liste des tableaux

6.1	Coûts liés à la main-d'œuvre pour notre start-up.	89
6.2	Frais et dépenses quotidiennes de notre stratup en DZD.	90
6.3	Le capital investi dans notre start-up en Millions DZD.	91
6.4	Chiffre d'affaire - scénario optimiste - unité 1 million Dz	96
6.5	Chiffre d'affaire - scénario pessimiste - unité 1 million Dz	96
6.6	Comptes de Résultat Prévisionnels 1ère année - Sénario optimiste . .	97
6.7	Comptes de Résultat Prévisionnels 2ère année - Sénario optimiste . .	98
6.8	cash flow en millions centimes DA	101

Introduction générale

Introduction : L'exploration et l'extraction des ressources énergétiques enfouies sous la surface terrestre sont des activités fondamentales au sein de l'industrie pétrolière. Au cœur de ces opérations de forage pétrolier réside un processus essentiel : l'utilisation de fluides de forage. Ces fluides, souvent désignés sous le nom de "boues de forage", jouent un rôle multifonctionnel crucial au sein du processus de forage pétrolier. Tout d'abord, ils servent de moyen de transmission de la puissance de la foreuse jusqu'à la tête de forage, permettant ainsi la pénétration du sol et de la roche. Cette fonction mécanique est essentielle pour l'avancement de la foreuse à travers les couches géologiques complexes. Il permet également le nettoyage du fond de puits des débris broyés et donc ces fluides ne doivent être ni trop visqueux ni très fluides pour les maintenir en suspension pendant l'arrêt du forage. Un autre rôle majeur des fluides de forage est lié à la stabilisation des parois du puits. Ils créent également un film protecteur autour de la paroi du trou de forage, empêchant les effondrements et les éboulements de roche. Cela garantit la sécurité du personnel de forage et prévient les perturbations indésirables du forage. Et enfin, ils permettent de transporter les fragments de roche et de sol détachés du front de forage jusqu'à la surface, où ils peuvent être séparés et éliminés. Cette fonction de transport facilite la collecte d'informations géologiques précieuses et maintient le trou de forage propre et dégagé, ce qui est fondamental pour le succès global de l'opération de forage pétrolier. Leur composition et leurs propriétés sont minutieusement optimisées pour accomplir une série de tâches essentielles. En raison des conditions géologiques variables que l'on peut rencontrer lors du forage, il est impératif d'ajuster les paramètres des fluides tels que la viscosité, densité et filtrat pour répondre précisément aux exigences spécifiques de chaque formation géologique. Cependant, il est important de noter que ces ajustements nécessitent beaucoup de temps et d'argent. Pour obtenir des résultats satisfaisants, les procédures en laboratoire nécessitent des tests répétés, des analyses approfondies et un suivi rigoureux. En effet, l'industrie pétrolière pourrait être confrontée à des défis importants en raison de ces coûts et délais considérables, en particulier en termes de production

annuelle d'un puits pétrolier si les fluides de forage ne sont pas formulés d'une manière adéquate. C'est pourquoi un processus d'optimisation des fluides de forage basé sur les algorithmes utilisés par l'intelligence artificielle (IA) est systématiquement mis en place. Cette démarche vise à ajuster de manière précise les caractéristiques du fluide, notamment sa densité, sa viscosité ainsi que sa composition chimique, afin de relever les défis spécifiques rencontrés pendant le forage. L'utilisation de technologies telles que l'intelligence artificielle (IA) s'avère de plus en plus importante dans ce processus d'optimisation, permettant une adaptation en temps réel en fonction des conditions géologiques rencontrées durant l'opération du forage. Cette combinaison d'expertise humaine et de technologies de pointe garantit le succès des opérations de forage pétrolier tout en réduisant les risques, en maximisant l'efficacité du forage et en augmentant la productivité annuelle du forage. Notre Startup se distingue par la création d'un système d'intelligence artificielle qui tire parti d'une précieuse base de données historiques obtenue en partenariat avec l'entreprise DFSP. Cette initiative innovante a été récompensée par l'octroi d'un label d'innovation par le ministère des Entreprises Innovantes, attestant de la valeur et de la pertinence de notre projet. De plus, au cours de cette initiative, nous avons réussi à déposer deux brevets. L'un de ces brevets est axé sur la formulation innovante d'un réducteur de filtrat, tandis que l'autre est spécifiquement consacré à notre nouvelle application basée sur l'intelligence artificielle. Ces brevets soulignent notre engagement envers la recherche et l'innovation dans le domaine des fluides de forage, renforçant ainsi notre position sur le marché.

Notre Projet de Fin d'Études (PFE) est organisé en différentes sections :

- Dans la première section, nous présentons une généralité sur fluides de forage. Cette dernière comprend une présentation des types de fluides de forage, de leurs fonctions et des méthodes d'optimisation associées.
- La deuxième section de notre PFE se concentre sur notre projet novateur lié à notre startup. Elle décrit en détail l'idée principale de notre startup, l'équipe qui travaille sur ce projet et les objectifs que nous avons définis pour notre startup.
- La troisième section de notre travail explore les divers aspects de l'innovation, détaillant leur nature et leurs domaines d'application.

- La quatrième section se concentre sur l'analyse stratégique du marché. Elle détaille les marchés cibles de notre startup, examine l'intensité concurrentielle et explore les aspects marketing de notre projet.
- La cinquième section se consacre au plan de production et d'organisation. Elle offre un aperçu détaillé du processus de production, de la gestion de l'approvisionnement, de la main-d'œuvre impliquée, ainsi que des principaux partenaires impliqués dans notre projet.
- La sixième section se consacre à la présentation du plan financier. Elle offre un détail complet des coûts, des charges, des chiffres d'affaires prévus, ainsi que du plan de trésorerie pour notre projet.
- La septième section de notre projet offre une vue approfondie de notre approche pour l'optimisation des fluides de forage par le biais de l'intelligence artificielle. Cela englobe la préparation des données, l'utilisation des algorithmes, le déploiement de notre application, ainsi que l'interface utilisateur associée.

Chapitre 1

Généralités sur les fluides de forage :

1.1 Introduction générale sur les fluides de forage

Le forage pétrolier est un processus essentiel dans l'industrie de l'exploration et de l'extraction des ressources énergétiques enfouies sous la surface de la Terre. Pour assurer le succès de ces opérations de forage, un élément clé entre en jeu : les fluides de forage. Le fluide de forage, également connu sous le nom de boue de forage, joue un rôle multifonctionnel essentiel dans le processus de forage pétrolier. Ses propriétés et sa composition sont soigneusement optimisées pour accomplir plusieurs tâches cruciales :

- **Stabilisation du puits** : Le fluide de forage exerce une pression hydrostatique dans le puits, ce qui permet de maintenir les parois du trou de forage stables, prévenant ainsi les effondrements et les éboulements indésirables des formations géologiques environnantes.
- **Suspension des déblais** : Pendant le forage, le fluide de forage est utilisé pour suspendre et transporter les déblais de roche et de terre résultant de l'action de la mèche de forage. Cela empêche l'accumulation de débris et maintient le trou de forage dégagé, permettant ainsi une progression continue.
- **Contrôle de la pression** : Le fluide de forage aide à maintenir une pression équilibrée dans le puits en ajustant sa densité. Cela permet de prévenir les éruptions incontrôlées de gaz ou de pétrole et de maintenir les conditions de

forage sûres et maîtrisées.

- **Lubrification et refroidissement** : Le fluide de forage lubrifie la mèche de forage, réduisant ainsi la friction et l'usure pendant le processus de forage. De plus, il dissipe la chaleur générée par la friction, aidant ainsi à refroidir la mèche et à prévenir les surchauffes.
- **Réduction des vibrations** : Le fluide de forage joue un rôle dans l'atténuation des vibrations générées par le processus de forage, améliorant ainsi la stabilité de l'équipement de forage et réduisant les risques de dommages ou de défaillance.

Cependant, en raison de la variabilité des conditions géologiques rencontrées lors du forage, il est nécessaire d'adapter les paramètres des fluides pour répondre aux exigences spécifiques de chaque formation géologique. Ainsi, un processus d'optimisation des fluides de forage est mis en place pour atteindre les paramètres désirés en fonction des conditions géologiques. Cela implique des ajustements précis des propriétés du fluide, tels que sa densité, sa viscosité et sa composition chimique, afin de répondre aux défis spécifiques rencontrés lors du forage.

1.1.1 Définition d'un fluide de forage :

Les fluides de forage sont des liquides ou des mélanges utilisés lors des opérations de forage pétrolier et gazier. Ils remplissent plusieurs fonctions essentielles pour faciliter le processus de forage et garantir la sécurité et l'efficacité des opérations. Ces fluides sont généralement composés d'eau, d'huile ou d'une combinaison de ces deux éléments, auxquels sont ajoutés des additifs spécifiques pour répondre aux exigences particulières de chaque opération de forage [Committee et al. \(2011\)](#).

Le premier rôle des fluides de forage est de lubrifier les parois du puits et le foret de forage pour réduire la friction et faciliter le mouvement du foret dans la formation rocheuse. Ils agissent également comme un agent de refroidissement pour dissiper la chaleur générée par le processus de forage, protégeant ainsi les équipements de forage contre les températures élevées.

Un autre rôle important des fluides de forage est de transporter les déblais générés lors du forage hors du puits. Ils maintiennent les particules en suspension et les

transportent jusqu'à la surface, permettant ainsi une élimination adéquate des déchets et une clarté de la zone de forage. De plus, les fluides de forage aident à stabiliser les parois du puits en exerçant une pression hydrostatique pour prévenir les éboulements de terrain et assurer l'intégrité du puits.

1.1.2 Rôles des fluides de forage :

Les fluides de forage jouent des rôles essentiels dans le processus de forage pétrolier et gazier. Voici huit rôles clés qu'ils remplissent [Caenn & Chillingar \(1996\)](#); [Apaleke et al. \(2012\)](#) :

- **Lubrification :**

Les fluides de forage lubrifient les parois du puits et le trépan de forage, réduisant ainsi la friction entre les outils de forage et la formation rocheuse. Cela facilite la pénétration du foret dans le sol et permet un forage plus efficace.

- **Refroidissement :**

Les fluides de forage dissipent la chaleur générée par le processus de forage, protégeant ainsi les équipements de forage des températures élevées. Ils assurent également un refroidissement adéquat des outils de forage, évitant ainsi leur surchauffe.

- **Transport des déblais :**

Lorsque le foret pénètre dans la formation rocheuse, des déblais (boue, roche, sable, etc.) sont générés. Les fluides de forage sont responsables du transport efficace de ces déblais hors du puits vers la surface. Ils maintiennent les particules en suspension et les acheminent vers les systèmes de traitement appropriés.

- **Stabilisation des parois du puits :**

Les fluides de forage exercent une pression hydrostatique sur les parois du puits pour maintenir leur stabilité. Cette pression équilibrée empêche les éboulements de terrain, les affaissements de paroi et assure l'intégrité du puits.

- **Contrôle de la pression :**

Les fluides de forage sont utilisés pour contrôler la pression dans le puits. Ils

peuvent être ajustés pour équilibrer la pression de la formation rocheuse, prévenir les éruptions de gaz ou de pétrole et maintenir le puits dans des conditions de pression sûres et contrôlées.

- **Prévention de la contamination :**

Les fluides de forage forment une barrière protectrice entre la formation rocheuse et les fluides environnants tels que l'eau douce ou les fluides de production. Ils empêchent ainsi la contamination de la formation et garantissent l'intégrité des ressources souterraines.

- **Mesure des paramètres géologiques :**

Les fluides de forage peuvent être utilisés pour obtenir des échantillons de formation rocheuse en collectant des carottes de forage. Ces échantillons permettent d'analyser la composition géologique de la formation et de prendre des décisions éclairées sur la poursuite du forage.

- **Support de l'outillage :**

Les fluides de forage aident à soutenir et à stabiliser les outils de forage, tels que les tiges de forage et les trépan. Ils permettent un contrôle précis de la trajectoire du forage et garantissent une exécution précise des opérations de forage.

1.1.3 Les types de fluide de forage :

La famille des fluides de forage à base d'eau (WBM), dans laquelle l'eau douce, salée ou de mer est la phase continue, est la plus utilisée (90-95%). Les WBM sont principalement composés de solutions aqueuses de polymères et d'argiles dans l'eau ou les saumures, avec différents types d'additifs incorporés à la solution aqueuse [Apaleke et al. \(2012\)](#).

La famille des fluides de forage à base d'huile (OBM) est moins utilisée (5-10%). Ces fluides de forage ont été développés pour des situations où les WBM se sont révélés inadéquats. Les OBM sont des boues à base d'huile (généralement du gasoil). Généralement, ce sont des émulsions inverses de saumure dans une phase continue

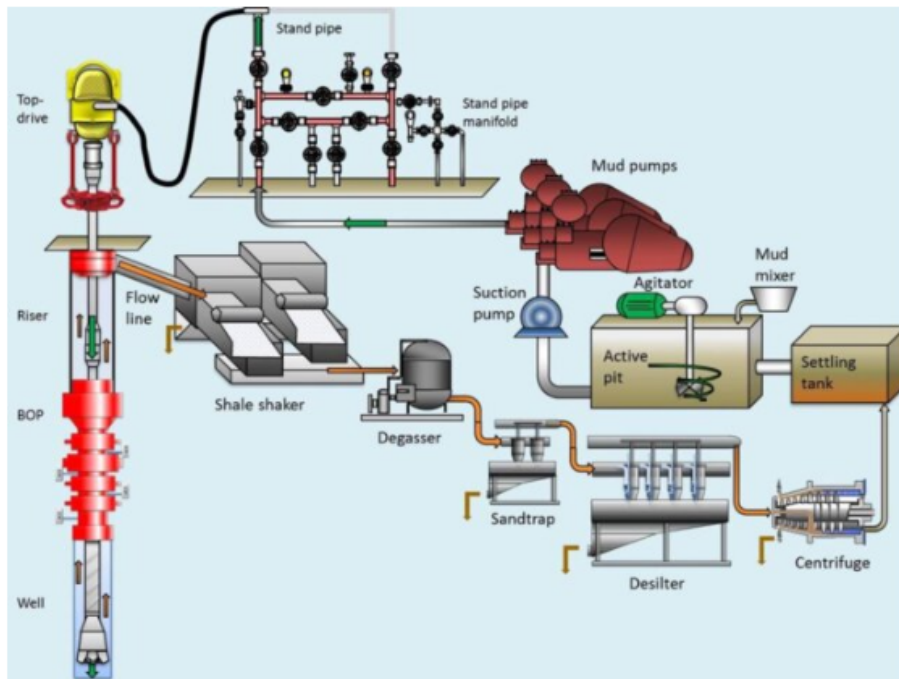


FIGURE 1.1 – Circuit de circulation du fluide de forage pour un système conventionnel.

d'huile stabilisée par des agents tensioactifs. D'autres additifs sont souvent ajoutés à la phase organique, tels que des modificateurs organophiles de la surface de l'argile. Cependant, bien que les OBM offrent souvent de meilleures performances, ils présentent des inconvénients majeurs tels que des coûts généralement plus élevés et un impact écologique moins favorable que les WBM [Khodja et al. \(2010\)](#).

La troisième famille de fluides de forage comprend les fluides gazeux, les boues aérées (boues classiques avec de l'azote) ou les mousses aqueuses. Ces fluides de forage sont utilisés lorsque leur pression est inférieure à celle exercée par le pétrole situé dans les pores de la formation rocheuse. Ces fluides sont appelés "fluides sous-équilibrés". Cette technologie de forage sous-équilibré est généralement utilisée pour les formations peu consolidées et/ou fracturées. Des tests de vitesse de forage contrôlés dans différentes roches ont confirmé que l'air ou le gaz est un fluide de forage plus rapide que l'eau ou l'huile. Normalement, l'eau devrait être le liquide de forage le plus rapide, cependant, dans ce cas, les tests de forage montrent que les additifs les plus couramment utilisés ont des effets néfastes sur la vitesse de forage.

Le choix d'un système de boue de forage commence par la sélection d'une famille de boues, en fonction de la nature de la formation rocheuse, et doit prendre en compte les contraintes environnementales et économiques. Le choix de la formulation de la boue sera la deuxième étape, où il faudra décider de la gamme de propriétés souhaitées, en utilisant des quantités minimales d'additifs. La Figure 2 résume les types de fluides de forage.

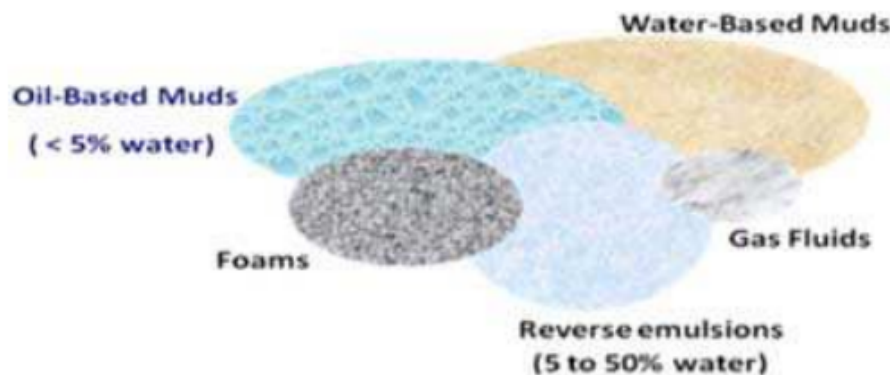


FIGURE 1.2 – Les types de fluide de forage.

1.1.4 Interaction entre les fluides de forage et la formation géologique :

Les opérations de forage pétrolier dépendent largement des fluides de forage, qui représentent une part significative des coûts totaux. Ces fluides jouent un rôle crucial en permettant l'abattage de la roche, en refroidissant et nettoyant le trépan, en réduisant les frottements, en maintenant la stabilité du puits et en empêchant les fluides interstitiels de s'écouler prématurément. Au fil des années, les techniques de formulation des fluides de forage ont évolué pour répondre aux défis croissants rencontrés dans l'industrie pétrolière.

Le développement de ces fluides a connu une progression technologique significative, passant des mélanges simples d'eau et d'argile utilisés dans les premières opérations de forage aux mélanges complexes de produits organiques et inorganiques spécifiques utilisés aujourd'hui. Les fluides de forage doivent répondre à des exigences telles que

leur facilité d'utilisation, leur coût raisonnable et leur compatibilité environnementale. Les progrès technologiques ont permis de formuler des fluides plus performants, adaptés aux conditions spécifiques de chaque puits de forage.

La recherche scientifique et l'innovation ont joué un rôle essentiel dans le développement de nouvelles formulations de fluides de forage. Les chercheurs se sont concentrés sur l'amélioration de la stabilité des fluides, la réduction des impacts environnementaux et l'optimisation des performances de forage. Des études expérimentales et des simulations informatiques ont permis de mieux comprendre les interactions complexes entre les fluides de forage et les formations géologiques, ce qui a conduit à des améliorations continues dans la conception des fluides de forage.

En résumé, les fluides de forage représentent une composante essentielle des opérations de forage pétrolier. Leur formulation et leur optimisation sont le résultat d'une évolution technologique constante, visant à répondre aux exigences de performance, de coût et d'impact environnemental. Les avancées scientifiques continuent de jouer un rôle clé dans l'amélioration des fluides de forage, permettant ainsi de soutenir l'efficacité et la durabilité des opérations de forage pétrolier.

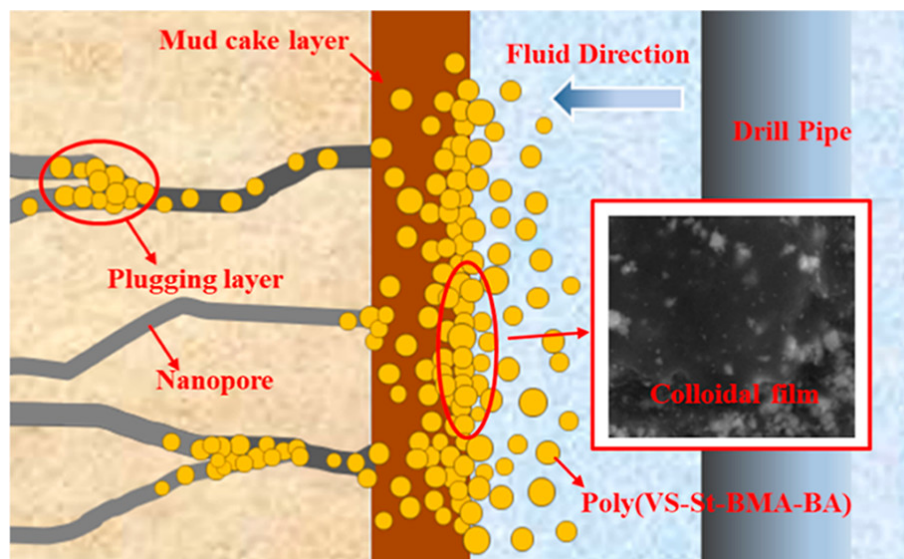


FIGURE 1.3 – Interaction entre les fluides de forage et la formation géologique

Mécanismes d'interactions des fluides de forage avec la formation géologique :

Les fluides de forage peuvent avoir un impact significatif sur la perméabilité, la porosité et la stabilité de la formation géologique. La perméabilité se réfère à la capacité d'un matériau à permettre le passage des fluides à travers ses pores. Les fluides de forage peuvent influencer la perméabilité de la formation en interagissant avec les particules solides présentes dans le réservoir. Par exemple, si les fluides de forage contiennent des particules fines qui obstruent les pores de la formation, cela peut réduire la perméabilité et affecter la capacité du pétrole ou du gaz de circuler à travers la roche [Mody & Hale \(1993\)](#).

La porosité, quant à elle, se réfère à la quantité d'espace vide dans une roche. Les fluides de forage peuvent affecter la porosité de la formation en interagissant avec les particules solides et en remplissant les espaces vides. Certains fluides de forage peuvent augmenter la porosité en dissolvant certains minéraux ou en provoquant une dilatation des pores, ce qui peut faciliter le déplacement des fluides dans la roche. D'autres fluides de forage peuvent au contraire réduire la porosité en obstruant les pores ou en provoquant un resserrement des grains de la formation.

En ce qui concerne la stabilité de la formation, les fluides de forage doivent être conçus de manière à maintenir l'intégrité de la roche et à prévenir les éboulements ou les effondrements. Certains fluides de forage contiennent des additifs spécifiques qui renforcent les parois de la formation et empêchent les fractures ou les fuites. De plus, ils peuvent aider à stabiliser les formations argileuses qui ont tendance à se dilater ou à se contracter lors du forage.

En résumé, les fluides de forage ont un impact majeur sur la perméabilité, la porosité et la stabilité de la formation géologique. Le choix des fluides de forage et de leur composition doit être soigneusement étudié pour optimiser les performances du forage tout en minimisant les dommages potentiels à la formation. Une bonne compréhension de l'interaction entre les fluides de forage et la formation géologique est essentielle pour prendre des décisions éclairées lors des opérations de forage

Processus d'infiltration du fluide de forage

La filtration est un processus essentiel dans les opérations de forage, où la phase liquide de la boue de forage pénètre dans la formation géologique perméable sous l'effet d'une pression différentielle. Cette filtration permet de filtrer les particules solides présentes dans la boue et de former un gâteau filtrant à la surface de la formation. Pour que cela se produise, trois éléments doivent être présents : un fluide liquide ou une suspension liquide/solide, un milieu perméable et une pression suffisante pour forcer le fluide à traverser la formation [Ramézani et al. \(2015\)](#).

La conception des fluides de forage tient compte des caractéristiques et des propriétés de la filtration, car elles jouent un rôle crucial dans la performance globale du fluide. Des études scientifiques ont montré que des propriétés spécifiques du fluide, telles que sa viscosité, sa densité et sa rhéologie, ainsi que des facteurs environnementaux et de formation, peuvent influencer le processus de filtration. Par conséquent, la formulation du fluide de forage doit être adaptée pour minimiser la perte de filtrat dans la formation et maintenir une efficacité de filtration optimale.

La filtration du fluide de forage peut avoir des conséquences indésirables sur la formation géologique. Les changements de mouillabilité de la roche, la migration des fines, le colmatage des particules solides du fluide de forage et les incompatibilités chimiques avec l'eau de formation sont autant de facteurs qui peuvent causer des dommages à la formation. Ces dommages peuvent entraîner une réduction de la perméabilité, une diminution de la porosité et une instabilité de la formation, ce qui peut compromettre la productivité du puits de pétrole ou de gaz.

Ainsi, l'objectif principal des fluides de forage est de minimiser la quantité de filtrat de fluide pénétrant dans la formation géologique. Cela se fait en optimisant la composition du fluide, en utilisant des additifs spécifiques pour améliorer la performance de filtration et en surveillant en continu les paramètres du fluide pendant les opérations de forage. Une gestion efficace de la filtration contribue à maintenir l'intégrité de la formation, à prévenir les dommages et à assurer le succès global du processus de forage.

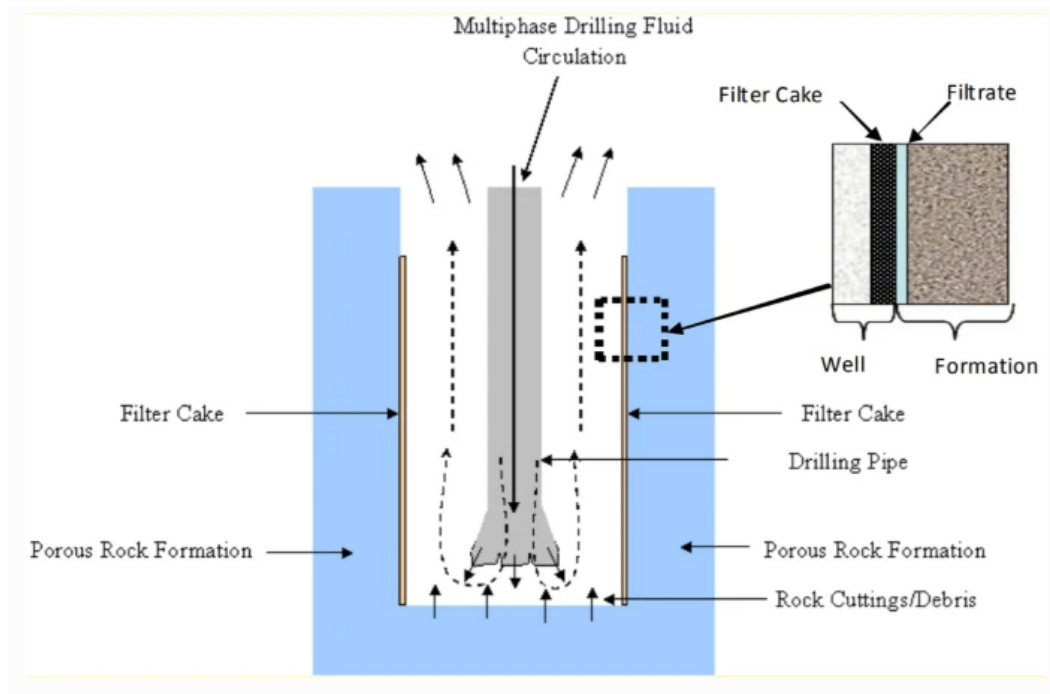


FIGURE 1.4 – Processus d'infiltration du fluide de forage

1.1.5 Composants et des propriétés clés des fluides de forage

Les fluides de forage sont des mélanges complexes composés de différents éléments qui jouent des rôles spécifiques dans le processus de forage. Parmi les composants clés des fluides de forage, on retrouve notamment les solides pondérés, tels que le carbonate de calcium et l'hématite, qui sont ajoutés pour augmenter la densité du fluide. La densité du fluide est un paramètre important car elle permet de contrôler la pression dans le puits de forage et de prévenir l'éruption de gaz ou de pétrole [Caenn et al. \(2011\)](#).

La viscosité est une autre propriété clé des fluides de forage. Elle mesure la résistance d'un fluide à l'écoulement et détermine sa capacité à transporter les déblais de forage et à lubrifier les équipements de forage. Une viscosité appropriée est essentielle pour maintenir la stabilité du puits et faciliter les opérations de forage.

Le pH est également un facteur important dans la formulation des fluides de forage. Un pH équilibré est nécessaire pour prévenir la corrosion des équipements de forage et maintenir la stabilité des additifs chimiques utilisés dans le fluide. De plus, le pH peut

également influencer l'efficacité de certaines réactions chimiques qui se produisent lors des opérations de forage.

Enfin, les fluides de forage peuvent également contenir des additifs tels que des polymères, des inhibiteurs de corrosion, des agents mouillants, des agents dispersants, etc. Ces additifs sont choisis en fonction des propriétés spécifiques requises pour chaque opération de forage. Par exemple, des agents mouillants peuvent être ajoutés pour améliorer l'adhérence du fluide aux parois du puits, tandis que des agents dispersants peuvent être utilisés pour prévenir l'agglomération des particules solides.

En résumé, les fluides de forage sont des mélanges complexes de composants qui sont soigneusement sélectionnés en fonction de leurs propriétés clés telles que la densité, la viscosité et le pH. Ces propriétés jouent un rôle essentiel dans le maintien de la stabilité du puits, la prévention des dommages à la formation géologique et l'optimisation des opérations de forage. Une formulation appropriée des fluides de forage est donc nécessaire pour assurer la réussite des travaux de forage.

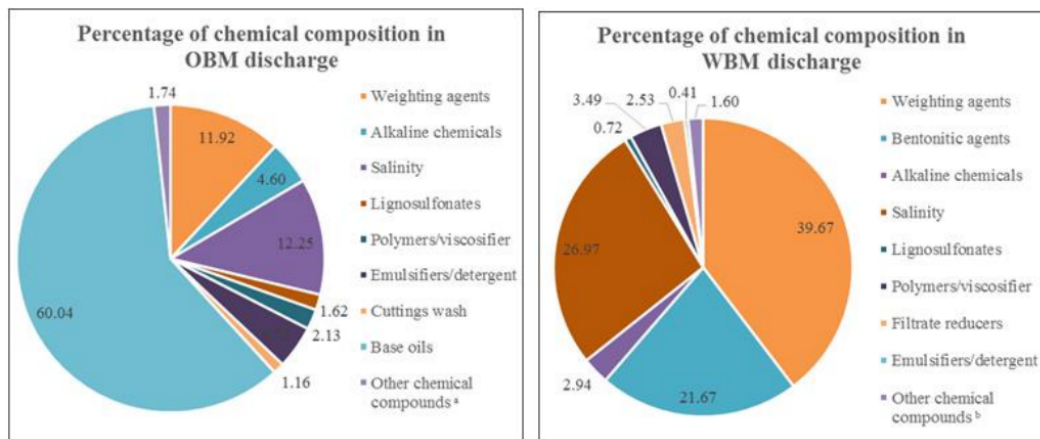


FIGURE 1.5 – Les différents composants des fluides de forage (les boues à base d'huile et les boues à base d'eau)

Les propriétés rhéologiques des fluides de forage

Les propriétés rhéologiques des fluides de forage sont essentielles dans l'industrie pétrolière pour garantir le succès des opérations de forage. Ces propriétés définissent la manière dont les fluides réagissent aux forces appliquées, notamment leur viscosité,

leur plasticité et leur comportement en écoulement. Dans ce qui suit, nous allons présenté en détail ces propriétés [Liu et al. \(2021\)](#).

La viscosité

La viscosité est une propriété clé des fluides de forage qui mesure la résistance du fluide à l'écoulement. Elle est déterminante pour la fluidité et la mobilité du fluide dans le puits de forage. Une viscosité appropriée est essentielle pour garantir un transport efficace des déblais de forage, assurer la stabilité du puits en maintenant les parois en place et faciliter les opérations de forage en permettant une circulation fluide du fluide de forage.

Une viscosité trop faible peut entraîner une perte de contrôle du puits et une mauvaise évacuation des déblais de forage, ce qui peut entraîner des problèmes tels que des bourrages ou des obstructions. D'un autre côté, une viscosité trop élevée peut entraîner une augmentation de la puissance requise pour le pompage du fluide de forage, ainsi qu'une résistance accrue à l'écoulement, ce qui peut entraîner des difficultés lors des opérations de forage.

La viscosité des fluides de forage peut être ajustée en utilisant des additifs spécifiques pour atteindre les valeurs optimales requises pour les différentes phases du forage. Par exemple, des polymères peuvent être ajoutés pour augmenter la viscosité du fluide, tandis que des agents réducteurs de viscosité peuvent être utilisés pour la réduire. Le contrôle précis de la viscosité est essentiel pour assurer un forage sûr et efficace en fonction des caractéristiques de la formation géologique et des objectifs de forage.

La mesure de la viscosité des fluides de forage est généralement effectuée à l'aide d'un viscosimètre, un appareil qui détermine la force nécessaire pour faire circuler le fluide à travers un tube de mesure. Ces mesures de viscosité sont utilisées pour évaluer les propriétés rhéologiques du fluide de forage et ajuster la formulation si nécessaire afin d'optimiser les performances du forage.

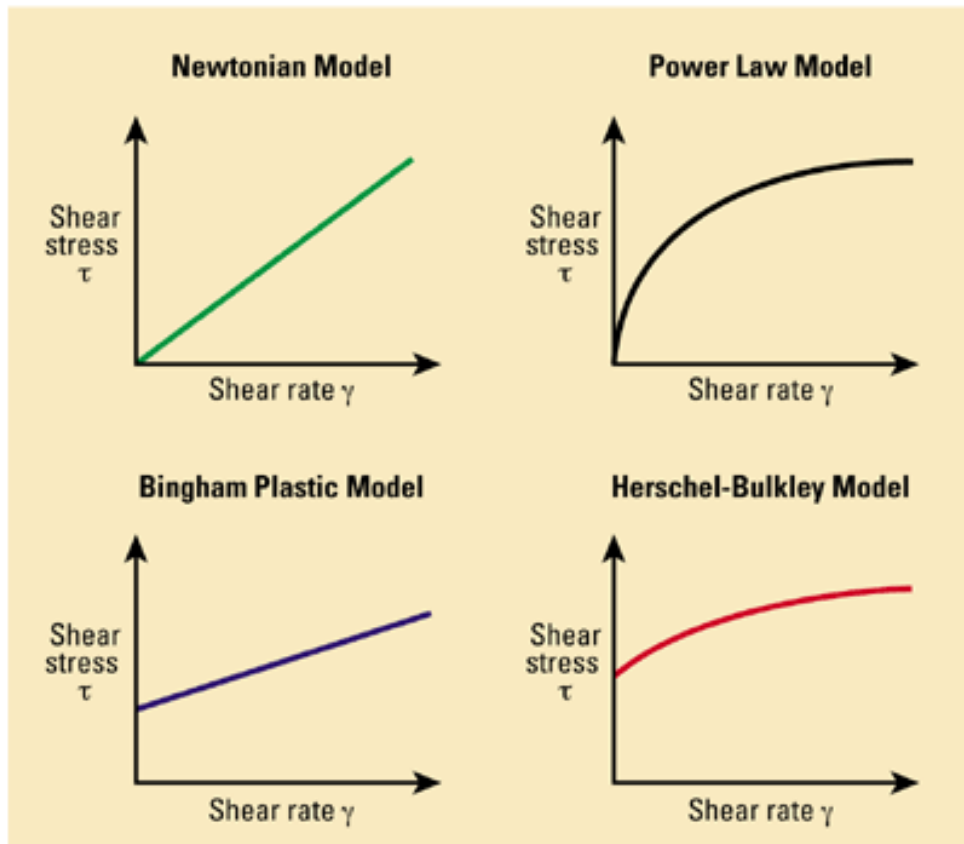


FIGURE 1.6 – Les modèles rhéologiques des fluides de forage.

La plasticité :

La plasticité est une propriété rhéologique des fluides de forage qui mesure leur capacité à se déformer et à conserver cette déformation après l'application d'une contrainte. Elle est particulièrement importante dans les formations géologiques contenant des argiles, car ces argiles peuvent se déformer et causer des problèmes tels que des pertes de circulation de fluide ou l'instabilité des parois du puits.

Un fluide de forage avec une plasticité adéquate est capable de former une barrière étanche contre les fluides interstitiels présents dans la formation géologique. Cela permet de maintenir la stabilité du puits en empêchant les fuites de fluides et en prévenant l'intrusion de matériaux indésirables dans le puits.

La mesure de la plasticité des fluides de forage est généralement réalisée à l'aide

d'essais de laboratoire, tels que l'essai d'indice de plasticité ou l'essai d'argile-gâteau, qui permettent de déterminer la capacité du fluide à se déformer et à conserver cette déformation. Les résultats de ces essais aident les ingénieurs de forage à ajuster la formulation du fluide pour atteindre une plasticité optimale en fonction des caractéristiques de la formation géologique et des objectifs du forage.

Une plasticité appropriée du fluide de forage est essentielle pour assurer une bonne étanchéité des parois du puits, réduire les pertes de circulation de fluide et maintenir la stabilité du puits. Elle contribue à minimiser les problèmes rencontrés lors des opérations de forage et à assurer des conditions de forage sûres et efficaces.

L'élasticité :

L'élasticité est une propriété rhéologique des fluides de forage qui mesure leur capacité à retrouver leur forme d'origine après avoir été soumis à une déformation. Elle est importante dans le contexte des opérations de forage car elle permet au fluide de répondre de manière adéquate aux variations de contraintes rencontrées lors du processus de forage.

Un fluide de forage élastique peut se déformer sous l'effet d'une contrainte, par exemple lors du passage à travers une zone de formation rocheuse, mais il a également la capacité de revenir à sa forme initiale une fois la contrainte supprimée. Cela est essentiel pour maintenir la stabilité du puits et assurer un écoulement fluide du fluide de forage.

La mesure de l'élasticité des fluides de forage est généralement réalisée à l'aide d'essais de laboratoire, tels que l'essai de comportement viscoélastique ou l'essai de récupération élastique. Ces essais permettent de quantifier la capacité du fluide à retrouver sa forme d'origine et à résister aux déformations permanentes.

Une certaine élasticité du fluide de forage est souhaitable car elle permet d'obtenir une réponse adaptée aux variations de contraintes, ce qui favorise une meilleure performance lors des opérations de forage. Cependant, un excès d'élasticité peut également entraîner des problèmes tels que la création de boues collantes ou la difficulté à éliminer les déblais de forage. Il est donc important de trouver un équilibre

entre élasticité et fluidité pour optimiser les performances du fluide de forage.

Le seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est une propriété rhéologique des fluides de forage qui représente la contrainte minimale nécessaire pour que le fluide commence à s'écouler. Il mesure la rigidité ou la résistance du fluide à l'écoulement. Plus le seuil de cisaillement est élevé, plus le fluide est visqueux et moins il a tendance à s'écouler facilement.

Dans le contexte des fluides de forage, un seuil de cisaillement élevé peut être bénéfique car il contribue à maintenir la stabilité du puits. En empêchant le fluide de s'écouler prématurément dans la formation géologique, il assure une meilleure maîtrise du forage et réduit les risques de problèmes tels que l'érosion des parois du puits.

Un seuil de cisaillement élevé peut également faciliter le transport des déblais de forage et des particules solides dans le fluide, ce qui contribue à maintenir la propreté du puits et à éviter les obstructions.

Cependant, il est important de trouver un équilibre entre un seuil de cisaillement adéquat et une viscosité appropriée. Un seuil de cisaillement trop élevé peut rendre le fluide difficile à pomper et entraîner une augmentation de la consommation d'énergie lors des opérations de forage. Il est donc essentiel de considérer les caractéristiques spécifiques de la formation géologique et les exigences du processus de forage pour déterminer le seuil de cisaillement optimal du fluide de forage [Saasen & Ytrehus \(2018\)](#).

1.1.6 Optimisation des fluides de forage pour maximiser la productivité :

L'optimisation des fluides de forage est un aspect essentiel pour maximiser la productivité et l'efficacité des opérations de forage. Cela implique l'utilisation de différentes stratégies et techniques visant à améliorer les performances des fluides de forage en termes de leur composition, de leurs propriétés rhéologiques et de leur comportement dans les formations géologiques.

Une des stratégies couramment utilisées est l'optimisation de la composition des fluides de forage. Cela implique de choisir judicieusement les composants et les additifs en fonction des caractéristiques de la formation géologique et des exigences du processus de forage. Par exemple, l'ajout de polymères spécifiques peut améliorer la viscosité et la stabilité du fluide, tandis que l'utilisation de substances chimiques spéciales peut réduire la friction et l'usure de l'équipement de forage [Rahman et al. \(2021\)](#).

Une autre technique d'optimisation est l'ajustement des propriétés rhéologiques des fluides de forage. Cela comprend le contrôle de la viscosité, du seuil de cisaillement, de la plasticité et de l'élasticité du fluide pour garantir un écoulement efficace et une bonne réponse aux conditions de forage. L'utilisation de tests de laboratoire et de modèles prédictifs peut aider à déterminer les valeurs optimales de ces propriétés en fonction des caractéristiques de la formation et des objectifs du forage [Davoodi et al. \(2023\)](#).

L'optimisation des fluides de forage comprend également la mise en œuvre de techniques avancées telles que la modification des paramètres de pH, l'utilisation de nanoparticules et l'application de technologies de pointe telles que l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique. Ces approches permettent d'améliorer la performance des fluides de forage en fournissant des caractéristiques spécifiques adaptées aux conditions de forage spécifiques [Salem et al. \(2022\)](#).

Enfin, l'optimisation des fluides de forage implique une évaluation continue et une surveillance rigoureuse des performances du fluide pendant les opérations de forage. Cela permet de détecter rapidement les problèmes potentiels et de prendre les mesures correctives appropriées pour garantir une productivité maximale et une sécurité accrue [Gautam & Guria \(2020\)](#).

En résumé, l'optimisation des fluides de forage est un processus essentiel pour maximiser la productivité et la performance des opérations de forage. Il implique l'utilisation de stratégies et de techniques appropriées pour optimiser la composition, les propriétés rhéologiques et le comportement des fluides dans les formations géologiques. Cela nécessite une approche intégrée et une collaboration étroite entre les experts en forage, les chimistes, les ingénieurs et les chercheurs afin de développer des solutions

adaptées aux besoins spécifiques du forage.

L'optimisation des fluides de forage au laboratoire :

L'optimisation des fluides de forage au laboratoire est une étape cruciale pour améliorer l'efficacité et la performance des opérations de forage. Cependant, il est vrai que cette phase peut parfois entraîner des pertes d'argent et de temps si elle n'est pas réalisée de manière appropriée [Khodja et al. \(2010\)](#).

L'une des raisons principales des pertes d'argent et de temps est le coût élevé des tests de laboratoire. Les tests pour évaluer les propriétés rhéologiques, la stabilité, la compatibilité chimique et d'autres caractéristiques des fluides de forage nécessitent souvent des équipements spécialisés et des ressources considérables. De plus, les délais d'analyse peuvent être longs, ce qui peut entraîner des retards dans les décisions et les actions à prendre sur le terrain [Labenski et al. \(2003\)](#).

Un autre facteur qui peut causer des pertes d'argent et de temps est le manque de coordination et de communication entre les équipes de forage et les laboratoires. Une mauvaise compréhension des besoins et des objectifs peut entraîner des tests inutiles ou mal orientés, ce qui gaspille des ressources précieuses. De plus, des retards dans la transmission des résultats et des recommandations entre les différentes parties prenantes peuvent entraîner des délais supplémentaires et des erreurs d'interprétation.

En outre, la complexité des formations géologiques et des conditions de forage peut rendre difficile la reproduction précise des conditions réelles en laboratoire. Les résultats des tests en laboratoire peuvent ne pas toujours refléter pleinement les réactions et les comportements des fluides de forage sur le terrain, ce qui peut entraîner des ajustements inappropriés ou des inefficacités lors de l'utilisation des fluides optimisés.

Pour atténuer ces problèmes, il est essentiel de mettre en place une approche intégrée entre les équipes de forage et les laboratoires. Cela comprend une communication claire et continue, une définition précise des objectifs et des paramètres de test, ainsi qu'une évaluation critique des résultats obtenus en laboratoire. De plus, l'utilisation de techniques de modélisation et de simulation avancées peut compléter les tests de laboratoire pour fournir des informations supplémentaires et aider à optimiser les

fluides de forage de manière plus efficace.

En conclusion, bien que l'optimisation des fluides de forage au laboratoire puisse parfois entraîner des pertes d'argent et de temps, ces problèmes peuvent être atténués par une coordination et une communication efficaces entre les équipes de forage et les laboratoires, ainsi que par l'utilisation de techniques de modélisation et de simulation avancées. En investissant dans une approche intégrée et en s'assurant d'une utilisation judicieuse des ressources, il est possible de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité des opérations de forage.

Le choix de fluides de forage :

Le choix de fluides de forage adaptés à chaque formation géologique revêt une importance cruciale pour minimiser les effets négatifs lors des opérations de forage. Chaque formation géologique présente des caractéristiques uniques telles que la perméabilité, la porosité, la lithologie et la présence de fluides interstitiels, qui influent directement sur le comportement des fluides de forage. Utiliser des fluides inappropriés peut entraîner des conséquences néfastes telles que des dommages à la formation, une baisse de la productivité et des problèmes de stabilité du puits.

L'adaptation des fluides de forage à chaque formation géologique permet d'optimiser les performances du forage en garantissant une circulation efficace des déblais de forage, en évitant la migration des particules fines, en minimisant les pertes de fluide interstitiel et en préservant l'intégrité de la formation réservoir. Par exemple, dans les formations argileuses, l'utilisation de fluides de forage à base d'argile peut aider à sceller les parois du puits et à prévenir les fuites de fluide interstitiel, ce qui contribue à maintenir la stabilité du puits et à minimiser les perturbations du réservoir.

Un autre aspect important est la compatibilité chimique entre les fluides de forage et la formation géologique. Certains fluides de forage peuvent réagir chimiquement avec la formation, ce qui peut entraîner des changements dans les propriétés physiques de la roche, tels que l'altération de la porosité et de la perméabilité. En choisissant des fluides de forage compatibles avec la formation, on minimise les risques de dommages chimiques et on préserve ainsi l'intégrité de la roche réservoir [Ramézani et al. \(2015\)](#);

Ba geri et al. (2016).

De plus, le choix de fluides de forage adaptés à chaque formation géologique permet d'optimiser l'efficacité des opérations de forage en réduisant les coûts et en améliorant la productivité. Des fluides inappropriés peuvent entraîner des retards et des dépenses supplémentaires en raison de problèmes tels que la colmatage du puits, la perte de circulation ou la nécessité d'utiliser des produits chimiques supplémentaires pour corriger les problèmes rencontrés. En sélectionnant soigneusement les fluides de forage en fonction des caractéristiques de la formation, on peut minimiser ces problèmes et maximiser l'efficacité du forage Reid et al. (1992).

En conclusion, le choix de fluides de forage adaptés à chaque formation géologique revêt une importance cruciale pour minimiser les effets négatifs lors des opérations de forage. Cela permet d'optimiser les performances du forage, de prévenir les dommages à la formation, de garantir la stabilité du puits et d'améliorer l'efficacité globale des opérations. En tenant compte des caractéristiques spécifiques de chaque formation, on peut sélectionner les fluides de forage appropriés qui répondent aux exigences particulières de chaque situation, contribuant ainsi à des opérations de forage réussies et efficaces.

Limitations des méthodes d'optimisations classiques :

Les méthodes d'optimisation classiques des fluides de forage en laboratoire présentent certaines limitations qui peuvent entraver leur efficacité et leur précision. Tout d'abord, ces méthodes nécessitent souvent des échantillons représentatifs de la formation géologique pour effectuer des tests en laboratoire. Cependant, la collecte de ces échantillons peut être coûteuse et chronophage, ce qui limite la disponibilité des données nécessaires pour optimiser les fluides de forage Lashari et al. (2019).

De plus, les tests en laboratoire sont souvent réalisés dans des conditions statiques et contrôlées, ce qui ne reflète pas toujours fidèlement les conditions dynamiques et complexes rencontrées lors des opérations de forage sur le terrain. Les propriétés des fluides de forage peuvent varier en fonction de nombreux facteurs, tels que la pression, la température et les interactions avec la formation géologique. Par conséquent, les

résultats obtenus en laboratoire peuvent ne pas être entièrement représentatifs des performances réelles des fluides de forage sur le terrain [Bern et al. \(1996\)](#).

En outre, les méthodes d'optimisation classiques en laboratoire peuvent être limitées par le nombre restreint de variables et de paramètres qui peuvent être pris en compte. Les fluides de forage sont complexes et composés de nombreux additifs, et il est souvent difficile de quantifier précisément l'impact de chaque composant sur les performances globales du fluide. Cela rend difficile l'optimisation précise des compositions et des paramètres des fluides de forage en utilisant uniquement des méthodes conventionnelles en laboratoire.

En somme, bien que les méthodes d'optimisation classiques en laboratoire aient été utilisées pendant de nombreuses années avec succès, elles présentent certaines limitations qui peuvent limiter leur efficacité et leur applicabilité dans des situations complexes. L'introduction de méthodes d'optimisation basées sur l'IA offre de nouvelles opportunités pour surmonter ces limitations et améliorer l'efficacité et la précision de l'optimisation des fluides de forage.

Méthodes d'optimisation d'IA :

Les méthodes d'optimisation des fluides de forage basées sur l'intelligence artificielle (IA) offrent de nouvelles perspectives pour améliorer l'efficacité et la précision de l'optimisation des fluides de forage. L'IA permet d'exploiter de vastes ensembles de données et d'utiliser des algorithmes avancés pour analyser et comprendre les relations complexes entre les composants des fluides de forage, les propriétés de la formation géologique et les performances du fluide. Cela permet aux chercheurs et aux ingénieurs de formuler des recommandations optimales pour la composition et les paramètres des fluides de forage [Agwu et al. \(2018\)](#).

Une approche innovante dans l'optimisation des fluides de forage basée sur l'IA consiste à utiliser des modèles prédictifs qui apprennent à partir de données historiques. Ces modèles sont formés en utilisant des techniques d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond, qui permettent de découvrir des schémas et des tendances cachés dans les données. En utilisant ces modèles, il est possible de prédire les

performances des fluides de forage en fonction des différents paramètres et de générer des recommandations pour l'optimisation [Noshi & Schubert \(2018\)](#).

Une autre méthode utilisée dans l'optimisation des fluides de forage basée sur l'IA est l'utilisation d'algorithmes d'optimisation avancés tels que les algorithmes génétiques et les algorithmes évolutifs. Ces algorithmes permettent d'explorer efficacement l'espace des solutions et de trouver les combinaisons optimales de composants et de paramètres des fluides de forage. Ils peuvent également être utilisés pour ajuster les paramètres en temps réel pendant les opérations de forage, ce qui permet une optimisation continue et adaptative [Solanki et al. \(2022\)](#).

Enfin, l'IA offre également des possibilités de surveillance et de contrôle en temps réel des performances des fluides de forage. Des capteurs et des dispositifs de surveillance peuvent collecter en temps réel des données sur les propriétés des fluides de forage et les conditions du puits. Ces données sont ensuite analysées en utilisant des techniques d'IA pour détecter les problèmes potentiels, prévoir les tendances futures et recommander des ajustements pour optimiser les performances.

En conclusion, les méthodes d'optimisation des fluides de forage basées sur l'IA ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer l'efficacité, la précision et la durabilité des opérations de forage. Elles permettent d'exploiter le potentiel des données et des algorithmes avancés pour prendre des décisions plus éclairées en matière de composition et de paramètres des fluides de forage. Ces approches prometteuses peuvent contribuer à réduire les coûts, à améliorer la productivité et à réduire l'impact environnemental des opérations de forage.

1.2 Les problèmes rencontrés :

Les processus actuels d'optimisation des formulations de fluides de forage sont limités en raison de leur simplicité et du manque de stratégies de recherche appropriées pour relever des défis complexes. Le résultat est qu'il est impossible d'obtenir une formulation idéale répondant à la fois aux exigences techniques et économiques. Il ne peut donc pas minimiser les coûts de formulation tout en garantissant une efficacité

optimale sur site. Des approches stratégiques plus avancées sont nécessaires pour parvenir à une véritable optimisation et produire des fluides de forage répondant aux exigences techniques tout en optimisant les coûts associés à leur utilisation sur le site de forage. Parmi les problèmes rencontrés, on peut citer :

- La procédure d’optimisation des formulations des fluides de forage est souvent coûteuse au niveau du laboratoire, en raison de la nécessité de mener de multiples tests et analyses approfondies. Chaque formulation candidate doit être évaluée en fonction de ses propriétés physiques, chimiques et rhéologiques, afin de déterminer son adéquation aux exigences spécifiques du forage.

Les expérimentations en laboratoire peuvent se révéler compliquées et exiger un investissement considérable en temps. Ils impliquent généralement des mesures de densité, de viscosité, de filtration, de compatibilité avec les formations géologiques, ainsi que des évaluations de la stabilité thermique et de la capacité à suspendre les déblais de forage. De plus, des tests de performance sont souvent nécessaires pour évaluer l’efficacité de la boue dans le contrôle de la pression et la stabilité du puits. Ces procédures de laboratoire sont coûteuses en termes de ressources, de temps et de matériel.

- Lors du processus d’optimisation des formulations des fluides de forage, les laborantins effectuent de nombreuses tentatives pour parvenir à la formulation optimale. Cela signifie qu’ils sont souvent exposés de manière prolongée à divers produits chimiques utilisés dans ces formulations.

Cette exposition fréquente et prolongée aux produits chimiques peut entraîner des problèmes de santé. Les produits chimiques utilisés dans les fluides de forage peuvent être potentiellement toxiques, corrosifs ou irritants.

- La procédure d’optimisation des formulations des fluides de forage nécessite l’utilisation de logiciels de calcul sophistiqués. Cependant, ces logiciels sont souvent coûteux car ils sont fournis par les fabricants des produits chimiques utilisés dans les formulations. Malheureusement, certains de ces fabricants exigent des frais excessifs, ce qui représente une contrainte financière pour

les entreprises du secteur. Un témoignage de la société DFSP (Drilling Fluids Services aux Puits), par exemple, met en évidence les montants exorbitants demandés par certains fabricants de produits chimiques pour l'utilisation de leurs logiciels de calcul. Ces coûts élevés peuvent entraver la capacité des entreprises à effectuer une optimisation efficace des formulations des fluides de forage, limitant ainsi leur capacité à atteindre les résultats optimaux sur le plan technique et économique.

- L'utilisation de logiciels externes pour l'optimisation des formulations des fluides de forage soulève une préoccupation majeure liée à la confidentialité des données de forage pétrolier en Algérie. En effet, le recours à ces logiciels implique de partager des informations sensibles et précieuses avec des acteurs et des institutions situés en dehors du pays. Cette situation peut présenter des risques potentiels en termes de sécurité des données et de souveraineté nationale.

Les données de forage contiennent des informations stratégiques sur les réserves d'hydrocarbures, la géologie et les conditions du sous-sol algérien, qui sont des éléments clés pour l'industrie pétrolière.

La divulgation involontaire ou non autorisée de ces données à des tiers étrangers pourrait compromettre la position concurrentielle de l'Algérie sur le marché mondial de l'énergie. De plus, cela pourrait entraîner une perte de contrôle sur les informations stratégiques et limiter la capacité du pays à prendre des décisions éclairées dans le domaine de l'exploration et de l'exploitation des ressources pétrolières.

Chapitre 2

Présentation du projet

2.1 L'idée de projet (la solution proposée)

Afin de remédier aux problèmes mentionnés précédemment, nous avons conçu une solution innovante : un procédé d'optimisation virtuel basé sur l'intelligence artificielle. Cette solution sera proposée sous la forme d'un service logiciel (SaaS - Software as a Service) et elle se décompose en trois blocs (systèmes) de base, avec d'autres systèmes d'authentification et de gestion de licences. :

- **Système 1 : Calculateur de boue au niveau du laboratoire (Laboratory Mud Calculator)** Ce système constitue le socle de notre solution, permettant d'effectuer les calculs de base nécessaires à la préparation des formulations à tester. Il fournit les informations essentielles requises pour les étapes suivantes.
- **Système 2 : Laboratoire virtuel (Virtual Laboratory)** Le laboratoire virtuel (VL) représente le cœur de notre solution. Grâce à l'intelligence artificielle que nous avons développée, il fonctionne comme un simulateur avancé des tests de laboratoire. Il est capable de prédire avec précision les résultats des tests standards API, éliminant ainsi la nécessité de réaliser des tests physiques en laboratoire.
- **Système 3 : Optimiseur de fluides de forage (Drilling Fluids Optimizer)** L'optimiseur de fluides de forage (DFO) est un programme spécialement conçu

pour automatiser les processus d'optimisation. Il utilise des stratégies adaptées aux problèmes complexes liés aux fluides de forage, permettant de guider la recherche des meilleures formulations en tenant compte des paramètres techniques et économiques.

Grâce à notre solution AI-SaaS, les utilisateurs bénéficient d'un ensemble complet d'outils pour optimiser les formulations des fluides de forage en termes de spécifications techniques et de coût de revient. Ils peuvent effectuer des calculs précis et prévoir les résultats des tests de laboratoire

En outre, notre méthode permet d'économiser du temps et des ressources en évitant la nécessité de mener de nombreux tests physiques en laboratoire. De plus, notre solution est dotée d'une interface utilisateur conviviale, garantissant ainsi une utilisation intuitive et simple.

Pour récapituler, notre solution AI-SaaS transforme fondamentalement le processus d'optimisation des fluides de forage en intégrant l'intelligence artificielle à chaque phase. Elle propose une méthode plus rapide, plus précise et plus économique pour parvenir à des formulations optimales, tout en diminuant les risques liés aux tests en laboratoire.

2.2 Les Valeurs proposées :

2.2.1 Calculateur de boue de laboratoire (Lab Mud Calculator)

Le Lab Mud Calculator (LMC) a été développé pour résoudre les problèmes associés aux logiciels de calcul actuellement utilisés dans l'industrie des fluides de forage. Ces logiciels sont souvent dépendants des formules fournies par les producteurs de produits chimiques, ce qui leur confère un pouvoir de domination sur le marché et entraîne des prix exagérés.

Dans cette étude, nous avons créé le Laboratory Mud Calculator (LMC) en utilisant une nouvelle approche intégrant l'intelligence artificielle et basée sur des méthodes d'ingénierie inverse (reverse engineering). Cette approche nous permet de générer

des calculs précis sans recourir à des formules spécifiques basées sur la composition chimique du produit.

Les valeurs ajoutées LMC :

1. Notre LMC se distingue par son excellent rapport qualité-prix, proposant une solution de calcul des fluides de forage à un coût nettement plus abordable que les logiciels existants. Grâce à une démarche de développement novatrice et efficace, nous avons réussi à réduire les dépenses associées à la conception, à la maintenance et à la mise à jour de notre outil. En conséquence, nous sommes en mesure de proposer des tarifs compétitifs et abordables pour répondre aux besoins des entreprises de l'industrie pétrolière. Notre objectif est de rendre l'optimisation des formulations des fluides de forage plus accessible financièrement, tout en fournissant des fonctionnalités avancées et des résultats précis. Avec notre solution LMC, les utilisateurs peuvent obtenir un excellent retour sur investissement, maximisant ainsi leur efficacité opérationnelle sans compromettre leur budget.
2. Afin de répondre aux exigences spécifiques des entreprises, notre Laboratory Mud Calculator (LMC) sera proposé sous forme de logiciel de bureau et sous forme SaaS. Cela garantit que les données sensibles des entreprises sont stockées et traitées localement, offrant ainsi une plus grande sécurité et répondant aux réglementations en vigueur.
3. Selon les besoins de chaque entreprise, nous proposerons notre LMC soit en tant qu'une solution séparée de la solution globale AI SaaS, sous la forme d'un logiciel de bureau avec licence, ou comme une partie intégrante de l'ensemble de la solution AI SaaS. Cette flexibilité nous permet de répondre aux différentes exigences et préférences des entreprises, en leur offrant la possibilité de choisir l'option qui correspond le mieux à leurs besoins spécifiques. Qu'il s'agisse d'utiliser notre LMC de manière indépendante pour les besoins de calcul des formulations de fluides de forage, ou de l'intégrer dans notre solution complète, nous sommes en mesure de fournir une solution adaptée et personnalisée pour

chaque entreprise.

2.2.2 Laboratoire virtuel (Virtual Laboratory)

Le laboratoire virtuel (VL) a été développé dans le but de prédire les résultats des tests de laboratoire, ce qui présente plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, il permet de réduire considérablement le nombre de tests physiques requis, ce qui se traduit par des économies de coûts importantes. En évitant la nécessité de réaliser de multiples tests, les entreprises peuvent économiser du temps et des ressources précieuses.

De plus, l'utilisation du VL permet de minimiser l'exposition prolongée des laborantins aux produits chimiques utilisés dans les formulations de fluides de forage. Les laborantins sont moins exposés aux risques pour leur santé, tels que les irritations cutanées, les allergies et les problèmes respiratoires

Ses valeurs ajoutées

- **Réduction des coûts** : Notre solution permet aux entreprises de réduire considérablement leurs dépenses en réduisant le nombre de test physique et en évitant d'investir dans des logiciels coûteux et des infrastructures informatiques complexes.
- **Gain de temps** : Grâce à notre solution prête à l'emploi, les entreprises de fluides de forage peuvent économiser un temps précieux en réduisant le nombre de formulation à faire au laboratoire
- **Réduction des risques et de l'exposition chimique** : En prédisant les résultats des tests de laboratoire, notre solution permet de réduire le nombre de tests nécessaires, ce qui entraîne une exposition minimale des laborantins aux produits chimiques et une réduction des risques associés.
- **Confidentialité des données** : La possibilité d'héberger le Laboratoire Virtuel (VL) sur des serveurs locaux offre un avantage significatif en termes de confidentialité et de sécurité des données pour les entreprises. Cette approche

permet de répondre aux préoccupations liées à la divulgation d'informations sensibles, notamment pour les entreprises qui attachent une grande importance à la protection de leurs données.

2.2.3 Optimiseur de fluides de :

L' Optimiseur de fluides de forage" **DFOforage Drilling Fluids Optimizer!** (**forage Drilling Fluids Optimizer!**)(forage Drilling Fluids Optimizer)" a été développé dans le but d'intégrer une stratégie de recherche intelligente pour optimiser les formulations complexes des fluides de forage. Grâce à cette approche, nous parvenons à obtenir une formulation optimisée qui offre à la fois des performances améliorées des fluides et un coût de revient optimal.

Pour parvenir à cela, nous avons mis en évidence notre DFO en utilisant des algorithmes intelligents d'optimisation, tels que les métaheuristiques. Ces algorithmes utilisent une fonction de coût, qui est basée sur les résultats fournis par le bloc VL (Virtual Laboratory) ainsi que sur le coût de la formulation elle-même. En utilisant ces informations, le DFO est capable de guider la recherche des meilleures formulations, en prenant en compte à la fois les performances techniques et les aspects économiques.

En résumé, le DFO est conçu pour utiliser des algorithmes d'optimisation intelligents afin d'obtenir des formulations de fluides de forage optimisées sur le plan des performances et des coûts. Cette approche permet d'améliorer les résultats finaux et de maximiser l'efficacité des opérations de forage.

Ses valeurs ajoutées

- **La réduction des coûts**
- **le gain de temps**
- **l'adaptabilité et la flexibilité**
- **l'amélioration de la qualité et de la performance**
- **la confidentialité et la sécurité des données**

2.3 L'équipe

L'équipe de recherche impliquée dans ce projet est constituée de deux élèves ingénieurs, à savoir Hamidi Aymen et Medjhoud M'hamed, ainsi que de deux encadreurs, à savoir le Professeur Akkal Rezki de l'ENP et le Docteur Khodja Mohammed de l'IAP.

- Le Professeur Akkal Rezki, diplômé de l'École polytechnique, a obtenu son doctorat dans le domaine pétrolier avec une spécialisation dans les formulations des fluides de forage à base d'émulsion inverse eau-dans-huile et leur impact sur l'endommagement de la roche réservoir. Ses travaux de recherche ont été publiés dans des revues de renom et il a été invité à intervenir lors de conférences prestigieuses telles que l'association américaine AADE et l'ingénierie des réservoirs à l'Université de Leoben en Autriche en 2008. Outre son expertise dans ce domaine, il possède également des compétences en intelligence artificielle. En tant que professeur, il dispense des cours sur l'IA, les diagraphies pétrolières et la géophysique.
- Le Docteur Khodja Mohamed, qui a occupé le poste de directeur de recherche au sein de la division recherche du centre CDR Sonatrach, occupe actuellement le poste de directeur de recherche à l'Institut IAP de Boumerdes. Il a réalisé de nombreuses études et recherches publiées sur les formulations des fluides de forage et leurs interactions avec les roches réservoirs contenant du pétrole ou du gaz.
- L'élève ingénieur Hamidi Aymen a suivi son parcours d'études à l'ENP, où il a commencé par une formation générale avant de se spécialiser en Génie Minier. Il a démontré une grande compétence dans le domaine de l'IA, ainsi que dans les domaines de la géophysique et de la diagraphie. Ces deux derniers domaines sont pertinents dans de nombreuses spécialités, en particulier dans l'industrie pétrolière.
- L'élève ingénieur Medjhoud M'hamed a poursuivi son parcours d'études à l'ENP, débutant par une formation générale avant de se spécialiser en Génie Minier. Il

a démontré une grande compétence dans les domaines de l'IA, de la chimie, de la géophysique et de la diagraphie. Ces deux derniers domaines sont pertinents dans de nombreuses spécialités, notamment dans l'industrie pétrolière.

Les encadreurs jouent un rôle crucial dans l'encadrement de ces deux élèves-ingénieurs, les guidant vers une expertise approfondie dans le domaine pétrolier, en particulier en ce qui concerne la formulation et l'optimisation des fluides de forage. start-up de développer une application IA pour les simulations des propriétés des fluides de forage, en utilisant des techniques d'apprentissage automatique (machine learning) ou d'apprentissage profond (deep learning). Le superviseur veille à ce que les objectifs définis pour le projet soient atteints et apporte conseils et compétences tout au long du processus.

2.3.1 Le rôle des élèves ingénieurs :

Le rôle d'Hamidi Aymen, élève-ingénieur, est de se focaliser sur le volet de l'intelligence artificielle en développant une application capable de simuler les fluides de forage formulés au sein d'une entreprise pétrolière située à Hassi Messaoud, au sud de l'Algérie. Cette application reposera sur une base de données historique contenant les formulations de fluides de forage élaborées par le passé. Son objectif principal est de permettre une analyse précise et des simulations des propriétés des fluides de forage en utilisant des techniques d'intelligence artificielle telles que l'apprentissage automatique (machine learning) pour optimiser ces formulations. Cette démarche vise à améliorer l'efficacité des opérations de forage et à faciliter la prise de décisions éclairées en matière de formulation des fluides de forage.

Le rôle essentiel de MEDJHOUD M'hamed consiste à mettre l'accent sur le domaine de la chimie dans le contexte de l'analyse des fluides de forage. Son objectif premier est d'approfondir notre compréhension des enjeux liés à ces fluides au sein des formations géologiques. En résumé, son rôle consiste à explorer en profondeur la chimie des fluides de forage, à en comprendre les enjeux pour les formations géologiques, et à formuler des recommandations et des solutions innovantes pour améliorer les pratiques de forage

et l'exploitation des ressources énergétiques de manière efficace.

2.4 Les Objectifs du projet et la part du marché :

2.4.1 Les objectifs tracés :

Avant d'examiner nos objectifs financiers, commençons par explorer les objectifs techniques qui constitueront la base de la génération de revenus et de l'atteinte de la rentabilité.

1. Optimiser les formulations de fluides de forage :
 - Notre objectif principal réside dans l'utilisation de notre propre solution pour optimiser les formulations des fluides de forage des clients ciblés. Nous visons à optimiser la performance opérationnelle tout en minimisant les coûts liés à ces formulations.
2. Prédire les résultats de laboratoire avec précision :
 - Notre objectif est de créer un laboratoire virtuel alimenté par l'apprentissage automatique (ML) afin de prédire de manière précise les résultats des tests de laboratoire en se basant sur les formulations passées. Cette capacité de prédiction fiable permettra d'éviter de recourir à des tests physiques coûteux et longs.
3. Faciliter l'utilisation de notre solution :
 - Une autre approche consiste à mettre en avant la convivialité de l'interface utilisateur (UI) de notre solution, de manière à ce que les équipes, qu'elles opèrent en laboratoire ou sur le terrain, puissent appliquer nos prédictions et nos calculs de manière rapide et aisée.
4. Sécuriser nos données et nos formulations :
 - Nous attachons une importance particulière à la sécurité de nos données sensibles et de nos formulations, en tenant compte du principe que les données des clients ciblés doivent être sécurisées de manière optimale. En suivant les meilleures pratiques en matière de sécurité informatique, nous veillons à la

protection de notre propriété intellectuelle et au maintien de la confidentialité de nos informations.

5. Déployer en production avec fiabilité :

- Notre priorité est de garantir que notre laboratoire virtuel et nos fonctionnalités d'optimisation sont prêts pour une utilisation en production, avec une gestion efficace des modèles ML en temps réel, des mises à jour fluides et une surveillance continue.

6. Atteindre des niveaux élevés de performance et de précision :

- Nous cherchons à atteindre des niveaux exceptionnels de performance, tant en termes de rapidité de calcul des formulations que de précision dans la prédiction des résultats de laboratoire. Ceci dans le but d'améliorer l'efficacité de nos opérations sur le terrain.

7. Former et soutenir nos utilisateurs :

- Nous fournissons une formation approfondie à nos utilisateurs sur l'utilisation de notre solution et nous offrons un support technique de haute qualité pour résoudre les problèmes et répondre à leurs questions.

Cependant, en ce qui concerne les objectifs financiers, ils sont les suivants :

1. Augmentation des Revenus :

— L'objectif principal est de générer des revenus stables et croissants grâce à la vente de notre solution, en utilisant l'un des modèles économiques mentionnés ci-dessous.

2. Rentabilité :

— Atteindre un niveau de rentabilité où les revenus excèdent les coûts de développement, d'exploitation et de support de la solution.

3. Rentabilité à long terme :

— Notre objectif est d'atteindre une rentabilité à long terme en établissant une clientèle fidèle et en persévérant dans notre démarche innovante pour maintenir notre compétitivité sur le marché.

4. **Partenariats stratégiques :**

- Nous cherchons à explorer des partenariats stratégiques avec d'autres entreprises de l'industrie afin de favoriser la croissance de nos revenus grâce à des collaborations mutuellement avantageuses.

5. **Expansion internationale :**

- Si cela s'avère pertinent pour notre solution, nous envisageons d'étendre notre présence sur les marchés internationaux dans le but d'accroître notre clientèle et nos revenus.

Pour progresser vers la réalisation de ces objectifs au fil du temps, voici une variété de modèles économiques qui peuvent être ajustés pour concrétiser ces aspirations :

1. **Modèle SaaS (Software as a Service) :**

- Nous proposons notre solution sous forme d'abonnement, où les clients souscrivent périodiquement pour accéder à nos services en ligne. Cela peut englober divers niveaux d'abonnement en fonction des fonctionnalités et de la capacité d'utilisation.

2. **Licence logicielle :**

- Nous proposons la vente de licences d'utilisation perpétuelles de notre logiciel à nos clients, leur offrant ainsi la possibilité de l'installer sur leurs propres infrastructures.

3. **Modèle de services :**

- Nous proposons des services de consultation et de support technique pour aider les clients à optimiser l'utilisation de notre solution. La Facturation de ces services en fonction du temps ou des projets.

2.4.2 **La part du marché**

En tant que nouvelle startup, notre part de marché dépendra de notre capacité à croître et à évoluer au fil du temps. Notre succès sera mesuré par notre potentiel de développement continu, notre adaptation aux besoins changeants du marché et notre capacité à fidéliser les clients grâce à des innovations constantes.

Le Marché des fluides de forage :

Les fluides de forage jouent un rôle vital dans l'industrie pétrolière et gazière, étant cruciaux pour extraire les hydrocarbures. Cette analyse sectorielle s'articule autour de deux axes distincts : le marché algérien, qui couvre le territoire national, et le marché international, qui englobe une portée mondiale.

Marché national (Algérie) :

1. **Importance dans l'industrie** : L'industrie pétrolière et gazière algérienne est un moteur économique essentiel. Les fluides de forage jouent un rôle vital dans les activités d'exploration et de production, contribuant ainsi de manière significative à l'économie nationale.
2. **Demande croissante** : En Algérie, la demande de fluides de forage connaît une expansion notable, alimentée par la quête de nouvelles réserves et l'amélioration des processus d'extraction existants.
3. **Concurrence locale** : Le marché est concurrentiel localement, cependant, notre solution se distingue par sa technologie avancée.
4. **Partenariats potentiels** : Des partenariats avec des entreprises algériennes peuvent renforcer notre présence sur ce marché.

Marché International :

1. **Demande mondiale** : À l'échelle mondiale, la demande de fluides de forage reste élevée, avec une utilisation dans de nombreux pays producteurs de pétrole et de gaz.
2. **Potentiel d'exportation** : Notre solution a un potentiel d'exportation vers d'autres marchés pétroliers et gaziers, offrant ainsi des opportunités de croissance à l'échelle internationale.
3. **Innovation technologique** : La technologie avancée de notre solution peut attirer l'attention sur le marché international. Notre capacité à offrir des solutions de pointe pour l'optimisation des fluides de forage grâce à l'intelligence artificielle

et à l'apprentissage automatique pourrait nous positionner favorablement pour pénétrer les marchés mondiaux. L'efficacité et la précision accrues que nous apportons au processus de formulation des fluides de forage pourraient susciter un intérêt considérable de la part des entreprises pétrolières et gazières du monde entier à la recherche de solutions innovantes pour améliorer leurs opérations. Cela pourrait potentiellement ouvrir des opportunités d'expansion et de croissance significatives pour notre startup.

- 4. Contribution à la durabilité :** À mesure que les préoccupations environnementales s'intensifient, notre solution peut jouer un rôle essentiel en aidant les entreprises à progresser vers des objectifs de durabilité. En fournissant des outils innovants pour optimiser l'utilisation des fluides de forage, nous contribuons à réduire l'impact environnemental des opérations pétrolières et gazières. Cette approche pourrait répondre à une demande croissante en matière de pratiques plus respectueuses de l'environnement, renforçant ainsi notre position sur le marché.

il est important de préciser que l'estimation de la part de marché est un processus complexe et dépend de plusieurs facteurs, notamment la concurrence, la demande du marché, la capacité de production, la qualité du produit et la réputation de l'entreprise. L'estimation de la part de marché peut être basée sur des analyses de marché approfondies, des études de faisabilité, des prévisions de la demande et des tendances du marché. Ces informations permettent d'évaluer la part de marché potentielle que notre Startup peut atteindre avec son produit ou son service.

Il convient de noter que l'objectif de cette initiative est de capturer une part de marché significative en offrant une solution innovante et performante dans le domaine de la simulation des fluides de forage. Cependant, l'estimation précise de cette part de marché dépendra de l'acceptation et de l'adoption de l'application IA par les acteurs de l'industrie du forage.

2.5 Le planning de réalisation du projet

Pour concrétiser notre projet d'optimisation des fluides de forage basé sur l'intelligence artificielle, nous avons élaboré un plan détaillé que nous illustrons ci-dessous (Figure 2.1). Tout d'abord, la première version de notre modèle de machine learning (LMC) devrait être finalisée vers la mi-octobre 2023. Cette étape a nécessité un investissement significatif en temps, car elle implique le traitement des données fondamentales qui seront utilisées ultérieurement dans d'autres sections du projet.

Ensuite, nous prévoyons de mettre au point une version personnalisée du modèle de forage basé sur l'intelligence artificielle (VL) vers la fin de janvier 2024. En parallèle, nous travaillerons sur la première version de notre solution SaaS en intelligence artificielle (AI SaaS), que nous prévoyons de finaliser vers la fin d'avril 2024.

Une fois ces étapes techniques accomplies, nous prévoyons de lancer la commercialisation de notre produit au niveau national, avec une possible disponibilité à la fin de juillet 2024. Cependant, nous sommes conscients que la recherche de financements peut prendre un certain temps, notamment en ce qui concerne les exigences des organismes de financement. Par conséquent, nous entamerons cette étape de recherche d'investissements dès que possible.

La phase suivante de notre projet consistera à adapter notre solution basée sur l'IA pour répondre aux besoins de différents clients sur le marché national. Une fois que notre produit sera solidement établi sur le marché national, nous envisagerons d'étendre nos activités à l'échelle internationale. Ce processus de développement progressif vise à assurer le succès de notre projet d'optimisation des fluides de forage basé sur l'IA, en le faisant évoluer de manière réfléchie et méthodique. .

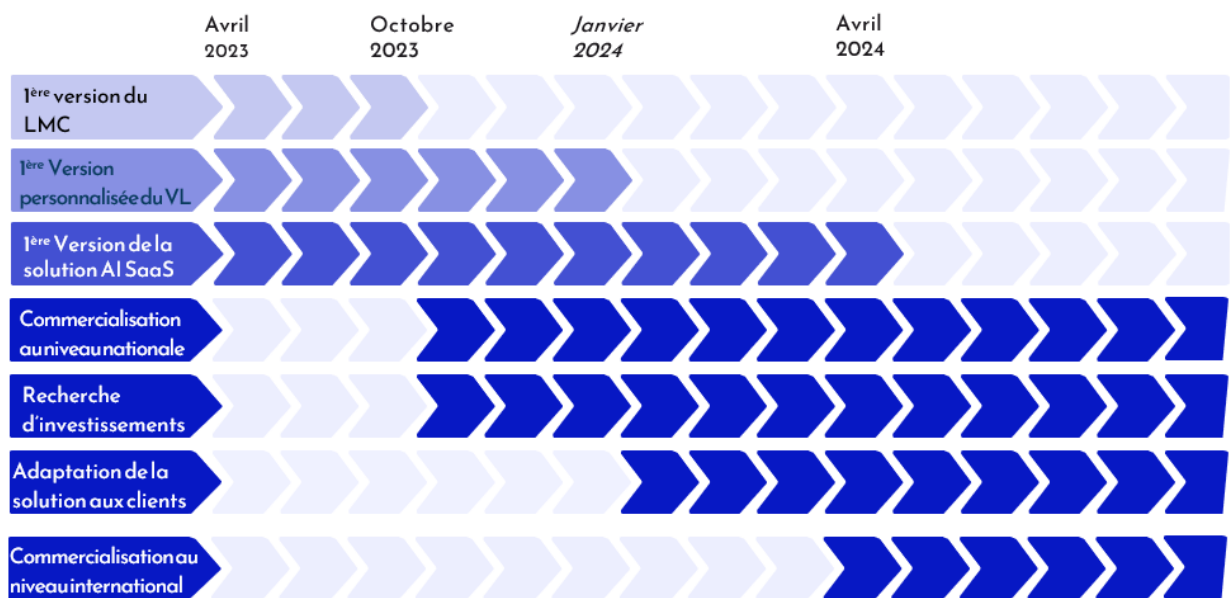


FIGURE 2.1 – Le plannig générale de notre stratup

Chapitre 3

Aspects innovants

3.1 La nature des innovations :

Il est nécessaire de définir la nature des innovations intégrées dans le projet, en se basant sur les suggestions fournies. Cela reflète l'incertitude du marché, qui est étroitement liée à l'incertitude technologique, comme illustré dans la figure ci-dessous (Figure 3.1).

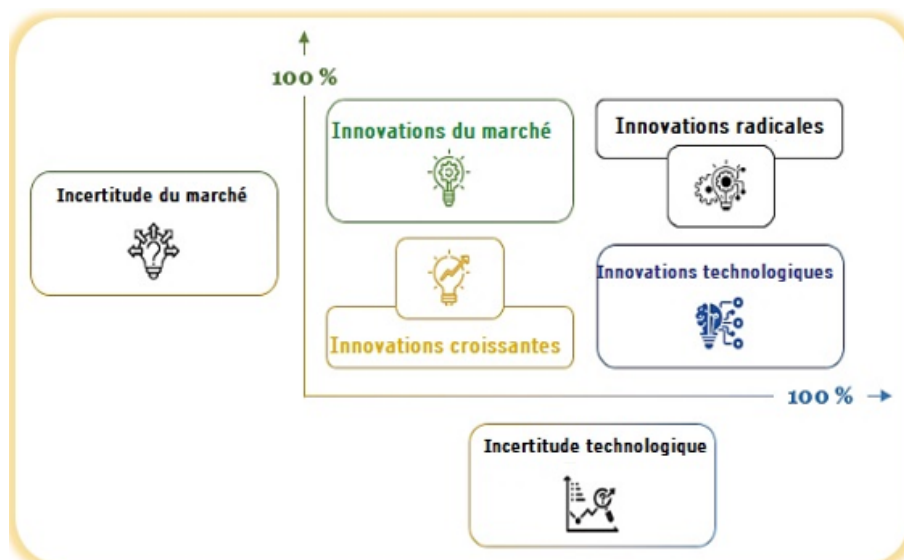


FIGURE 3.1 – La nature des innovations

3.1.1 Les innovations croissantes :

Les innovations croissantes dans ce projet se caractérisent par une progression constante des avancées technologiques et des améliorations apportées. Ils consistent notamment à l'amélioration des algorithmes d'intelligence artificielle qui sont continuellement améliorés pour accroître la précision des simulations des fluides de forage et les prédictions de leurs caractéristiques tels que les propriétés rhéologiques, les propriétés HTHP (haute température et haute pression) et les propriétés d'infiltration dans la roche réservoir. Ceci se fait en s'articulant et en développant des méthodes plus avancées et à intégrer de nouvelles techniques d'apprentissage automatique pour améliorer la performance globale de l'application. De plus, une innovation technologique importante dans cette application d'IA est la capacité à collecter et à utiliser en temps réel des données provenant des opérations de forage. Ces données sont essentielles pour comprendre les caractéristiques du réservoir, telles que les propriétés pétro-physiques, qui sont directement influencées par les fluides de forage utilisés. En collectant et en mettant à jour régulièrement de nouvelles ensembles de données, il est possible d'ajuster les simulations en fonction des conditions réelles sur le terrain, ce qui permet d'obtenir des résultats plus précis et actualisés [Agwu et al. \(2021\)](#).

Il faut également ajouter qu'une personnalisation et adaptation aux besoins spécifiques permet à cette innovation en plein essor de leur donner la capacité de personnaliser l'application d'IA en fonction des besoins spécifiques des entreprises et des opérations de forage. Cela peut inclure des fonctionnalités sur mesure, des modèles adaptés à des scénarios spécifiques et une interface conviviale pour faciliter l'utilisation par les professionnels du domaine.

3.1.2 Les innovations technologiques :

Les innovations technologiques dans ce contexte d'incertitude du marché et d'incertitude technologique sont axées sur l'adaptation et la flexibilité. Ceci peut comprendre les technologies de surveillance avancée qui sont développés pour collecter et analyser en temps réel des données provenant des opérations de forage et qui seront ensuite

la base d'une bonne analyse dans le sens de formuler des fluides plus adéquats en fonction des formations réservoirs traversées. Cela permet de détecter rapidement les tendances, les problèmes potentiels et les opportunités sur le marché, ce qui facilite une prise de décision plus éclairée et une meilleure gestion des risques [Desai et al. \(2021\)](#).

Des solutions de gestion spécifiques ont été développées dans le cadre de cette application d'IA pour répondre aux incertitudes du marché et techniques. Des outils sophistiqués et des modèles analytiques sont utilisés pour évaluer et prévoir les défis associés à ces incertitudes. Ces outils nous permettent d'identifier différents scénarios possibles, en tenant compte des évolutions du marché et des évolutions technologiques. Évaluez les risques potentiels associés à ces scénarios et les opportunités qui peuvent en découler. Cela permet aux parties prenantes de prendre des décisions plus éclairées, d'atténuer les impacts négatifs et de prendre des mesures proactives pour saisir les opportunités. Ces solutions de gestion des incertitudes aident les organisations à mieux se préparer aux évolutions du marché et de la technologie. Ils peuvent adapter leurs stratégies selon différentes possibilités et minimiser les risques liés à ces incertitudes. De plus, ces solutions vous permettent de capitaliser sur de nouvelles opportunités et de stimuler l'innovation et l'adaptation aux nouvelles tendances du marché [Füller et al. \(2022\)](#).

3.2 Les domaines d'innovation

3.2.1 Nouveaux processus :

Une innovation majeure dans le domaine des fluides de forage est l'application de l'intelligence artificielle (IA) pour optimiser les processus de formulation. Cette nouvelle application utilise des algorithmes avancés pour analyser les données et les paramètres spécifiques liés à la formulation des fluides de forage.

L'objectif principal de cette innovation est de minimiser les coûts de formulation tout en maximisant l'efficacité des opérations de forage. Grâce à l'utilisation de l'IA, il est possible d'effectuer des simulations précises et d'obtenir des recommandations

basées sur des données en temps réel. Cela permet de prendre des décisions éclairées et d'optimiser les mélanges de fluides de forage pour répondre aux besoins spécifiques du terrain. En optimisant les processus de formulation, cette innovation contribue à réduire les coûts associés aux fluides de forage, tels que l'achat des produits chimiques nécessaires et les pertes liées à des formulations inadéquates. De plus, en augmentant l'efficacité des opérations de forage, cette application permet d'accélérer les délais de production et de réduire les temps d'arrêt. Grâce à la précision élevée de cette application basée sur l'IA, les opérations de forage peuvent être réalisées avec une plus grande confiance et une meilleure maîtrise des risques. Les décisions prises sont fondées sur des données fiables et des modèles prédictifs, ce qui permet d'améliorer la performance globale du forage [Osamy et al. \(2022\)](#).

3.2.2 L'IA offre des services améliorés :

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine des fluides de forage représente une avancée majeure et une nouvelle fonctionnalité qui offre des produits et services améliorés. L'IA permet d'optimiser les processus de formulation des fluides de forage en exploitant de manière intelligente les données disponibles et en utilisant des algorithmes sophistiqués. Grâce à l'IA, il est possible de développer des formulations de fluides de forage plus efficaces, adaptées aux conditions spécifiques de chaque puits de forage. L'IA analyse les caractéristiques géologiques et pétrophysiques du puits, les propriétés des fluides existants et les objectifs spécifiques de forage. En combinant ces informations avec une base de connaissances étendue, l'IA peut recommander les compositions et les paramètres optimaux pour le fluide de forage, en maximisant la productivité tout en minimisant les coûts et les risques environnementaux. Une autre fonctionnalité apportée par l'IA est la capacité à prédire et à prévenir les problèmes potentiels liés aux fluides de forage. L'IA peut analyser en temps réel les données de forage, telles que les paramètres de pression, de débit et de température, ainsi que les données géophysiques et géochimiques, afin d'identifier les anomalies et les tendances. En détectant les signaux précurseurs de problèmes, tels que la perte de circulation ou la contamination du fluide, l'IA peut alerter les opérateurs et recommander des actions

correctives pour minimiser les perturbations et assurer la continuité des opérations de forage [Ahmadi et al. \(2018\)](#).

3.2.3 L'IA offre de Nouveaux clients :

L'application de l'intelligence artificielle (IA) pour prédire des fluides de forage performants offre de nouvelles opportunités de croissance en attirant de nouveaux clients. Grâce à l'IA, il est possible de développer une gamme habituelle de produits ou de services, mais avec une précision et une adaptation accrues aux besoins spécifiques des nouveaux segments de clientèle. En utilisant des modèles d'apprentissage automatique et des algorithmes avancés, l'IA peut analyser les données historiques des clients représentés par les compagnies des fluides de forage, les caractéristiques géologiques et les conditions de forage pour prédire les compositions des fluides de forage les plus performants. Cela permet de répondre aux exigences spécifiques des nouveaux clients, qu'il s'agisse de forages en eaux profondes, de forages directionnels ou de forages dans des formations géologiques complexes. L'IA permet également d'optimiser les formulations des fluides de forage en fonction des préférences et des contraintes des nouveaux clients [Solanki et al. \(2022\)](#).

En tenant compte des paramètres tels que la viscosité, la densité, la stabilité thermique et la compatibilité avec les formations géologiques, l'IA peut recommander les compositions optimales des fluides de forage pour maximiser la performance du forage tout en réduisant les coûts et les risques. Ainsi, en utilisant l'IA pour prédire et fournir des fluides de forage performants pour les nouveaux clients, les entreprises peuvent étendre leur gamme de produits ou de services et atteindre de nouveaux segments de clientèle. Cela permet de répondre aux besoins spécifiques de ces nouveaux clients et de renforcer leur satisfaction, leur fidélité et leur confiance dans l'entreprise.

3.2.4 L'intelligence artificielle assure l'acquisition de nouveaux clients :

L'application de l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine des fluides de forage présente de grandes opportunités pour attirer de nouveaux clients. En utilisant des techniques d'IA avancées, il est possible d'offrir une gamme habituelle de produits ou de services, mais avec une valeur ajoutée significative pour les nouveaux segments de clientèle.

L'une des principales forces de l'IA dans les fluides de forage réside dans sa capacité à analyser de grandes quantités de données provenant de multiples sources, telles que les caractéristiques géologiques, les données opérationnelles, les historiques de forage, et même les retours d'expérience des clients. En exploitant ces données, l'IA peut identifier des schémas, des tendances et des corrélations qui permettent de comprendre les besoins spécifiques des nouveaux segments de clientèle [Xue & Xue \(2020\)](#).

L'IA peut également être utilisée pour développer des modèles prédictifs qui aident à anticiper les besoins futurs des clients et à recommander les produits ou services les mieux adaptés. Par exemple, en utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique, l'IA peut prédire les types de fluides de forage les plus appropriés pour différentes conditions géologiques et opérationnelles. Cela permet de proposer des solutions sur mesure et d'optimiser les performances du forage tout en réduisant les coûts. De plus, l'IA peut faciliter la personnalisation des produits ou services en fonction des préférences individuelles des clients. En analysant les données des clients, l'IA peut identifier les besoins spécifiques, les exigences particulières et les contraintes opérationnelles de chaque client, ce qui permet de proposer des solutions sur mesure qui répondent à leurs attentes [Campbell et al. \(2020\)](#).

L'application de l'IA dans les fluides de forage offre la possibilité d'attirer de nouveaux clients en proposant une gamme de produits ou de services adaptés à leurs besoins spécifiques. En exploitant les capacités prédictives et personnalisées de l'IA, les entreprises peuvent gagner en compétitivité sur le marché en offrant des solutions innovantes, efficaces et rentables, ce qui constitue un avantage considérable pour attirer et fidéliser de nouveaux clients.

3.2.5 Offre de produits innovants :

L'intelligence artificielle (IA) joue un rôle essentiel dans la création de nouvelles offres de produits innovants dans le domaine des fluides de forage. Voici quelques explications sur la manière dont l'IA permet de générer de nouvelles offres [Gooneratne et al. \(2020\)](#); [Solanki et al. \(2022\)](#) :

- Analyse des données :

L'IA peut analyser de vastes ensembles de données provenant de différentes sources, notamment des données géologiques, des données opérationnelles et des données de performance des produits existants. En utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique, l'IA peut identifier des tendances, des modèles et des relations cachées dans ces données. Cette analyse approfondie permet de découvrir de nouvelles opportunités et d'identifier des besoins non satisfaits dans le marché des fluides de forage.

- Exploration de solutions alternatives :

Grâce à l'IA, il est possible d'explorer des solutions alternatives en utilisant des modèles de simulation et des algorithmes d'optimisation. Par exemple, l'IA peut générer des simulations virtuelles de fluides de forage innovants en combinant différentes propriétés chimiques et physiques. Ces simulations permettent d'évaluer rapidement les performances des nouveaux produits et de déterminer leur potentiel d'innovation.

- Préviation des tendances du marché :

L'IA peut également être utilisée pour prévoir les tendances du marché et anticiper les besoins futurs des clients. En analysant les données des clients, les données économiques et les données du marché, l'IA peut identifier les évolutions et les demandes émergentes. Cette anticipation permet aux entreprises de développer des produits innovants en phase avec les attentes changeantes des clients.

- Collaboration avec les utilisateurs :

L'IA facilite la collaboration entre les experts du domaine des fluides de forage

et les utilisateurs finaux. En utilisant des techniques d'IA telles que le traitement du langage naturel et les interfaces conversationnelles, les entreprises peuvent recueillir les retours d'expérience des utilisateurs et les intégrer dans le processus de développement de nouveaux produits. Cette collaboration active permet de concevoir des produits innovants qui répondent précisément aux besoins des utilisateurs.

En combinant ces différentes capacités, l'IA permet de générer de nouvelles offres de produits innovants dans le domaine des fluides de forage. Les entreprises peuvent ainsi proposer des solutions qui améliorent l'efficacité, la performance et la durabilité des opérations de forage. Ces nouvelles offres apportent une réelle valeur ajoutée aux clients, renforcent la compétitivité de l'entreprise sur le marché et stimulent l'innovation continue dans le secteur des fluides de forage.

Chapitre 4

Analyse stratégique du marché

4.1 Le segment du marché

4.1.1 Le marché potentiel :

Le marché potentiel pour l'IA dans les fluides de forage se compose d'un groupe d'individus ou d'institutions qui sont intéressés par l'utilisation de nos produits ou services pour répondre à leurs besoins spécifiques. Pour comprendre ce marché potentiel, il est important de se poser quelques questions clés :

— **Qui achète nos produits ?**

Il s'agit d'identifier les acteurs clés dans l'industrie des fluides de forage qui sont susceptibles d'être intéressés par l'application de l'IA. Cela peut inclure des sociétés pétrolières et gazières, des entreprises de services de forage, des laboratoires de recherche et d'autres parties prenantes du secteur. Ces institutions sont souvent confrontées à des défis complexes tels que l'optimisation des performances de forage, la réduction des coûts, l'amélioration de la sécurité et la gestion des risques. L'IA offre des solutions innovantes pour répondre à ces défis et permet d'offrir des produits et des services améliorés.

Pour notre cas avec ces produits et services que nous visons entrer le marché avec eux, les **sociétés des fluides de forage** et **celles de forage** au niveau nationales et internationales sont notre clients cibles [Macpherson et al. \(2013\)](#);

Agwu et al. (2021).

— **Qu'est-ce qui les a motivés à le faire ?**

Comprendre les motivations des acheteurs potentiels est essentiel pour adapter nos produits et services à leurs besoins. Il est important de comprendre leurs besoins spécifiques, ainsi que les contraintes et les réglementations auxquelles elles sont soumises. Cela nous permet de développer des solutions adaptées à leur environnement opérationnel et de créer une proposition de valeur solide. Cela peut inclure des motivations telles que l'amélioration de l'efficacité des opérations de forage, la réduction des coûts, l'amélioration de la sécurité ou la recherche de solutions plus durables et respectueuses de l'environnement.

— **Où sont-ils situés ?**

Il est important de connaître la localisation géographique des acheteurs potentiels afin de pouvoir cibler nos activités de marketing et de vente de manière efficace. Cela peut inclure des régions spécifiques où l'industrie des fluides de forage est active, comme les principaux bassins pétroliers et gaziers.

En Algérie, nous avons Hassi Messoud, Hassi Rmel et Ain Aminas.

— **Combien sont-ils ?**

Estimer la taille du marché potentiel est essentiel pour évaluer les opportunités et le potentiel de croissance. Cela peut être basé sur des données de l'industrie, des rapports de marché, des études de marché ou des estimations du nombre d'entreprises opérant dans le secteur.

Au niveau national il y a une dizaine de sociétés de services spécialisées dans les fluides de forage tel que DFSP, EMEC, AVA, MI ... Etc où chaque une a besoins au moins de 4 à 5 licences par an. Et de manière générale les logicielles de calculs sont très chères surtout quand on applique l'IA.

— **Quel est le potentiel de croissance exponentiel ?**

Nous avons un fort potentiel de croissance, car on vise à faire des collaborations avec des sociétés multinationales présentes en Algérie qui ont des filiales un peu partout dans le monde.

En analysant ces informations, nous pouvons mieux comprendre notre marché

potentiel et adapter nos stratégies de vente, de marketing et de développement de produits pour répondre aux besoins spécifiques des acheteurs. Il est également important de surveiller en permanence l'évolution du marché, les tendances de l'industrie et les demandes émergentes afin de rester compétitif et d'identifier de nouvelles opportunités de croissance.

4.2 Le marché cible :

4.2.1 Pourquoi avons-nous choisi ce marché ?

Nous avons opté pour cibler le marché des compagnies impliquées dans les opérations de forage pétrolier et gazier pour diverses raisons stratégiques et économiques [Hestad & Gulbrandsen \(2018\)](#) :

Taille du marché : Le marché des fluides de forage dans l'industrie pétrolière et gazière est de grande envergure. Il existe une demande constante de produits et de services liés aux fluides de forage pour soutenir les opérations de forage à travers le monde. En ciblant ce marché, nous avons accès à un large bassin de clients potentiels, ce qui nous offre un potentiel de croissance et d'expansion significatif.

Besoins spécifiques des compagnies des fluides de forage : Les compagnies du marché cible sont confrontées à des défis complexes et spécifiques liés aux opérations de forage. Ces défis peuvent inclure l'optimisation des performances, la réduction des coûts, l'amélioration de la sécurité et la gestion des risques. En nous concentrant sur ce marché, nous sommes en mesure de développer des solutions sur mesure qui répondent précisément à ces besoins spécifiques, ce qui nous permet de nous démarquer de la concurrence et de fournir une réelle valeur ajoutée à nos clients [Macpherson et al. \(2013\)](#).

Expertise et compétences : En focalisant notre attention sur les entreprises spécialisées dans les fluides de forage, nous capitalisons sur notre expertise et notre savoir-faire dans ce domaine spécifique. Nous disposons d'une connaissance approfondie de l'industrie pétrolière et gazière, ainsi qu'une expérience avérée dans la création de technologies et de solutions novatrices. Ceci nous autorise à fournir des produits et des

services de haute qualité, fondés sur une recherche approfondie et une compréhension exhaustive des exigences du marché.

Avantage concurrentiel : En choisissant ce marché cible particulier, nous nous démarquons de nos concurrents en fournissant des solutions sur mesure, spécifiquement adaptées aux besoins des entreprises opérant dans le secteur pétrolier et gazier. Cette approche nous confère un avantage concurrentiel significatif, car elle nous permet de nous concentrer sur un segment de marché bien défini au lieu de chercher à desservir un marché plus vaste et plus généraliste.

Opportunités de partenariat : En concentrant notre attention sur les compagnies du marché cible, nous ouvrons la porte à des collaborations stratégiques avec d'autres acteurs de l'industrie. Ces partenariats peuvent être avantageux pour la co-création de nouvelles technologies, le partage de ressources et l'exploration de nouvelles régions géographiques. Ils renforcent notre position sur le marché et nous permettent de tirer parti des synergies avec d'autres intervenants de l'industrie.

En conclusion, le choix le marché cible des institutions impliquées dans les opérations de forage pétrolier et gazier se fait sur la base de la taille du marché, des besoins spécifiques, de notre expertise et de nos compétences, de l'avantage concurrentiel que cela nous confère, ainsi que des opportunités de partenariat qui en découlent. En se concentrant sur ce marché, nous sommes en mesure de fournir des solutions spécialisées et adaptées qui répondent aux besoins complexes de nos clients, tout en bénéficiant d'un potentiel de croissance et de succès économique.

4.2.2 La détermination de la possibilité de conclure des contrats d'achat :

La détermination de la possibilité de conclure des contrats d'achat avec certains clients importants repose sur une analyse approfondie des facteurs clés suivants [Cox \(1996\)](#); [Kumar & Kumar \(2004\)](#); [Stevens \(2006\)](#); [Steinle & Schiele \(2008\)](#) :

Capacité financière : Il est essentiel d'évaluer la capacité financière des clients potentiels. Cela comprend l'examen de leurs états financiers, de leur solvabilité, de leur historique de paiement et de leur capacité à honorer les engagements contractuels.

Une solide capacité financière garantit que le client peut effectuer les achats prévus et contribue à minimiser les risques financiers associés aux contrats.

Besoins et exigences : Il est important de comprendre les besoins spécifiques des clients et de s'assurer que nos produits ou services répondent à ces besoins de manière optimale. Cela nécessite une analyse approfondie des exigences du client, de ses préférences, de ses attentes en termes de qualité, de quantité, de délais de livraison, etc. Une bonne adéquation entre nos offres et les besoins du client est un facteur clé pour conclure des contrats d'achat.

Relation commerciale : La nature de la relation commerciale avec le client est également un élément important à considérer. Il est crucial d'établir une relation de confiance avec le client, basée sur la transparence, la communication ouverte et la satisfaction mutuelle. Des relations solides avec les clients existants peuvent faciliter l'accès à de nouveaux contrats d'achat, en particulier avec des clients importants.

Position concurrentielle : Il est essentiel de comprendre la position concurrentielle de notre entreprise par rapport à d'autres fournisseurs potentiels. Cela comprend une analyse de la concurrence, de nos avantages concurrentiels, de notre réputation sur le marché, de notre capacité à fournir des produits de haute qualité et de notre historique de succès dans le domaine. Une position concurrentielle solide renforce nos chances de conclure des contrats avec des clients importants.

Analyse de rentabilité : Une évaluation de la rentabilité potentielle des contrats d'achat avec des clients importants est également nécessaire. Cela comprend l'analyse des coûts associés à la fourniture des produits ou services, ainsi que des marges bénéficiaires potentielles. Il est important de s'assurer que les contrats d'achat avec des clients importants sont financièrement viables et contribuent à la croissance et à la rentabilité de notre entreprise.

En conclusion, la possibilité de conclure des contrats d'achat avec certains clients importants dépend de l'évaluation de leur capacité financière, de l'adéquation de nos offres à leurs besoins, de la relation commerciale établie, de notre position concurrentielle et de l'analyse de rentabilité. Une analyse approfondie de ces facteurs nous permet de prendre des décisions éclairées et de maximiser les opportunités de conclure

des contrats fructueux avec des clients importants

4.3 Mesure de l'intensité de la concurrence :

Pour mesurer l'intensité de la concurrence dans le développement d'une application d'IA pour la prédiction des formulations des fluides de forage, plusieurs facteurs peuvent être pris en compte [Koroteev & Tekic \(2021\)](#); [Qin et al. \(2023\)](#) :

- **Analyse du marché :**

Il comprend l'identification des concurrents actuels et potentiels qui proposent des solutions similaires ou complémentaires. Il faut également évaluer leur présence sur le marché, leur part de marché, leur réputation, leurs forces et leurs faiblesses ;

- **Recherche et développement :** L'investissement dans la recherche et le développement de nouvelles technologies et méthodologies est un indicateur de l'intensité de la concurrence. Il est important d'analyser les avancées technologiques réalisées par les concurrents dans le domaine de l'IA appliquée aux fluides de forage. Cela comprend l'examen des brevets déposés, des publications scientifiques, des projets de recherche en cours, etc ;

- **Collaboration industrielle :** L'existence de collaborations entre les entreprises du secteur pétrolier et gazier et les acteurs de l'IA peut également indiquer une intensité concurrentielle élevée. Les partenariats et les alliances stratégiques entre les entreprises pour développer des solutions d'IA pour les fluides de forage peuvent être un signe de la compétition dans le domaine.

- **Tendances du marché :**

L'observation des tendances du marché peut donner des indications sur l'intensité de la concurrence. Par exemple, une augmentation du nombre d'entreprises qui se lancent dans le développement d'applications d'IA pour les fluides de forage peut indiquer une concurrence croissante. De même, l'entrée de nouveaux acteurs sur le marché ou la présence de start-ups technologiques innovantes peut également signaler une concurrence accrue.

- **Retour sur investissement :**

L'analyse du retour sur investissement dans le développement et la commercialisation d'une application d'IA pour la prédiction des formulations des fluides de forage peut fournir des indications sur la compétitivité du secteur. Si les entreprises obtiennent un retour sur investissement significatif et rapide, cela peut indiquer une forte demande et une concurrence intense.

4.3.1 Déterminez qui sont nos concurrents directs et indirects

Les entreprises spécialisées dans les technologies pétrolières et gazières, les fournisseurs de services d'ingénierie, les entreprises de logiciels et d'analyse de données, etc., constituent les principaux concurrents dans le domaine de l'application de l'IA dans la formulation des fluides de forage. Leur expertise dans l'industrie et leur capacité à développer des solutions technologiques adaptées aux besoins des clients les positionnent comme des acteurs majeurs de la concurrence. Il est essentiel d'analyser leurs sites Web, leurs produits et services, ainsi que leurs réalisations dans le domaine de l'IA et des fluides de forage pour mieux comprendre la nature de la concurrence et identifier les avantages concurrentiels propres à chaque entreprise [Epelle & Gerogiorgis \(2020\)](#).

D'autres sources d'informations sont utiles pour déterminer les concurrents dans ce domaine tels que :

- Études de marché : Consulter des études de marché et des rapports sectoriels sur l'application de l'IA dans le domaine des fluides de forage. Ces études peuvent fournir une liste des principaux acteurs du marché, leurs parts de marché, leurs stratégies, etc. Les rapports d'analystes de l'industrie pétrolière et gazière peuvent également donner des informations sur les entreprises qui se concentrent sur les solutions d'IA pour les fluides de forage [Waqar et al. \(2023\)](#).
- Participation à des conférences et salons professionnels : Assister à des conférences, des expositions et des salons professionnels dans l'industrie pétrolière et gazière. Ces événements réunissent des acteurs de l'industrie, y compris des entreprises qui développent des technologies d'IA pour les fluides de forage. Cela permet de

nouer des contacts, de découvrir de nouveaux acteurs et de mieux comprendre le paysage concurrentiel [Samylovskaya et al. \(2022\)](#).

- Réseautage professionnel : Utiliser les réseaux professionnels pour échanger avec des experts de l'industrie pétrolière et gazière, des chercheurs, des ingénieurs et d'autres acteurs du secteur. Ces interactions peuvent fournir des informations sur les concurrents directs et indirects et permettre d'identifier de nouvelles entreprises ou startups émergentes qui se concentrent sur les solutions d'IA pour les fluides de forage [Agenda \(2015\)](#).

4.3.2 Déterminer leur nombre et leurs parts de marché :

En Algérie, plusieurs sociétés privées opèrent dans le domaine de la formulation des fluides de forage et proposent leurs services à la société nationale Sonatrach. Ces entreprises privées sont chargées de répondre aux exigences spécifiques de Sonatrach en préparant un grand nombre de formulations de fluides de forage. Elles réalisent des travaux d'optimisation des paramètres de ces fluides dans leurs laboratoires, ce qui implique des délais considérables et des coûts importants liés aux produits utilisés pour atteindre l'optimalité des formulations recherchées.

Au sein du secteur de la formulation des fluides de forage en Algérie, des entreprises telles que MI Swaco et AVA se distinguent. Elles sont reconnues pour leur savoir-faire dans la fourniture de fluides de forage ainsi que des composants associés. Elles travaillent en étroite collaboration avec des clients tels que Sonatrach pour répondre à leurs besoins spécifiques en matière de fluides de forage.

4.3.3 Identifier leurs forces et leurs faiblesses

Les entreprises citées en haut sont reconnues dans l'industrie pétrolière et gazière, avec une longue expérience dans la formulation des fluides de forage. En raison de leur expertise et de l'utilisation de technologies avancées, les solutions proposées par ces entreprises peuvent être relativement coûteuses, ce qui peut limiter leurs accessibilités pour certaines entreprises ou projets de petite envergure.

4.4 La stratégie marketing

Notre entreprise spécialisée dans l'application de l'IA dans la formulation des fluides de forage met en place une stratégie marketing ciblée pour attirer de nouveaux clients et augmenter notre part de marché. Pour ce faire, nous adoptons une approche méthodique qui comprend plusieurs étapes [Thompson \(1998\)](#).

Tout d'abord, nous identifions les entreprises du secteur des fluides de forage qui sont les plus susceptibles de bénéficier de notre solution d'IA. Nous nous concentrons principalement sur les grandes entreprises pétrolières et gazières, les entreprises de services d'ingénierie et les sociétés de forage indépendantes. Ensuite, nous personnalisons notre message pour répondre aux besoins spécifiques de chaque groupe cible. Nous mettons en avant les avantages uniques de notre solution d'IA, tels que l'optimisation des performances, la réduction des coûts et l'amélioration de l'efficacité opérationnelle. Nous nous assurons de communiquer de manière claire et convaincante les bénéfices que nos clients potentiels peuvent tirer de notre solution.

Pour atteindre nos clients cibles, nous choisissons soigneusement les canaux de communication les plus efficaces. Nous nous engageons dans des publications spécialisées de l'industrie pétrolière et gazière, participons à des salons professionnels, organisons des webinaires et utilisons les plateformes en ligne et les réseaux sociaux pertinents. Nous veillons à être présents là où nos clients potentiels recherchent des informations sur les fluides de forage et les solutions d'IA.

Dans le cadre de notre stratégie marketing, nous allouons un budget approprié à nos activités promotionnelles. Nous évaluons régulièrement les performances de nos initiatives marketing et ajustons nos investissements en fonction des résultats obtenus. Cette approche nous permet d'utiliser nos ressources financières de manière judicieuse et de maximiser l'impact de nos efforts marketing.

En conclusion, nous mesurons les résultats de nos actions. Nous utilisons des indicateurs clés de performance (KPI) pour évaluer l'efficacité de notre stratégie marketing. Cela inclut le suivi du nombre de nouveaux clients acquis, de l'augmentation des ventes, de la notoriété de notre marque et de la satisfaction des clients. Nous utilisons ces données pour ajuster notre approche marketing, identifier les domaines à

améliorer et optimiser nos efforts pour atteindre nos objectifs commerciaux.

Chapitre 5

Plan de production et organisation

5.1 Le processus de production

Notre solution est une plateforme innovante qui vise à résoudre des problèmes critiques dans l'industrie des fluides de forage. En combinant des algorithmes avancés, des modèles d'apprentissage automatique et une interface utilisateur conviviale, nous offrons une suite complète de fonctionnalités conçues pour améliorer l'efficacité, la sécurité et la durabilité des opérations de forage [Agwu et al. \(2018\)](#); [Yang et al. \(2023\)](#). Pour mettre en œuvre notre solution en production, nous devons développer trois composants clés comme le montre la [Figure 5.1](#).

- Le premier de ces composants est le module de calcul dédié à la préparation des formulations du LMC (Laboratory Mud Calculator). Dans ce module, nous intégrerons les formules mathématiques et les modèles ML spécifiquement élaborées pour cette application. Dans une première étape, ce module sera intégré en tant que fonctionnalité au sein d'un logiciel que nous avons baptisé KBS-MC. Ce logiciel a été conçu dans le but de simplifier l'application de toutes les formules et calculs relatifs aux fluides de forage, que ce soit au niveau du laboratoire ou sur le terrain.
- Le cœur de notre solution repose sur le deuxième composant, le laboratoire virtuel, qui exploite les capacités de l'apprentissage automatique (ML) et nécessite la

mise en œuvre des pratiques de MLOps (Machine Learning Operations).

Le laboratoire virtuel est conçu pour prédire les résultats des tests de laboratoire en utilisant les formulations à tester. Pour ce faire, nous avons développé un modèle de ML hautement sophistiqué qui est capable d'apprendre à partir des données passées et de généraliser ces connaissances pour prédire avec précision de nouveaux résultats de tests. Ce modèle s'appuie sur des algorithmes avancés de ML et de Deep Learning, ce qui lui permet d'analyser de manière complexe et non linéaire les relations entre les formulations et les résultats des tests.

Cependant, pour déployer ce modèle de ML en production de manière efficace et sécurisée, nous devons mettre en place des pratiques de MLOps. Les MLOps, ou opérations de machine learning, sont un ensemble de processus et de méthodologies visant à gérer l'ensemble du cycle de vie des modèles de ML, depuis leur développement jusqu'à leur déploiement et leur maintenance en production [Kreuzberger et al. \(2023\)](#).

- Enfin, le troisième composant consiste à offrir une gamme complète d'algorithmes d'optimisation. Ces algorithmes seront utilisés pour lancer des tests virtuels dans le laboratoire virtuel, dans le but de rechercher l'optimum souhaité.

Tous ces modules seront connectés de manière à créer un nouveau processus intelligent d'optimisation, conforme à l'architecture décrite dans notre brevet d'invention intitulé "Procédé d'optimisation des fluides de forage via un système basé sur l'intelligence artificielle" selon la [Figure 5.1](#). Cette solution globale vise à révolutionner les méthodes d'optimisation dans le domaine des fluides de forage, en exploitant la puissance des calculs, de l'apprentissage automatique et de l'optimisation pour des résultats plus efficaces et performants.

5.1.1 Le processus de développement et d'utilisation de la solution

Le processus de développement et d'utilisation de notre solution pour l'optimisation des formulations de fluides de forage peut être résumé en plusieurs étapes :

1. **Choix des Paramètres et de l'Algorithme** : Dans un premier temps, l'utilisateur de notre solution choisit les paramètres qu'il souhaite optimiser à partir d'une formulation de base. Il sélectionne également l'algorithme d'optimisation à utiliser pour trouver la meilleure combinaison de ces paramètres.
2. **Lancement de l'Optimisation** : Le logiciel commence le processus d'optimisation en effectuant des simulations virtuelles avec la formulation de base. Il ajuste ensuite les concentrations des composants de la formulation en fonction de l'algorithme d'optimisation choisi. Ce processus se répète jusqu'à ce que l'algorithme converge vers une formulation optimale.
3. **Retour de la Formulation Optimale** : Une fois que l'optimisation est terminée, le logiciel retourne la formulation optimale au professionnel en charge. Cette formulation est synchronisée avec une base de données pour une utilisation ultérieure.
4. **Préparation des Tests** : L'ingénieur ou le professionnel prépare la formulation optimale dans le laboratoire physique en suivant les standards de l'API (American Petroleum Institute) pour les tests de fluides de forage.
5. **Alimentation de la Base de Données** : Les résultats des tests réels effectués sur la formulation optimale sont automatiquement alimentés dans la base de données si les machines de laboratoire sont assistées par des logiciels. Sinon, l'ingénieur laboratoire intervient pour saisir manuellement les résultats dans la base de données.
6. **Validation de la Formulation Optimale** : L'ingénieur laboratoire compare les résultats des tests réels avec les prédictions faites par le modèle prédictif de l'IA. Si la conformité entre les prédictions et les résultats réels n'est pas satisfaisante, l'ingénieur signale une anomalie pour une éventuelle révision du

modèle prédictif. En général, en suivant les meilleures pratiques de ML Ops (Machine Learning Operations), le modèle subit régulièrement un contrôle et un ré-entraînement pour s'assurer qu'il reste précis, à moins qu'il y ait des changements majeurs dans les composants des boues utilisées.

Ce processus itératif permet d'optimiser les formulations de fluides de forage de manière plus efficace, en utilisant des prédictions basées sur l'IA pour guider les ajustements des concentrations de composants. Cela permet de réduire les coûts de formulation tout en maintenant des performances techniques conformes aux normes de l'industrie.

Une documentation complète qui sera partagée avec nos utilisateurs, fournissant des informations détaillées sur notre solution, ses fonctionnalités, son utilisation optimale, les meilleures pratiques, ainsi que des guides étape par étape pour tirer le meilleur parti de notre solution.

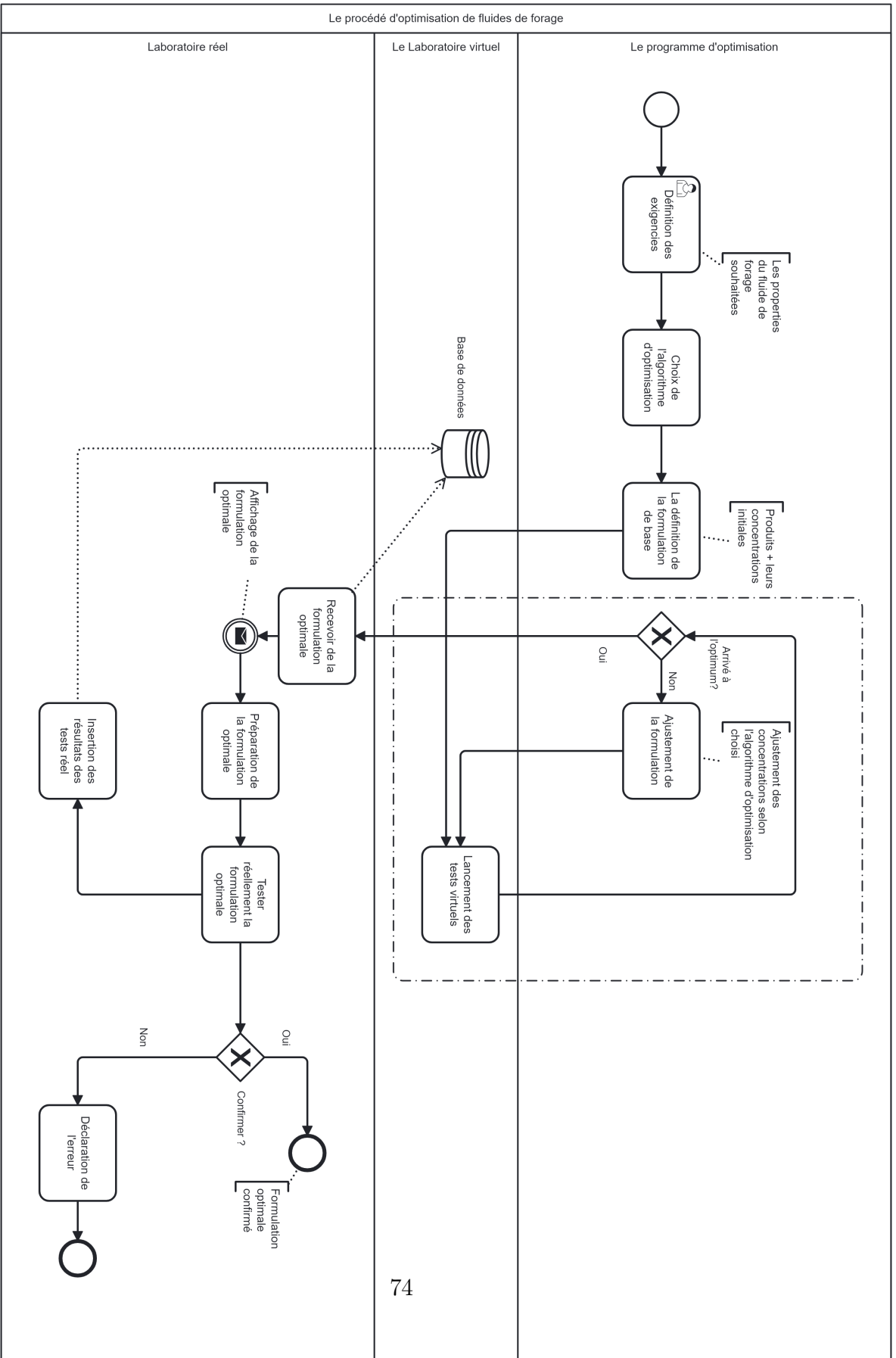


FIGURE 5.1 – Modèle et Notation des Processus Métier (Business Process Model and Notation : BPMN) pour le procédé intelligent d'optimisation des fluides de forage

5.1.2 Étapes de Développement d'une Solution AI SaaS :

Le processus de développement d'une solution AI SaaS (Software as a Service) comporte plusieurs étapes essentielles. Tout commence par l'identification précise d'une problématique spécifique que la solution vise à résoudre, comme c'est le cas pour la virtualisation des tests de laboratoire et l'optimisation des formulations des fluides de forage dans notre projet. Ensuite, une phase de conception permet de définir l'architecture globale de la solution. Le développement proprement dit consiste à créer et intégrer les algorithmes d'intelligence artificielle qui seront au cœur de la solution. Enfin, des tests rigoureux sont menés pour valider son bon fonctionnement avant le déploiement, garantissant ainsi la qualité et l'efficacité de la solution AI SaaS [Metelskaia et al. \(2018\)](#); [Mishra & Pani \(2021\)](#).

1. **Identification de la Problématique** : La première étape consiste à définir un problème particulier auquel la solution AI SaaS apportera une réponse. Dans notre cas, il s'agit de la virtualisation des tests en laboratoire et de l'optimisation plus efficace des formulations de fluides de forage.
2. **Conception de la Solution** : Une fois la problématique identifiée, concevez une solution IA basée sur le cloud (SaaS) pour résoudre ce problème. Cela inclut la planification des fonctionnalités, de l'architecture logicielle et des modèles AI (ML et DL). Nous avons élaboré un document détaillé qui comprend une description complète de chaque aspect du projet. Cela inclut la définition précise des modules, des fonctionnalités et des technologies qui seront utilisés.
3. **Collecte des Données** : L'IA nécessite des données énormes et approfondies qui concernent le problème à traiter. Pour la collecte de données, nous avons mis en place une stratégie qui nous permet de contacter les entreprises concernées de manière sécurisée et confidentielle.
4. **développement des modèles IA** : L'utilisation des données collectées pour entraîner des modèles AI pour les différents tests et machines en utilisant des techniques d'apprentissage automatique basée sur le machine learning (ML) ou le deep learning (DL) . Cette étape sera explorée plus en profondeur dans la

section suivante.

5. **Intégration dans une Plateforme SaaS** : l'intégration du modèle IA dans une plateforme SaaS en utilisant une architecture cloud appropriée. L'architecture cloud, également appelée architecture informatique en nuage, est un modèle d'infrastructure informatique dans lequel les ressources informatiques telles que les serveurs, le stockage, les bases de données, les réseaux, et les logiciels sont hébergées sur des serveurs distants et accessibles via Internet. Ceci permettra aux utilisateurs d'accéder à la solution plus facile [Yathiraju \(2022\)](#).
6. **Développement de l'Interface Utilisateur (UI)** : Elaboration d'une interface utilisateur conviviale, favorisant une interaction intuitive avec la solution AI SaaS, simplifiant ainsi son utilisation. Cela comprend la conception d'une disposition ergonomique, la création de fonctionnalités intuitives, et la mise en place de guides ou d'une assistance contextuelle pour faciliter l'expérience de l'utilisateur. Cette interface utilisateur est essentielle pour permettre aux utilisateurs, qu'ils soient en laboratoire ou sur le terrain, d'accéder et d'appliquer efficacement les prédictions et les calculs fournis par la solution AI SaaS.
7. **Tests et Validation** : La réalisation de tests exhaustifs est cruciale pour assurer la précision et la fiabilité du modèle AI, impliquant une validation rigoureuse avec des données réelles. Ces tests approfondis sont essentiels pour confirmer que la solution fonctionne de manière cohérente et précise dans des conditions réelles, garantissant ainsi son efficacité et sa pertinence pour les utilisateurs.
8. **Sécurité et Confidentialité** : L'implémentation de mesures de sécurité est entreprise pour sécuriser les données des utilisateurs et garantir la conformité de la solution avec les normes de confidentialité. Cela vise à assurer la protection et la confidentialité des informations sensibles des utilisateurs.
9. **Mise en Production** : Une fois les tests et validations achevés, l'étape cruciale de déploiement intervient, permettant ainsi à la solution AI SaaS d'être opérationnelle et accessible aux utilisateurs. Ce processus nécessite une mise en place soignée pour garantir un fonctionnement fluide et fiable. Une fois déployée, la solution peut commencer à apporter des avantages réels aux utilisateurs en

résolvant les problèmes spécifiques pour lesquels elle a été conçue. Il est essentiel de maintenir et de surveiller en permanence le système pour s'assurer qu'il fonctionne efficacement et de mettre en œuvre des améliorations si nécessaire.

10. **Maintenance et Amélioration** : Offrir un soutien continu en surveillant la performance de la solution en exploitation et en mettant en œuvre des mises à jour visant à améliorer ses fonctionnalités et sa sécurité.
11. **Acquisition de Clients** : Mise en place d'une stratégie d'acquisition de clients visant à attirer des utilisateurs vers notre solution AI SaaS.
12. **Analyse des Données d'Utilisation** : Examiner les données d'utilisation afin de comprendre les interactions des clients avec la solution et repérer les possibilités d'amélioration.
13. **Évolutivité** : L'assurance que la solution AI SaaS est évolutive pour gérer une augmentation du nombre d'utilisateurs et des charges de travail.
14. **Adaptation aux Besoins du Marché** : L'écoute des besoins changeants du marché et l'adaptation de la solution en conséquence.

5.1.3 La modélisation par le Machine Learning

Le Machine Learning (ML) est le processus qui consiste à utiliser des modèles mathématiques de données pour aider un ordinateur à apprendre sans instruction directe. Il est considéré comme un sous-ensemble d'intelligence artificielle. Le Machine Learning utilise des algorithmes pour identifier des patterns (corrélations) dans les données, et ces patterns sont ensuite utilisés pour créer un modèle de données qui peut effectuer des prédictions. Avec des données et une expérience accrues, les résultats du Machine Learning sont plus précis, à l'instar de la manière dont les êtres humains s'améliorent avec la pratique [Microsoft Azure](#) (s. d.); [Tripathi et al. \(2021\)](#) (voir [Figure 5.2](#)).

Les étapes de développement d'un modèle machine learning

En général, pour développer un modèle de Machine Learning (ML) ou d'Apprentissage Profond (Deep Learning), le processus comporte quatre étapes essentielles [Microsoft Azure \(s. d.\)](#); [Vartak et al. \(2016\)](#); [Paleyes et al. \(2022\)](#) :

1. **Étape 1 : Collecter et préparer les données**

Une fois les sources de données identifiées, les données disponibles sont compilées. Le type de données dont nous disposons peut aider à choisir quels algorithmes Machine Learning pouvons nous utiliser. Lorsque nous passons en revue nos données, les anomalies sont identifiées, la structure est développée et les problèmes d'intégrité des données sont résolus.

2. **Étape 2 : Former le modèle**

Les données préparées sont divisées en deux groupes : le jeu d'apprentissage et le jeu de test. Le jeu d'apprentissage est une grande partie de nos données qui est utilisée pour adapter nos modèles Machine Learning à la plus grande précision.

3. **Étape 3 : Valider le modèle**

Lorsque nous sommes prêts à choisir notre modèle de données final, le jeu de test est employé pour évaluer la performance et l'exactitude.

4. **Étape 4 : Interpréter les résultats** Analyser les résultats afin d'obtenir des informations, de tirer des conclusions et de faire des prédictions.

Les différents algorithmes et outils du ML

Le domaine du Machine Learning offre une vaste gamme d'algorithmes et d'outils, chacun ayant ses propres applications et domaines d'expertise. Parmi les algorithmes de Machine Learning, on trouve des techniques de régression telles que la régression linéaire et logistique, adaptées à la prédiction de valeurs continues et à la classification, respectivement. Les arbres de décision et les Forêts aléatoires offrent des solutions pour la classification et la régression, tandis que les Machines à vecteurs de support (SVM) et k-Nearest Neighbors (K-NN) se concentrent sur la classification. Le Naive Bayes est

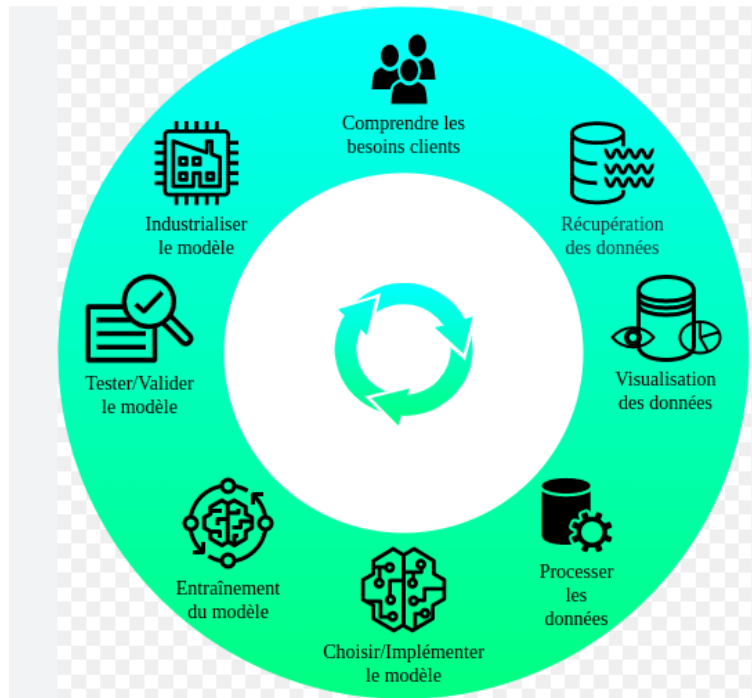


FIGURE 5.2 – les étapes de développement d'un modèle machine learning

souvent utilisé pour la classification basée sur des probabilités. En parallèle, les Réseaux de neurones artificiels (ANN) et les architectures de Deep Learning, tels que les Réseaux de neurones convolutionnels (CNN) et les Réseaux de neurones récurrents (RNN), sont déployés pour des tâches complexes de vision par ordinateur, de traitement du langage naturel et de séries temporelles. Les outils associés à ces algorithmes comprennent des bibliothèques bien établies telles que Scikit-learn, TensorFlow, Keras, PyTorch et R, qui facilitent le développement et l'implémentation de modèles de ML. Les différents algorithmes sont représentés dans la [Figure 5.3 \(González et al. \(2020\)\)](#).

5.1.4 Les pratiques des opérations de ML MLOps pour la mise en production des modèles d'IA

Les opérations de machine learning (MLOps : Machine Learning Operations) est une fonction fondamentale de l'ingénierie du machine learning ayant pour mission de normaliser le processus de mise en production des modèles de machine learning

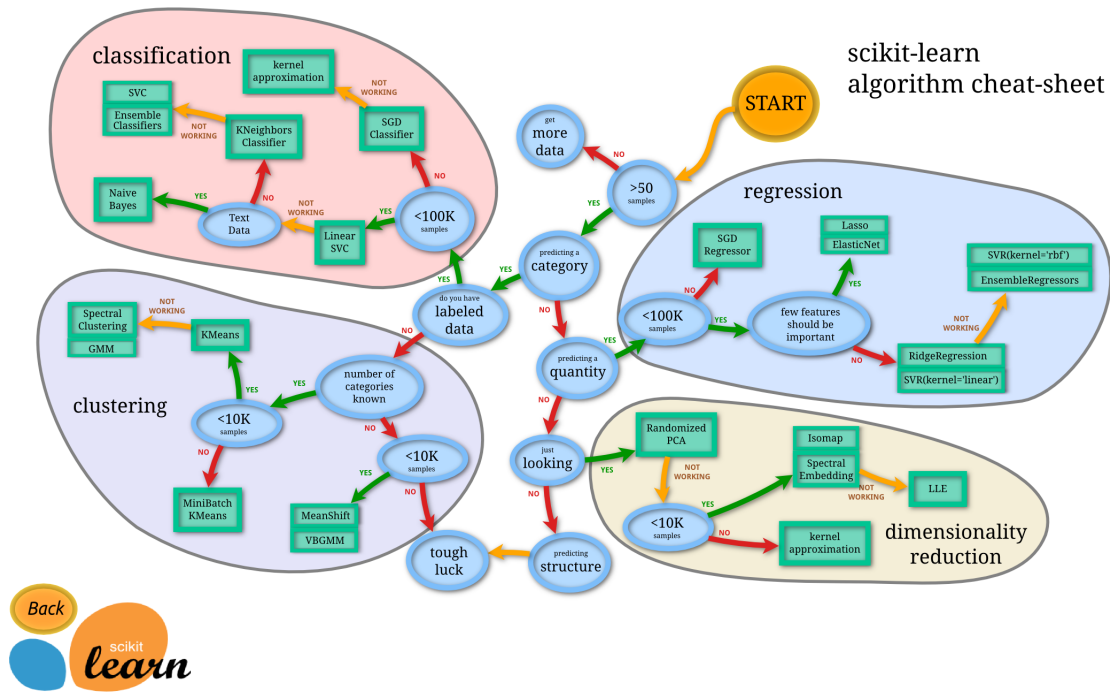


FIGURE 5.3 – Les algorithmes du ML selon SKleran

puis d'en assurer la maintenance et la supervision. Les MLOps sont une fonction collaborative qui réunit généralement des data scientists, des ingénieurs DevOps et l'IT.

Les MLOps offrent une approche utile pour encadrer la création et la qualité des solutions de machine learning et d'IA. En adoptant les MLOps, les data scientists et les ingénieurs en machine learning collaborent plus facilement. Grâce aux pratiques de déploiement et d'intégration continus (CI/CD), qui assurent la qualité de la supervision, de la validation et de la gouvernance des modèles ML, les équipes développent et produisent plus rapidement des modèles [Databricks \(s. d.\)](#); [Kreuzberger et al. \(2023\)](#). Les data scientists peuvent mettre en œuvre et entraîner un modèle de ML avec des performances prédictives sur un ensemble de données exclues hors connexion, en fonction des données d'entraînement pertinentes pour leur cas d'utilisation. Cependant, le véritable défi n'est pas de créer un modèle de ML, mais de créer un système de ML intégré et de le faire fonctionner en production de manière continue [Raj \(2021\)](#).

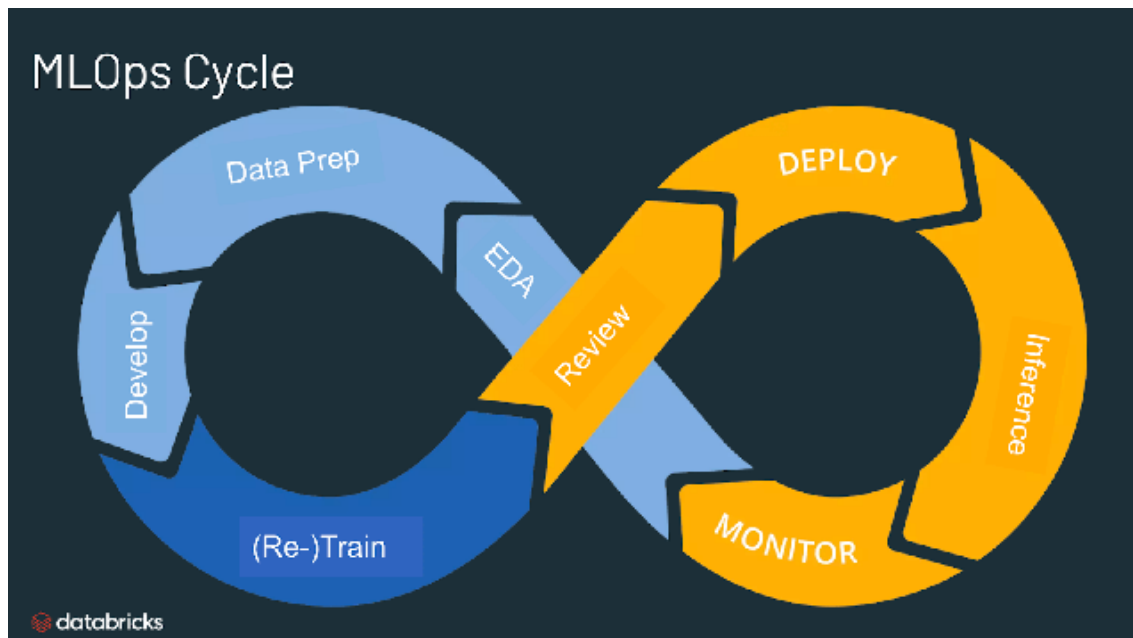


FIGURE 5.4 – Le cycle de MLOps selon Databricks

5.2 L’approvisionnement

L’approvisionnement pour notre solution AI SaaS est une étape cruciale de notre processus opérationnel, car elle garantit que nous disposons des ressources nécessaires pour développer, déployer et maintenir notre solution de manière efficace et fiable. Voici les principaux aspects de l’approvisionnement pour notre solution AI SaaS :

1. **Infrastructure Cloud** : Nous devons nous approvisionner en ressources cloud, telles que des serveurs virtuels, du stockage cloud, et des services de mise en réseau, auprès de fournisseurs de cloud de confiance. Cela nous permettra de garantir la disponibilité, l’évolutivité et la sécurité de notre solution.
2. **Licences Logicielles** : Nous devons acquérir les licences nécessaires pour les logiciels que nous utilisons dans notre solution, y compris les frameworks d’apprentissage automatique, les outils de développement, les bases de données, et tout autre composant logiciel essentiel.
3. **Données et Ensembles de Données** : Pour former nos modèles d’IA et les maintenir, nous devons nous approvisionner en ensembles de données pertinents,

qu'ils proviennent de sources publiques ou privées. Il est essentiel de garantir la qualité et la légalité de ces données.

4. **Équipe de Développement** : Nous devons recruter et former une équipe de développement talentueuse, composée de data scientists, d'ingénieurs logiciels, de spécialistes en IA, et d'autres professionnels qualifiés pour concevoir et mettre en œuvre notre solution.
5. **Contrats de Support et de Maintenance** : Il peut être nécessaire de signer des contrats de support technique avec des fournisseurs de services tiers pour obtenir de l'aide en cas de problèmes techniques ou pour effectuer des mises à jour de manière régulière.
6. **Sécurité et Confidentialité** : Assurer la sécurité des données et la protection de la confidentialité des utilisateurs est essentiel. Nous devons nous approvisionner en solutions de sécurité informatique, en outils de détection des menaces, et en protocoles de gestion des risques.
7. **Contrats de Service** : Dans le cadre de notre modèle SaaS, nous pouvons également établir des contrats de service avec nos clients, définissant les niveaux de service, les modalités de facturation, et les engagements en matière de disponibilité et de support.
8. **Mise en Conformité Réglementaire** : Nous devons nous conformer aux réglementations en vigueur en matière de protection des données et de conformité sectorielle, ce qui peut nécessiter des investissements supplémentaires dans la conformité.

En résumé, l'approvisionnement pour notre solution AI SaaS englobe divers aspects, de l'infrastructure à la sécurité, en passant par les données et les ressources humaines. C'est un processus complexe qui garantit que notre solution est prête à être déployée avec succès tout en répondant aux besoins de nos clients.

5.3 La main d'œuvre

5.3.1 La détermination du nombre de postes

La détermination du nombre de postes nécessaires pour notre startup basée sur l'IA, qui se concentre sur la prédiction des paramètres du fluide de forage, implique une analyse approfondie des besoins de main-d'œuvre. Voici les étapes à suivre [Petryshak et al. \(2022\)](#); [Wilson et al. \(2017\)](#) :

- **Analyse des tâches :**

Pour commencer, identifions les différentes tâches impliquées dans notre projet basé sur l'IA. Cela peut inclure la collecte et la préparation des données, le développement et l'entraînement des modèles d'IA, l'analyse des résultats et la gestion du projet. Il est important de déterminer les compétences et les connaissances nécessaires pour chaque tâche afin de mieux comprendre le profil des employés nécessaires pour mener à bien notre projet. Pour cette étape, nous avons élaboré un plan de gestion de projet en utilisant la méthode de la Work Breakdown Structure (WBS). Cette approche nous a permis de décomposer notre projet en tâches plus petites et plus gérables, ce qui facilite la planification et la coordination des ressources humaines nécessaires à chaque étape. En utilisant la WBS, nous avons pu définir clairement les responsabilités et les dépendances entre les différentes tâches, ce qui contribue à une gestion efficace de la main-d'œuvre pour atteindre nos objectifs de projet.

- **Évaluation des compétences et des ressources existantes :** Nous devons procéder à une évaluation approfondie des compétences et des ressources disponibles au sein de notre équipe actuelle. Cela implique d'identifier les membres de l'équipe qui possèdent déjà les compétences nécessaires pour accomplir les diverses tâches du projet. Cette évaluation nous permettra de déterminer si nous avons suffisamment de ressources internes pour répondre à nos besoins ou si nous devons envisager le recrutement de nouveaux employés. De plus, nous pourrions également évaluer la possibilité de former les membres actuels de l'équipe pour qu'ils acquièrent les compétences requises. Cette démarche nous

aidera à optimiser notre main-d'œuvre et à garantir une allocation efficace des ressources.

- **Planification de la croissance :**

En se basant sur l'analyse des tâches et l'évaluation des compétences de notre équipe, il est crucial d'élaborer un plan de croissance de l'effectif. Ce plan doit déterminer le nombre de postes requis pour chaque tâche identifiée et prévoir les étapes nécessaires en matière de recrutement ou de formation pour combler les éventuelles lacunes en compétences.

Il est essentiel de prendre en considération nos objectifs de croissance en tant que startup, ainsi que les ressources financières disponibles. Cela nous permettra de définir le rythme optimal de recrutement ou de formation, tout en assurant que nous disposons du personnel nécessaire pour atteindre nos objectifs tout en maintenant un équilibre financier. Ce plan de croissance de l'effectif jouera un rôle clé dans la gestion de notre main-d'œuvre pour répondre aux besoins de notre projet IA et de notre startup dans son ensemble.

En suivant ces étapes, nous serons en mesure de déterminer le nombre de postes nécessaires pour notre projet basé sur l'IA. Cela nous permettra de créer une équipe solide et compétente pour mener à bien toutes les tâches nécessaires à la réussite de notre startup.

Pour notre startup, nous avons identifié les postes clés nécessaires pour mener à bien notre projet AI SaaS. Voici une liste des rôles et du personnel requis :

1. **Manager Général :** Responsable de la direction générale de la startup, de la gestion globale et de la stratégie.
2. **Manager IT :** En charge de la gestion de l'infrastructure technologique, de la sécurité des données et de la maintenance des systèmes.
3. **Manager Commercial :** Responsable du développement commercial, de la gestion des ventes et de l'expansion du marché.
4. **Data Scientists :** Experts en analyse de données et en modélisation statistique pour développer nos algorithmes d'IA.

5. **ML Engineers** : Ingénieurs en machine learning chargés de développer et d’optimiser les modèles d’IA.
6. **MLOps Engineer** : Spécialiste en gestion des opérations de machine learning pour assurer le déploiement et la maintenance des modèles en production.
7. **Développeurs Full Stack** : Responsables du développement de logiciels et de la création de l’interface utilisateur.
8. **UI/UX Designer** : Chargé de concevoir une expérience utilisateur intuitive et conviviale.
9. **Chercheur dans les Fluides de Forage** : Expert dans le domaine des fluides de forage pour contribuer à la modélisation.
10. **Expert Comptable** : En charge de la gestion financière et de la comptabilité de l’entreprise.
11. **Spécialiste en Marketing** : Responsable de la stratégie marketing, de la promotion et de la communication de notre solution.

Chaque membre de l’équipe jouera un rôle essentiel dans la réalisation de notre projet et dans la croissance de notre startup AI SaaS.

5.3.2 La nature et le type de main-d’œuvre

Pour déterminer la nature et le type de main-d’œuvre dont nous avons besoin pour notre projet basé sur l’IA, nous devons prendre en compte plusieurs facteurs clés [Kiron et al. \(2023\)](#) :

- **Compétences requises :**

Pour chaque poste clé au sein de notre projet, il est essentiel de déterminer les compétences spécifiques nécessaires pour réussir. Cela peut englober divers domaines tels que l’intelligence artificielle, la science des données, la programmation, la gestion de projet, etc. Élaborons une liste exhaustive des compétences requises pour chaque poste afin d’assurer une équipe qualifiée et performante.

- **Expérience et expertise :**

Il est crucial de prendre en compte le niveau d’expérience et d’expertise requis

pour chaque poste au sein de notre équipe. Certains postes peuvent exiger une expertise avancée dans des domaines spécifiques, tandis que d'autres peuvent nécessiter une expérience de travail pertinente dans des projets similaires. Identifions donc de manière précise les exigences en termes d'expérience et d'expertise pour chaque poste afin de garantir que chaque membre de l'équipe possède les compétences nécessaires pour contribuer efficacement à notre projet.

En résumé, notre startup a identifié un certain nombre de postes clés nécessaires pour mener à bien notre projet basé sur l'intelligence artificielle. Ces postes couvrent une gamme de compétences allant de l'intelligence artificielle et de la science des données à la gestion de projet, en passant par le développement logiciel et le design UX/UI. Le niveau d'expérience et d'expertise requis varie en fonction des postes, allant de l'expertise avancée à une expérience pertinente dans des projets similaires.

Nous avons conscience de l'importance d'avoir une équipe qualifiée et compétente pour atteindre nos objectifs. Par conséquent, nous sommes déterminés à recruter les meilleurs talents ou à offrir une formation appropriée à notre équipe actuelle pour combler les lacunes en compétences. Notre processus de recrutement sera guidé par ces exigences spécifiques en matière de compétences et d'expérience, et nous veillerons à ce que chaque membre de l'équipe soit parfaitement adapté à son rôle.

En fin de compte, notre objectif est de constituer une équipe solide et diversifiée qui contribuera au succès de notre startup et à la réalisation de notre vision dans le domaine de l'intelligence artificielle.

5.4 Les principaux partenaires

Pour déterminer les principaux partenaires de notre projet, il est essentiel d'identifier les acteurs qui peuvent contribuer à sa réalisation et apporter des avantages significatifs. Voici quelques types de partenaires potentiels à considérer [Palani \(2020\)](#); [Bonamigo et al. \(2022\)](#) :

- **Entreprises fournisseurs de données historiques :**

Collaborer avec des entreprises spécialisées dans la collecte et la fourniture de

données historiques des fluides de forage peut être extrêmement bénéfique pour notre projet basé sur l'IA. Ces partenaires peuvent nous fournir des ensembles de données volumineux et de haute qualité, ce qui est essentiel pour l'entraînement de nos modèles d'apprentissage automatique [Koroteev & Tekic \(2021\)](#).

- **Laboratoires de recherche des fluides de forage :**

Établir des partenariats avec des laboratoires de recherche spécialisés dans l'étude des fluides de forage peut nous permettre de bénéficier de leur expertise et de leur savoir-faire. Ces partenaires peuvent nous aider à améliorer notre compréhension des propriétés des fluides de forage, à valider nos modèles et à développer de nouvelles solutions innovantes.

- **Institutions de financement :**

Les institutions de financement, telles que les banques, les fonds d'investissement ou les organismes de subvention, peuvent jouer un rôle clé dans le soutien de notre startup basée sur l'IA. Ces partenaires peuvent fournir des ressources financières nécessaires pour le développement de notre application, la recherche et le marketing. En établissant des partenariats avec des institutions de financement, nous pouvons renforcer notre capacité à réaliser notre vision et à atteindre nos objectifs financiers [Algerie Presse Service \(2022\)](#).

- **Incubateurs :**

Les incubateurs et les accélérateurs sont des acteurs importants dans l'écosystème entrepreneurial. Ils offrent des programmes d'accompagnement, de mentorat et de réseau, ce qui peut être extrêmement précieux pour notre startup basée sur l'IA. Ces partenaires peuvent nous aider à affiner notre modèle commercial, à accéder à des ressources supplémentaires et à établir des liens avec d'autres entreprises du secteur [Khokhawala & Iyer \(2021\)](#).

En établissant des partenariats solides avec ces acteurs clés, nous pouvons bénéficier de leurs ressources, de leur expertise et de leur réseau pour renforcer notre projet, favoriser sa réussite et accélérer sa croissance. Il est important de bien choisir nos partenaires en fonction de leur alignement avec nos objectifs, de leur réputation, de leurs compétences et de leur engagement envers la collaboration à long terme.

Chapitre 6

Plan financier

6.1 Les coûts et les charges

L'évaluation des coûts et charges est essentielle pour assurer la viabilité financière de notre projet. Il est important de prendre en compte tous les coûts et investissements nécessaires à sa réalisation, afin d'avoir une vision claire de la situation financière et de garantir une gestion efficace des ressources. Voici quelques points à considérer lors de l'estimation des coûts et charges [Cooper \(1990\)](#); [Miklosik et al. \(2019\)](#) :

- **Coûts liés au personnel :**

Les charges liées au personnel dans notre entreprise revêtent une importance particulière en raison de la nature hautement spécialisée de notre main-d'œuvre. Notre entreprise opère dans le domaine de l'intelligence artificielle et des technologies de pointe, ce qui signifie que nous dépendons d'une équipe d'experts en science des données, en intelligence artificielle, en développement logiciel et en recherche dans les fluides de forage. Les coûts associés à cette main-d'œuvre hautement qualifiée peuvent être significatifs, notamment en ce qui concerne les salaires compétitifs, les avantages sociaux, la formation continue et les incitations à la rétention du personnel. Cependant, ces charges sont essentielles pour maintenir notre position de leader dans le secteur et pour continuer à innover dans nos domaines d'expertise. Nous sommes déterminés à investir dans notre

équipe afin de garantir la qualité, l'efficacité et la compétitivité de nos solutions AI SaaS sur le marché en constante évolution de la technologie.

Les coûts estimés s'élèvent à 595 000 DZD par mois pour la première année, tandis qu'ils atteignent un total de 1 225 000 DZD par mois pour la deuxième année. Le tableau 6.1 illustre la répartition des coûts liés au personnel.

TABLE 6.1 – Coûts liés à la main-d'œuvre pour notre start-up.

Poste	Salaire Net (€)	Nombre	Année de Recrutement
Manager Général	100000	1	Année 1
Manager IT	90000	1	Année 1
Manager Commercial	90000	1	Année 1
Ingénieur en ML	80000	1	Année 1
Développeur Full Stack	80000	1	Année 1
UI/UX Designer	50000	1	Année 2
Expert-Comptable	75000	1	Année 1
Chercheur en <i>E&P</i>	80000	1	Année 1
Spécialiste en Fluides de Forage	80000	1	Année 2
Data Scientist	70000	+2	Année 2
Spécialiste Mud logging	60000	1	Année 2
Développeur	80000	2	Année 2
Spécialiste en Marketing	40000	1	Année 2
Ingénieur MLOps	100000	1	Année 2

• Coûts opérationnels :

Les coûts opérationnels d'une entreprise jouent un rôle crucial dans sa viabilité financière. En examinant de près ces dépenses, il est possible d'obtenir un aperçu clair de la santé financière de l'entreprise. Selon les données du tableau 6.2, le coût global des opérations de notre entreprise est estimé à environ 170 000 DZ par mois (sans les abonnements) . Cette somme comprend divers éléments tels que les coûts de location des locaux, les frais de maintenance et d'approvisionnement, ainsi que d'autres dépenses liées aux activités quotidiennes de l'entreprise. Une gestion efficace de ces coûts est essentielle pour assurer la rentabilité à long terme de l'entreprise, tout en maintenant la qualité des produits ou services offerts.

Le coût global (sans les salaires) est évalué à environ 400 000 Dz par mois.

Le tableau 6.2 illustre les frais et dépenses quotidiennes de notre stratup en DZD.

TABLE 6.2 – Frais et dépenses quotidiennes de notre stratup en DZD.

Dépense	Montant	Fréquence
Location	70000	Mensuel
Marketing sur les réseaux sociaux	4000	Mensuel
Présence dans les événements	300 000	Trimestriel
Abonnement LinkedIn Premium (x2)	80(€)	Mensuel
Frais de communication et Électricité	1600	Trimestriel
Consommables divers	10000	Trimestriel
Frais de voyages et de déplacements	20000	Mensuel
Réunions avec les parties prenantes	20000	Semestriel
Frais de collecte de fonds	20000	Mensuel
Abonnement G Suite	Variable	Mensuel
Abonnement Gitlab	Variable	Mensuel
Abonnement outils GL	Variable	Mensuel
Licence JetBrains	Variable	Mensuel
Licence Adobe	Variable	Mensuel
Microsoft Azure	Variable	Trimestriel
CRM	Variable	Mensuel
Frais administratifs et juridiques	Variable	Mensuel
Goodies (cahiers, etc.)	Variable	Trimestriel
Hébergement de site web	50(€)	Annuel
Entretien et réparations	10000	Mensuel

- **Investissements en équipement :**

Notre projet nécessite l'acquisition d'équipements spécifiques, tels que des serveurs informatiques, des dispositifs de stockage de données ou des équipements de laboratoire, il est important d'inclure ces coûts dans notre évaluation. Nous devons estimer les coûts d'achat, d'installation et de maintenance de ces équipements, ainsi que leur durée de vie et les éventuelles mises à niveau ou remplacements nécessaires.

TABLE 6.3 – Le capital investi dans notre start-up en Millions DZD.

Actif	Montant (€)	Quantité	Année d'Acquisition
Voiture : Citroen Jumpy	6	1	Année 1
Ordinateurs de Bureau	0.25	24	Année 2
Imprimante Laser	0.06	1	Année 2
Station de Travail Dell Precision	1	1	Année 2
Equipement informatique	0.2	1	Année 2
Cafetière	Variable	Variable	Variable
Décoration et presentation Bureau	Variable	Variable	Variable

- **Charges financières :**

Il est important de prendre en compte les charges financières telles que les coûts liés aux services comptables et juridiques, ainsi que les impôts et taxes applicables. Ces charges doivent être évaluées pour assurer une planification financière adéquate et minimiser les risques liés aux obligations financières [Whatls.com \(2023\)](#).

En évaluant minutieusement les coûts et charges associés à notre projet, nous serons en mesure de déterminer les besoins financiers globaux et de planifier efficacement l'allocation des ressources. Une estimation précise des coûts et charges nous aidera également à établir un budget réaliste, à identifier les sources de financement potentielles et à évaluer la rentabilité du projet à long terme. Il est important de réviser régulièrement ces estimations afin de les adapter aux évolutions du marché et aux besoins du projet.

6.1.1 Les modes et sources d'obtention de financement appropriés :

Afin de réaliser avec succès nos applications basées sur l'IA pour prédire les paramètres des fluides de forage, il est essentiel de déterminer les modes et sources d'obtention de financement appropriés. Voici quelques options à considérer [CFI.com \(2023\)](#); [BDC.com \(2023\)](#) :

- **Financement interne :**

Nous pouvons envisager d'utiliser des ressources financières internes, telles que des fonds propres ou des bénéfices réinvestis, pour financer une partie ou la totalité du projet. Cette approche peut offrir une plus grande indépendance et un contrôle accru sur les décisions financières, mais il est important d'évaluer si les ressources internes sont suffisantes pour couvrir les coûts du projet.

- **Subventions et programmes de financement publics :**

Nous pouvons rechercher des subventions gouvernementales, des programmes de financement publics ou des initiatives de soutien aux startups technologiques. Ces sources de financement peuvent être spécifiquement destinées aux projets d'innovation ou axées sur des secteurs spécifiques tels que l'IA ou l'industrie pétrolière. Il est important de suivre les appels à projets et de soumettre une candidature solide qui met en valeur le caractère novateur de notre application et son impact potentiel.

- **Investisseurs privés et capital-risque :**

Nous pouvons envisager de rechercher des investisseurs privés ou des sociétés de capital-risque intéressées par les technologies émergentes et l'IA. Ces investisseurs peuvent apporter non seulement des ressources financières, mais aussi des connaissances et des réseaux dans le domaine de l'IA et de l'industrie pétrolière. Il est important de préparer un dossier de présentation convaincant et de mener des négociations équitables pour garantir que les intérêts de notre startup sont préservés.

Il est important de noter que le choix du mode et des sources de financement dépendra de divers facteurs tels que la taille du projet, la maturité de notre startup, le niveau de risque et les objectifs financiers à long terme. Il peut également être bénéfique de combiner différentes sources de financement pour réduire les risques et maximiser les opportunités de réussite. Il est recommandé de travailler en étroite collaboration avec des experts financiers et des conseillers juridiques pour structurer efficacement les modalités de financement et s'assurer de la viabilité financière de notre projet.

6.1.2 L'obtention d'un remboursement

La question de l'obtention d'un remboursement ou d'un retour sur investissement est cruciale pour la réussite de notre application IA pour prédire les paramètres des fluides de forage. Voici quatre éléments importants à prendre en compte pour atteindre cet objectif [Faster-capital.com](https://www.faster-capital.com) (2023) :

- **Modèle économique solide :**

Il est essentiel de développer un modèle économique solide qui permettra de générer des revenus et d'assurer la rentabilité de notre application IA. Cela peut être réalisé en proposant un modèle de tarification compétitif et attractif pour les utilisateurs, en offrant des services à valeur ajoutée supplémentaires, ou en adoptant un modèle d'abonnement ou de licence pour l'utilisation de notre application. Il est également important de prendre en compte les coûts associés à la maintenance, aux mises à jour et au support technique afin de garantir une expérience utilisateur optimale.

- **Acquérir une base d'utilisateurs solide :**

Pour obtenir un retour sur investissement, il est crucial d'acquérir une base d'utilisateurs solide et fidèle à notre application IA. Cela peut être réalisé en mettant en place des stratégies de marketing et de communication efficaces pour promouvoir notre solution, en ciblant les acteurs clés de l'industrie pétrolière et gazière, et en démontrant la valeur ajoutée et les avantages compétitifs de notre application. La création d'une relation de confiance avec les utilisateurs et la fourniture d'un excellent service client peuvent également favoriser la fidélité des utilisateurs et encourager le bouche-à-oreille positif.

- **Partenariats stratégiques :**

Les partenariats stratégiques peuvent jouer un rôle crucial dans la réalisation du succès financier de notre application IA. En établissant des partenariats avec des entreprises, des fournisseurs de données, des laboratoires ou d'autres acteurs clés de l'industrie, nous pouvons accéder à de nouvelles sources de revenus et à des opportunités de croissance. Ces partenariats peuvent prendre la forme de collaborations de recherche et développement, de partage de données ou de

distribution conjointe. En développant des relations solides avec des partenaires clés, nous pouvons renforcer notre position sur le marché et maximiser notre potentiel de remboursement.

- **Expansion géographique :**

Pour maximiser le retour sur investissement, il peut être judicieux de considérer l'expansion géographique de notre application IA pour prédire les paramètres des fluides de forage. En identifiant de nouveaux marchés potentiels et en adaptant notre solution aux besoins spécifiques de ces marchés, nous pouvons accéder à de nouvelles sources de revenus et augmenter notre potentiel de remboursement. Cela peut nécessiter des investissements supplémentaires pour la localisation, la traduction, l'adaptation réglementaire et la création de partenariats locaux, mais cela peut également ouvrir de nouvelles opportunités de croissance et de rentabilité.

En mettant en œuvre ces stratégies et en ayant une approche globale pour obtenir un remboursement, nous maximisons nos chances de succès financier et assurons la pérennité de notre application IA pour prédire les paramètres des fluides de forage. Il est important de surveiller régulièrement les performances financières, d'ajuster notre stratégie si nécessaire et de rester à l'écoute des besoins changeants des utilisateurs et du marché pour assurer un retour sur investissement optimal.

6.2 Le chiffre d'affaires

Le chiffre d'affaires joue un rôle crucial dans le succès financier de notre startup et de nos applications IA. Il représente la somme totale des revenus générés par les ventes de nos produits et services. Pour calculer le chiffre d'affaires, il est essentiel de prendre en compte tous les revenus provenant des ventes, tels que les licences d'utilisation, les abonnements, les services supplémentaires et les contrats spécifiques [Paddle.com \(2023\)](#).

L'augmentation du chiffre d'affaires est un objectif important pour notre startup, car cela reflète la croissance de notre activité et notre capacité à générer des revenus.

Pour atteindre cet objectif, il est crucial d'adopter des stratégies de vente efficaces, telles que la segmentation du marché, la tarification compétitive et la gestion des relations client. Nous devons identifier les segments de marché les plus rentables, comprendre les besoins et les attentes de nos clients cibles, et développer des offres adaptées pour répondre à ces besoins [Faster.com \(2023\)](#).

En optimisant notre chiffre d'affaires, nous pouvons renforcer notre position concurrentielle, investir dans la recherche et le développement, améliorer notre infrastructure et soutenir la croissance globale de notre startup. Il est essentiel de surveiller régulièrement notre chiffre d'affaires, d'évaluer notre performance par rapport à nos objectifs et de mettre en place des stratégies d'ajustement si nécessaire. En mettant l'accent sur une croissance rentable et durable du chiffre d'affaires, nous pouvons assurer la viabilité financière à long terme de notre startup et maximiser la valeur pour nos parties prenantes.

6.2.1 La présentation de deux scénarios :

Le chiffre d'affaires attendu pour notre application IA de prédiction des paramètres des fluides de forage peut être estimé en présentant deux scénarios : le scénario optimiste et le scénario pessimiste. Ces scénarios permettent d'évaluer les différentes perspectives de revenus et d'anticiper les résultats financiers potentiels de notre startup [Jenkins et al. \(2020\)](#).

Dans le scénario optimiste, nous prenons en compte les facteurs qui peuvent favoriser une forte demande pour notre application IA. Cela peut inclure une adoption rapide par les entreprises pétrolières, une augmentation des besoins en optimisation des fluides de forage, une stratégie de marketing efficace et une réception positive du marché. Dans ce scénario, nous estimons que le chiffre d'affaires sera à son maximum, avec une augmentation significative des ventes, des licences d'utilisation et des contrats de service.

Ainsi, le chiffre d'affaire total s'élève à 2,5 millions de dinars pour la première année et à 40 millions de dinars pour la deuxième année.

En revanche, dans le scénario pessimiste, nous prenons en compte les risques et les

TABLE 6.4 – Chiffre d’affaire - scénario optimiste - unité 1 million Dz

Produit/Service	Prix Unitaire (€)	Volume Annuel	Année de Lancement
LMC beta	2.50	1	Année 1
LMC	3.5	6	Année 2
VL	15	2	Année 2
DFO	10	1	Année 2

Année	LMC beta	LMC	VL	DFO	chiffre d’affaires (million DA)
1	2,5	0	0	0	2,5
2	0	21	30	10	61
3	0	35	75	20	130

obstacles potentiels qui pourraient affecter la demande de notre application IA. Cela peut inclure une lente adoption du marché, une concurrence accrue, des contraintes budgétaires chez les entreprises pétrolières ou une réception moins favorable du marché. Dans ce scénario, nous estimons que le chiffre d’affaires sera à son minimum, avec une croissance plus lente des ventes et des revenus plus limités.

TABLE 6.5 – Chiffre d’affaire - scénario pessimiste - unité 1 million Dz

Produit/Service	Prix Unitaire (€)	Volume Annuel	Année de Lancement
Lab MC beta	2.5	0	Année 1
Lab MC	3.5	3	Année 2
VL	15	1	Année 2
DFO	10	1	Année 2

Ainsi, le chiffre d’affaires total s’élève à zéro pour la première année et à 25 millions de dinars pour la deuxième année.

L’établissement de ces deux scénarios nous permet de mieux comprendre les différentes situations possibles et de prendre des décisions éclairées en matière de planification financière et de gestion des risques. Il est important de considérer les facteurs internes et externes qui peuvent influencer le chiffre d’affaires, tels que la demande du marché, la concurrence, les tendances de l’industrie et les conditions économiques générales.

En évaluant les deux scénarios, nous pouvons élaborer des stratégies pour maximiser le chiffre d’affaires dans le scénario optimiste tout en étant préparés à faire face aux

défis et aux ajustements nécessaires dans le scénario pessimiste. Cela nous permet d'élaborer des plans financiers réalistes, d'allouer les ressources de manière appropriée et de mettre en place des mesures d'atténuation des risques.

En conclusion, présenter les deux scénarios du chiffre d'affaires attendu pour nos applications IA nous aide à mieux comprendre les perspectives financières de notre startup. Cela nous permet d'adopter une approche proactive dans la planification et la gestion financière, en nous adaptant aux différentes situations possibles et en maximisant les opportunités de croissance et de rentabilité.

6.3 Les comptes de résultats escomptés

6.3.1 Les ventes réalisées et charges engagées :

Les comptes de résultats escomptés sont un outil financier essentiel pour évaluer la performance et la rentabilité de notre startup basée sur l'IA pour la prédiction des paramètres des fluides de forage. Ce tableau récapitule les ventes réalisées ainsi que les charges engagées au cours d'une année comptable, fournissant un aperçu clair des résultats financiers attendus [Legalstart.com](https://www.legalstart.com) (2023).

TABLE 6.6 – Comptes de Résultat Prévisionnels 1ère année - Sénario optimiste

Poste de revenus	Montant (en DZ)
Vente LMC beta	2 500 000
Coûts des ventes LMC beta	-480 000
Marge brute	2 020 000
Frais d'exploitation (3 mois)	-600 000
Salaires nets (3 mois)	-1 785 000
IRG - Saliare moyen 85 000 DZD	-339 000
Perte avant impôts	-704 000
Impôts sur les bénéfices	0
Autres Impôts	-200 000
Résultat net (perte)	-904 000

Dans les comptes de résultats escomptés, la première ligne représente les ventes totales de notre application IA. Cela inclut les revenus générés par les ventes de

TABLE 6.7 – Comptes de Résultat Prévisionnels 2ère année - Scénario optimiste

Poste de revenus	Montant (en DZ)
Ventes LMC	21 000 000
Coûts des ventes LMC	-2 880 000
Marge brute LMC	18 120 000
Ventes VL	30 000 000
Coûts des ventes VL	-2 000 000
Marge brute VL	28 000 000
Ventes DFO	10 000 000
Coûts des ventes DFO	-1 000 000
Marge brute DFO	9 000 000
Marge brute	55 120 000
Frais d'exploitation (12 mois)	-4 800 000
Salaires nets (12 mois)	-14 700 000
IRG - Saliare moyen 76 500 DZD	-3 158 400
Bénifice avant impôts	32 462 000
Impôts sur les bénéfiques	8 440 120
Autres Impôts	-400 000
Résultat net (Bénifice)	23 620 000

licences d'utilisation, les contrats de service et toute autre source de revenus liée à notre activité. Les ventes sont généralement basées sur une projection des ventes réalisables en fonction de l'adoption prévue de notre solution par le marché.

Ensuite, nous présentons les différentes charges qui doivent être prises en compte pour déterminer le bénéfice ou la perte de notre startup. Les charges incluent les dépenses de marketing et de vente, les frais généraux, les salaires et les charges sociales, ainsi que d'autres dépenses opérationnelles. Il est important de détailler chaque poste de charge afin d'obtenir une vision claire des coûts associés à notre activité.

Après avoir soustrait les charges des ventes, nous obtenons le bénéfice ou la perte brut. Ce montant représente la différence entre les ventes et les coûts directs liés à la production de notre application IA. Le bénéfice brut est un indicateur clé de la rentabilité de notre activité.

Enfin, nous déduisons les charges indirectes telles que les frais administratifs, les charges financières et les impôts pour obtenir le bénéfice net ou la perte nette. Ce montant final reflète le résultat financier global de notre startup, qui peut être positif

(bénéfice) ou négatif (perte).

Les comptes de résultats escomptés sont un outil précieux pour la planification financière et la prise de décision. Ils nous permettent d'estimer les résultats financiers potentiels de notre activité, d'évaluer notre rentabilité et de mettre en évidence les domaines qui peuvent nécessiter des ajustements ou des améliorations. Ces informations sont essentielles pour guider nos stratégies et nos actions afin de maximiser la performance de notre startup et d'atteindre nos objectifs financiers.

Dans le scénario optimiste, où nous vendons notre version bêta du "Lab Mud Calculator" pour 2,5 millions de dinars algériens, le solde commercial du dernier trimestre (et donc de l'année dans son ensemble) serait déficitaire de 3,46 millions de dinars, dont 3,5 millions pour la voiture utilisée dans les opérations de vente, 510 000 dinars de dépenses mensuelles (170 000 par mois) et 1,95 million de salaires (650 000 par mois).

En revanche, dans le scénario pessimiste, c'est-à-dire si nous ne vendons aucun produit cette année, le solde serait déficitaire de 5,96 millions de dinars.

6.3.2 Le besoin en fonds de roulement (BFR) :

Le calcul du besoin en fonds de roulement (BFR) est essentiel pour évaluer les besoins financiers de notre startup basée sur l'IA pour la prédiction des paramètres des fluides de forage. Le BFR est une mesure du capital de travail nécessaire pour faire fonctionner notre entreprise de manière fluide et pour équilibrer les flux de trésorerie entrants et sortants [Legalstart.com](https://www.legalstart.com) (2023).

Pour calculer le BFR, nous prenons en compte différents éléments financiers, tels que les stocks, les créances clients et les dettes fournisseurs. Ces éléments représentent les besoins en liquidités de notre entreprise à court terme et nous aident à gérer nos flux de trésorerie.

Le calcul du BFR nous permet de comprendre nos besoins en liquidités à court terme et de prendre des décisions financières éclairées. Il nous aide à évaluer notre capacité à faire face à nos obligations financières, à gérer nos flux de trésorerie et à maintenir notre activité opérationnelle de manière rentable. En surveillant régulièrement notre BFR,

nous pouvons ajuster nos politiques de crédit, de gestion des stocks et de paiement afin d'optimiser notre performance financière et de garantir la pérennité de notre startup.

Dans le scénario optimiste, nous devons avoir 3.46 million Dz, dans l'autre scénario, nous devons avoir 5.96 million Dz.

6.4 Le plan de trésorerie

Le plan de trésorerie est un outil essentiel dans la gestion financière de notre startup basée sur l'IA pour la prédiction des paramètres des fluides de forage. Il nous permet d'identifier et de prévoir toutes les recettes et toutes les dépenses prévues au cours de la première année d'activité.

Dans le plan de trésorerie, nous commençons par lister toutes les sources de revenus prévues, telles que les ventes de produits ou services, les contrats avec des clients, les investissements, etc. Nous évaluons ensuite les montants et les périodes de ces recettes afin d'estimer les flux de trésorerie entrants.

En parallèle, nous identifions également toutes les dépenses prévues, y compris les coûts de production, les frais généraux, les salaires, les investissements, les remboursements d'emprunts, les taxes, etc. Nous évaluons les montants et les périodes de ces dépenses pour estimer les flux de trésorerie sortants.

Le plan de trésorerie nous permet de visualiser et de prévoir l'évolution de notre position de trésorerie au fil du temps. Il nous aide à identifier les périodes de surplus de trésorerie et les périodes de déficit, ce qui nous permet de prendre des mesures appropriées pour gérer nos liquidités.

Grâce à ce plan, nous pouvons anticiper les besoins en financement ou les opportunités d'investissement. Nous pouvons également évaluer notre capacité à faire face à nos obligations financières et à maintenir un niveau de trésorerie adéquat pour soutenir nos opérations quotidiennes.

En résumé, le plan de trésorerie est un outil précieux pour la gestion financière de notre startup. Il nous permet d'anticiper et de contrôler nos flux de trésorerie, d'identifier les sources de revenus et les dépenses, et de prendre des décisions éclairées

pour garantir la santé financière de notre entreprise. En surveillant régulièrement notre plan de trésorerie, nous pouvons ajuster nos stratégies et nos activités afin de maintenir une position de trésorerie solide et d'assurer la continuité de notre startup.

TABLE 6.8 – cash flow en millions centimes DA

Année	0	1	2	3
I0	-2250			
CA		250	6100	13000
Dépenses		300	1869	3231
Amort.		0	200	242
Rav.Imp	-225	-50	4031	9527
Impôt		-15	1209,3	2858,1
FNT	-225,00	-35,00	3 021,50	6 910,90
Cumul	-225	-260	2761,5	9672,4

6.4.1 Le délai de récupération du capital investi (DR)

Le délai de récupération du capital investi est la date à laquelle le cumul des cash-flows nets (Flux Nets de Trésorerie) est égal au montant de l'investissement initial en utilisant les données du tableau on trouve que le délais de récupération est égale à 1.09 an

6.4.2 Le taux moyen de rentabilité (TMR)

il est calculé comme la moyenne des cash-flows par unité monétaire investie D'après les données du tableau on trouve que Le TMR vaut 146,6%

Chapitre 7

Prototype expérimental

Le prototype expérimental est une étape essentielle dans le développement d'un produit ou d'un service au sein de notre startup. Il s'agit de la version initiale du produit ou du service, créée dans le but de tester et de valider les fonctionnalités, les performances et l'expérience utilisateur avant de passer à la version finale.

La création d'un prototype expérimental nous permet de donner une forme tangible à notre vision et de mieux comprendre les implications pratiques de nos idées. Cela permet également de recueillir des retours d'utilisateurs potentiels, d'identifier les points forts et les points faibles du concept et d'apporter des améliorations.

Une fois le prototype expérimental créé, il est soumis à des tests et des évaluations approfondis. Nous recueillons des données et des retours d'utilisateurs pour comprendre les aspects à améliorer, les ajustements nécessaires et les fonctionnalités manquantes. Ces informations sont utilisées pour affiner et optimiser le produit ou le service avant de passer à la phase de développement de la version définitive.

Conception et développement d'un prototype de l'intelligence artificielle (IA) :

Le prototype d'IA que nous avons développé repose sur un système multi-agents IA, chaque agent représente une entité autonome capable de prendre des décisions en

fonction des informations qu'il reçoit de son environnement et de ses objectifs. Ces agents interagissent de manière intelligente pour atteindre des objectifs spécifiques au sein de notre solution. Ces Agents utilisent des modèles prédictifs ML ou DL, Le système multi-agent est basé sur une architecture soigneusement conçue. L'architecture de ce système est hautement confidentielle en raison de sa nature innovante et de son application dans un contexte stratégique. Nous travaillons sur une structure qui permettra à ces agents de collaborer de manière efficace tout en maintenant la confidentialité et la sécurité des données. L'objectif de ce système est de réaliser des prédictions précises et fiables concernant les concentrations de formulation dans le système du Laboratory Mud Calculator (LMC) ainsi que des prédictions sur les paramètres des fluides de forage pour le système Virtual Laboratory (VL).

Cette approche multi-agents permet une meilleure représentation des interactions complexes entre les différentes composantes des fluides de forage. Chaque agent, se spécialise dans la prédiction de certaines caractéristiques ou propriétés des fluides, et ils collaborent pour fournir des prédictions globales et cohérentes. Cette architecture flexible nous permet d'intégrer de nouveaux modèles ou de mettre à jour les modèles existants pour améliorer les performances du système au fil du temps.

En résumé, notre prototype d'IA repose sur une approche multi-agents pour les prédictions liées aux fluides de forage, offrant ainsi une solution puissante et adaptable pour répondre aux besoins complexes de notre industrie.

Dans le cadre de notre prototype, nous présenterons deux modèles essentiels qui seront utilisés par ces agents IA pour prendre des décisions éclairées. Cependant, nous fournirons une méthodologie complète sur le développement de ces modèles, y compris les étapes de collecte des données, d'entraînement, d'évaluation et d'optimisation, tout en garantissant que les informations sensibles restent protégées.

7.1 Développement des modèles ML :

La création d'un prototype pour notre IA multi-agents implique le développement de modèles de machine learning prédictifs. Ce processus comprend plusieurs étapes

cruciales. Dans un premier temps, nous procédons à une analyse approfondie des besoins et des exigences du projet afin d'établir une base solide pour la conception de modèles. Ensuite, nous passons à la conception des modèle IA, en sélectionnant les algorithmes appropriés et en définissant les paramètres et les fonctionnalités clés.

Une fois la conception terminée, nous procédons à l'acquisition des données nécessaires pour entraîner le modèle. Nous collectons des données historiques des opérations de forage, y compris les caractéristiques du fluide de forage, les paramètres de la formation géologique et les résultats observés. Ces données doivent être significatives en termes de volume et refléter fidèlement les situations réelles auxquelles notre IA sera exposée.

La dernière étape consiste à entraîner le modèle IA en utilisant l'ensemble de données préparé. Nous ajustons les paramètres du modèle, effectuons des itérations et évaluons les performances jusqu'à ce que nous obtenions des résultats satisfaisants. Une fois le modèle entraîné, nous le validons en utilisant des données de validation indépendantes c-à-d des données de test. Si nécessaire, nous apportons des ajustements pour améliorer les performances. Enfin, nous déployons le prototype, en mettant en place une interface utilisateur conviviale pour permettre aux utilisateurs d'interagir avec notre application IA et d'obtenir des prédictions en temps réel.

7.1.1 Définitions des objectifs :

L'objectif principal des modèles de machine learning (ML) dans notre solution est de réaliser des prédictions précises concernant les paramètres et les formulations des fluides de forage, qui seront utilisées par notre système multi-agents intelligent. Dans ce contexte, nous allons présenter deux exemples de modèles. Le premier modèle vise à prédire les concentrations des différents composants, tels que le diesel, l'eau, le sel, la saumure, le barytine et le carbonate de calcium, dans le but de maintenir une formulation dans les paramètres souhaités. Le deuxième modèle est axé sur la virtualisation de la machine de déplacement, qui fournit des informations sur les dommages potentiels causés à la roche réservoir par le fluide de forage.

Pour atteindre ces objectifs, nous prenons en compte les caractéristiques (features)

pertinentes pour chaque modèle. Nous cherchons à obtenir des scores R^2 satisfaisants tout en minimisant les erreurs de prédiction. Les métriques de performance que nous utilisons pour évaluer ces modèles incluent le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (MSE), l'erreur absolue moyenne (MAE), et d'autres indicateurs de précision.

Ces modèles sont cruciaux pour optimiser les formulations de fluides de forage, garantir leur conformité aux spécifications requises, et évaluer les risques potentiels pour la roche réservoir. Ils contribuent ainsi à améliorer l'efficacité et la sécurité des opérations de forage tout en réduisant les coûts associés.

7.1.2 Collecte et Préparation des Données

La première étape cruciale de la collecte des données initiales pour entraîner notre modèle de prototype basé sur l'**IA** que ce soit **ML** ou **DL** a été réalisée en collaboration avec la société **DFSP** et le **CRD-Sonatrach**. Cependant, ces données initiales étaient assez complexes, comportant de nombreuses lacunes, telles qu'une quantité importante de valeurs manquantes, des données erronées et même des valeurs aberrantes (outliers).

Voici un exemple illustré dans la figure 7.1 des données que nous avons recueillies pour les tests de déplacement, notamment la perméabilité de retour.

Le deuxième exemple, illustré dans la Figure 7.2, présente des données de formulations effectuées en laboratoire.

En raison de la confidentialité entourant ces données, nous ne sommes pas en mesure de les présenter de manière plus détaillée ni d'expliquer leur utilité de manière approfondie.

Cellule A		boue (H/E) = (95/05)																			
Partial Core Length #3 (cp)	Liquid A Viscosity (cp)	Liquid B Viscosity (cp)	Liquid C Viscosity (cp)	Liquid A Density (g/ml)	Liquid B Density (g/ml)	Liquid C Density (g/ml)	FVF (ml/ml)	Liquid A FVF (ml/ml)	Liquid B FVF (ml/ml)	Liquid C FVF (ml/ml)	Pump Rate (ml/min)	Injection Flow Rate (ml/min)	Perm. Total (md)	Perm. Partial 1 (md)	Perm. Partial 2 (md)	Power law Index	De				
0	0.75	0.64	0.64	0.89	0.56	0.56	1.0156	1.0424	1.0424	1.0424	1.0426	1.0426	2.2	0.12	0.49						
112	115	-2.8	-0.3	-0.010322	2.6	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0	0	0	0	0	Nan					
50	53	-1.5	-0.3	0.541919	4.1	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.3369	0.3421	0	0	0	Nan					
221	223	-3.9	-0.2	-0.428481	3.5	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	11.1488	11.3227	0	0	0	Nan					
270	272	-4.2	-0.2	-0.469388	3.6	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	12.1015	12.2903	0	0	0	Nan					
315	310	2.4	-0.1	-0.330759	4.1	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.9811	0.9964	0	0	0	Nan					
435	313	115.2	-0.1	-0.769371	3.8	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	16.1107	16.362	0	0	0	Nan					
431	270	158	-0.1	-0.617107	4.4	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	4.4771	4.547	0	0	0	Nan					
453	234	212.6	0	-0.685285	4.3	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	2.7587	4.6646	0	0	0	Nan					
451	236	208.5	0	-0.619379	4.5	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.9179	0.9322	0	0	0	Nan					
450	207	237	0	-0.714828	4.5	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	1.0342	1.0503	0	0	0	Nan					
445	207	232.3	0	-0.648923	4.8	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.1586	0.1611	0	0	0	Nan					
450	207	238	0	-0.744372	4.5	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.2101	0.2133	0	0	0	Nan					
453	206	239.7	0	-0.708011	4.7	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.7941	0.8065	0	0	0	Nan					
448	206	237.2	0	-0.664831	5	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.8294	0.8423	0	0	0	Nan					
447	209	233.2	0	-0.630742	5.2	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.2674	0.2716	0	0	0	Nan					
447	206	234.1	0	-0.683012	5	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0958	0.0973	0	0	0	Nan					
447	209	232.4	0	-0.683012	5.1	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0733	0.0745	0	0	0	Nan					
445	206	234.8	0	-0.63756	5.1	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0491	0.0499	0	0	0	Nan					
446	210	231.6	0	-0.669376	5.2	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0594	0.0603	0	0	0	Nan					
445	210	230.8	0	-0.664831	5.1	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0414	0.0421	0	0	0	Nan					
445	209	230.8	0	-0.669376	5.2	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0311	0.0316	0	0	0	Nan					
444	211	230.7	0	-0.680739	5.2	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0515	0.0523	0	0	0	Nan					
446	210	230.6	0	-0.678467	5.2	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0189	0.0192	0	0	0	Nan					
445	211	230.6	0	-0.7421	5.2	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0105	0.0107	0	0	0	Nan					
445	209	232.2	0	-0.664831	5.2	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0059	0.006	0	0	0	Nan					
445	210	230	0	-0.723919	5.2	0.75	0.89	1.0424	1.0424	1.0424	0.0022	0.0022	0	0	0	Nan					

FIGURE 7.1 – Tableau de Données des Tests de Déplacement (Perméabilité de Retour)

6"										
257°F										
OBM										
95/5										
1,55 SG										
									9/5/2017	
	Mix Time, mins	Specs	Basic Formulation	Optimization1	Optimization2	Optimization3	Optimization4	Optimization5	Optimization6	Optimization 7
M3/M3			0.548	0.550	0.550		0.550	0.550	0.602	0.620
KG/M3			6.000	6.000	6.000		6.000	6.000	11.400	11.40
KG/M3			13.000	13.000	13.000		13.000	13.000	2.900	2.90
KG/M3				17.000			17.000	17.000	14.200	14.20
KG/M3										14.30
KG/M3			17.000		17.000					
KG/M3			11.00	9.50	9.50		5.70	2.50	28.50	12.50
KG/M3			25.0	25.0	25.0		25.0	25.0	25.0	25.0
M3/M3			0.030	0.030	0.030				0.033	0.033
KG/M3			10.800	10.80	10.80				11.650	11.660
KG/M3			41.54	41.57	41.57				44.800	44.640
KG/M2			981.37	982.46	982.46		620.87	620.87	623.00	623.00
KG/M3							366.07	366.07	300.69	304.08
F			250	250			250	250	250	257
hrs			16	16			16	16	16	16
S/D			D	D			D	D	D	D

FE - StartUp

FIGURE 7.2 – Tableau de Données des Formulations en Laboratoire

Dans le but de rendre ces données utilisables par les algorithmes d'apprentissage automatique (ML), nous avons initié une phase de préparation des données. Cette phase avait pour objectif de mettre en forme les données de manière à les rendre compréhensibles, utilisables par notre application d'IA, et également propices à des analyses ultérieures.

Analyse Exploratoire des Données

Par la suite, nous avons mené une analyse exploratoire des données (EDA) approfondie. Cette phase nous a permis de mieux comprendre la nature de nos données, de repérer des tendances, des corrélations et des schémas qui pourraient être pertinents pour nos modèles. L'EDA a été une étape cruciale pour guider la suite de notre processus de prétraitement.

Voici quelques exemples des analyses exploratoires de données (EDA) que nous avons effectuées, que ce soit en examinant la structure générale des données ou en plongeant plus profondément dans les caractéristiques individuelles. Cette étape a été réalisée pour les deux modèles : celui visant à prédire les concentrations de certains composants de la formulation, ainsi que pour le modèle de virtualisation de la machine de déplacement.

La figure 7.3 est un diagramme de chaleur (**heatmap**) qui offre une vue d'ensemble visuelle de nos données. Il nous permet de comprendre la structure globale de nos données et de repérer facilement l'abondance des valeurs manquantes, souvent représentées par "Not-a-Number" (**NaN**). Ces valeurs manquantes ont posé plusieurs contraintes pour notre application d'intelligence artificielle.

Le prétraitement de ces valeurs manquantes aura lieu pendant la phase prévue pour le prétraitement.

La Figure 7.4 représente un graphique de dispersion (scatter plot) qui est une méthode de visualisation graphique qui nous permet d'examiner simultanément la

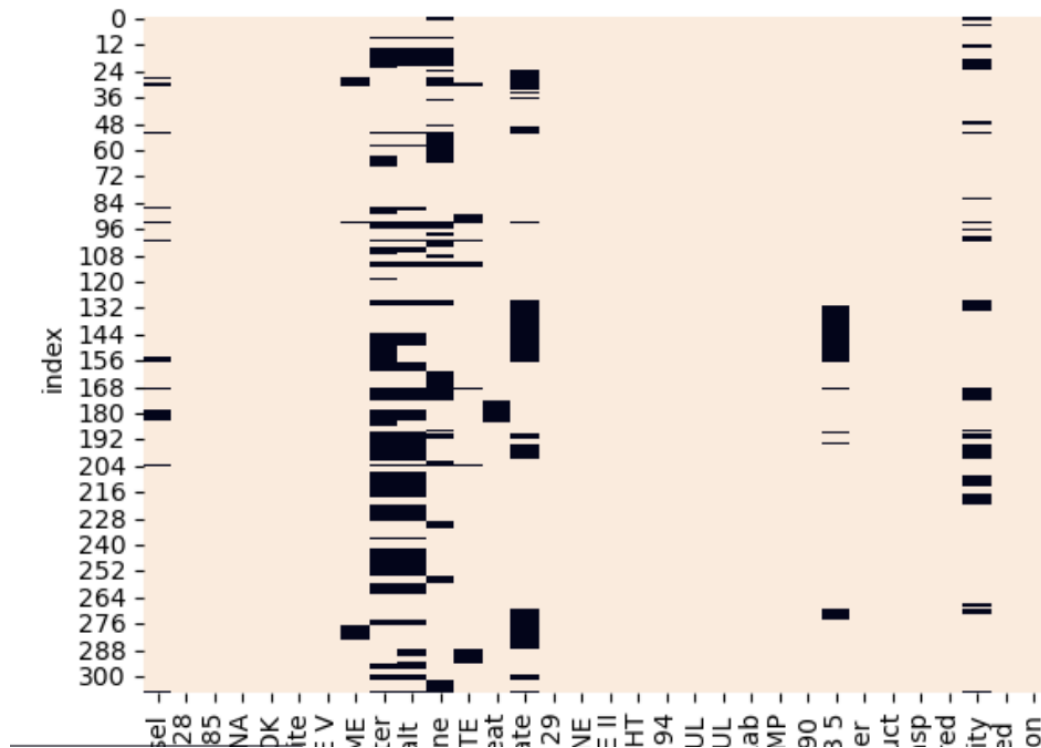


FIGURE 7.3 – Un diagramme de chaleur (**heatmap**) qui offre une représentation visuelle globale des données.

distribution de plusieurs variables. Cette technique s’avère particulièrement utile pour identifier les valeurs aberrantes, également connues sous le nom d’outliers, qui sont des points de données considérablement différents du reste de la distribution. La détection d’outliers est importante dans l’analyse de données, car ces points atypiques peuvent perturber les analyses statistiques et les modèles d’apprentissage automatique en introduisant du bruit ou en biaisant les prédictions. Une fois les outliers identifiés, il est nécessaire de décider de la manière de les traiter, que ce soit en les supprimant, en les corrigeant ou en les prenant en compte de manière spécifique dans l’analyse, en fonction du contexte de la tâche analytique.

Dans ce qui suit, nous explorerons plus en profondeur les corrélations entre les variables de notre ensemble de données en utilisant des visualisations telles que les matrices de corrélation. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre les relations entre les différentes caractéristiques des fluides de forage, ce qui est essentiel pour le processus d’optimisation que nous cherchons à mettre en œuvre.

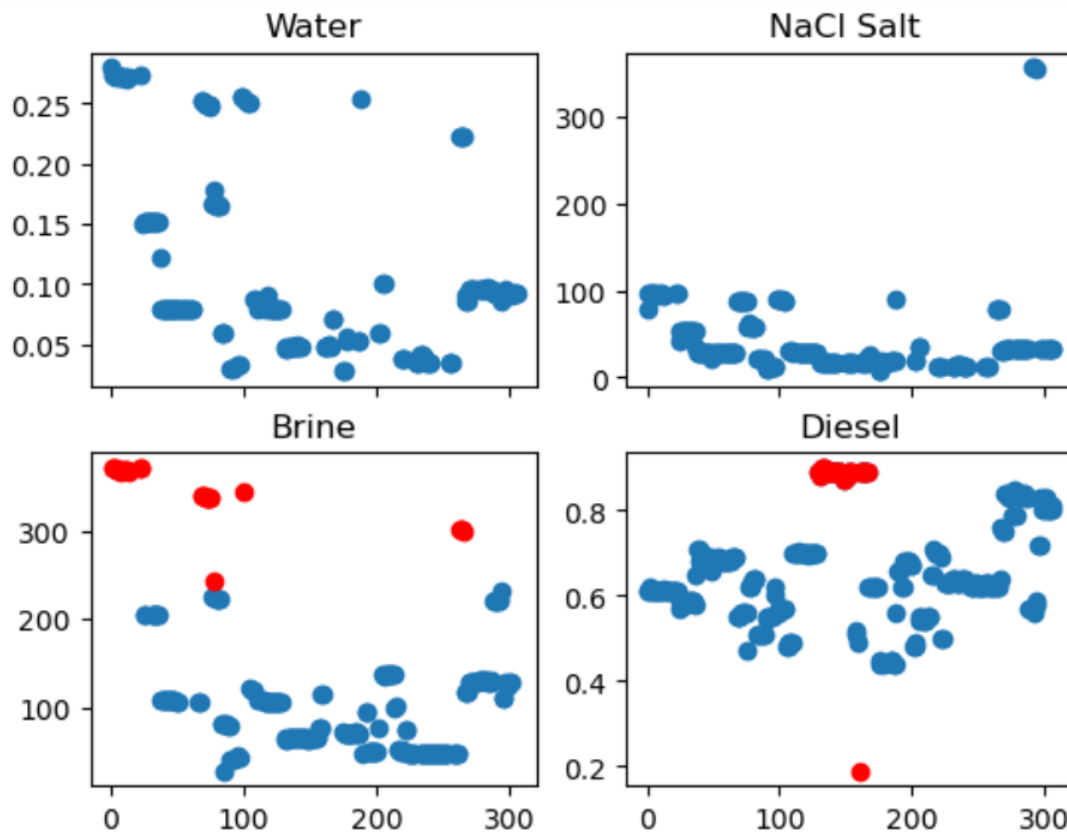


FIGURE 7.4 – Une scatter plot, qui représente la distribution de quelques variables.

La Figure 7.5 présente ce qu'on appelle un diagramme de chaleur, communément appelé "heatmap", qui offre une visualisation de la matrice de corrélations entre certaines variables. En examinant ce graphique, nous pouvons noter des relations importantes entre les variables. Par exemple, il est clair qu'il existe une corrélation notable entre les variables l'eau salée ("Brine") et l'eau ("Water"). En outre, une corrélation inverse significative peut être observée entre le rapport huile-eau ("Oil Water Ratio") (OWR) et l'eau ("Water"), ainsi qu'entre "OWR" et "Brine".

Cette méthode de visualisation est efficace pour évaluer la force et la direction des relations entre les variables. Lorsque deux variables sont fortement corrélées de manière positive, cela signifie que lorsque l'une augmente, l'autre tend également à augmenter, et vice versa. À l'inverse, une corrélation négative indique que lorsque l'une augmente, l'autre a tendance à diminuer, et vice versa.

Cette analyse de la matrice de corrélation est très importante pour identifier des relations potentielles entre les variables et peut aider à prendre des décisions éclairées dans l'analyse des données et la modélisation, en mettant en évidence les variables qui ont le plus d'influence les unes sur les autres.

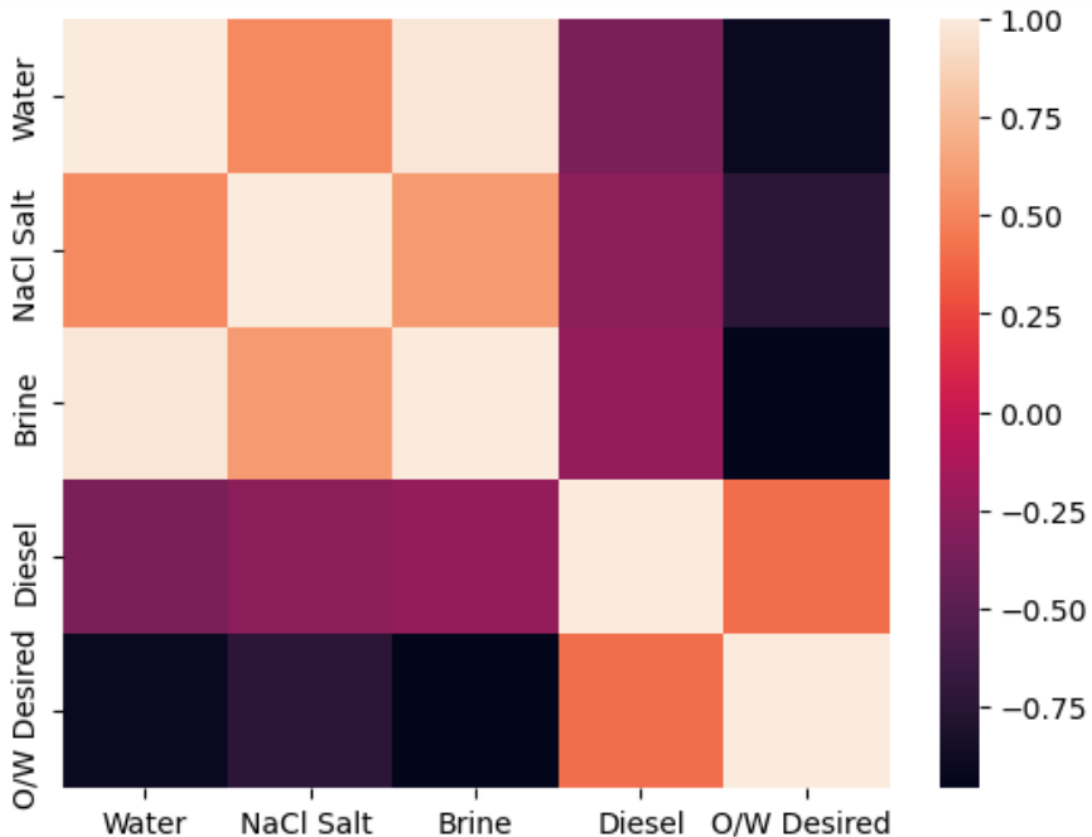


FIGURE 7.5 – Une heatmap, qui représente la matrice de corrélation entre certaines variables.

L'objectif principal de EDA est de comprendre et de révéler des informations clés à partir d'un ensemble de données en utilisant des techniques visuelles et statistiques. L'EDA permet de découvrir la structure des données, de détecter les valeurs aberrantes, d'identifier les corrélations entre les variables, de sélectionner les caractéristiques pertinentes relatant ainsi ces variables, de préparer les données pour des analyses ultérieures, de valider des hypothèses et de communiquer les résultats de manière efficace. En fin de compte, l'EDA fournit des bases solides pour la prise de décision

dans le domaine de l'exploration et de la modélisation des données, en aidant à dévoiler des connaissances importantes et à résoudre des problèmes complexes.

Prétraitement des données

Le prétraitement des données a constitué une étape essentielle de notre processus, nécessitant un effort substantiel. Nous avons consacré du temps à la réorganisation et à la préparation des données, en explorant diverses méthodes pour éliminer les valeurs manquantes NAN, corriger les erreurs et gérer les valeurs aberrantes. L'objectif principal était de garantir que les données entrant dans notre modèle soient bien organisées, créant ainsi une base solide pour nos analyses ultérieures.

Une autre phase essentielle du processus a été la sélection et l'ingénierie des caractéristiques (features) de nos données. Cela a impliqué de choisir avec soin les variables les plus pertinentes pour notre modèle tout en créant de nouvelles caractéristiques qui pourraient renforcer la capacité prédictive de notre modèle.

La démarche de prétraitement de données illustre notre démarche pour gérer les valeurs manquantes dans l'ensemble de données. Nous avons entrepris une série d'expérimentations en utilisant différentes méthodes de traitement des valeurs manquantes, puis nous avons comparé leurs effets sur la qualité du modèle prédictif. Pour évaluer l'impact de ces méthodes, nous avons utilisé un estimateur simple, en l'occurrence un arbre de décision (voir [Figure 7.6](#)). Cette approche nous a permis de déterminer la méthode de gestion des valeurs manquantes qui optimise les performances de notre modèle, garantissant ainsi que nos données soient prêtes pour des analyses plus avancées et des prédictions précises.

Il existe plusieurs méthodes d'imputation des données manquantes en utilisant des algorithmes de modélisation, telles que les interpolations et l'imputation KNN (k-nearest neighbors). Ce dernier (k-nearest neighbors) est un algorithme de classification et de régression utilisé en apprentissage automatique. Il repose sur le concept que les éléments similaires ont tendance à se regrouper dans un espace multidimensionnel

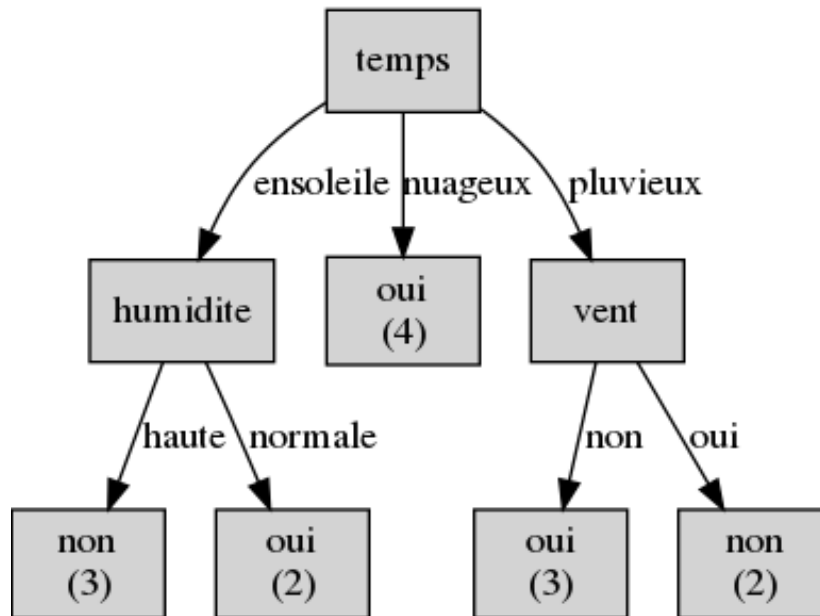


FIGURE 7.6 – l’arbre de décision utilisé comme estimateur dans le modèle.

comme le montre la [Figure 7.7](#) suivante :

Nous avons employé plusieurs méthodes pour gérer le problème des données manquantes dans notre ensemble de données. Voici un aperçu des méthodes que nous avons utilisées :

1. **Suppression des Données Manquantes** : Une approche consiste à supprimer toutes les lignes ou sections de données contenant des valeurs manquantes. Bien que cela simplifie le jeu de données, cela peut entraîner la perte d’informations potentiellement précieuses.
2. **Interpolation** : Les techniques d’interpolation sont utilisées pour imputer les valeurs manquantes au sein d’une section ou d’une séquence de données. Ces techniques estiment les valeurs manquantes en se basant sur les points de données disponibles avant et après les valeurs manquantes.
3. **Imputation KNN (Régression)** : L’imputation des voisins les plus proches (KNN) est une autre méthode où les valeurs manquantes dans une ligne sont

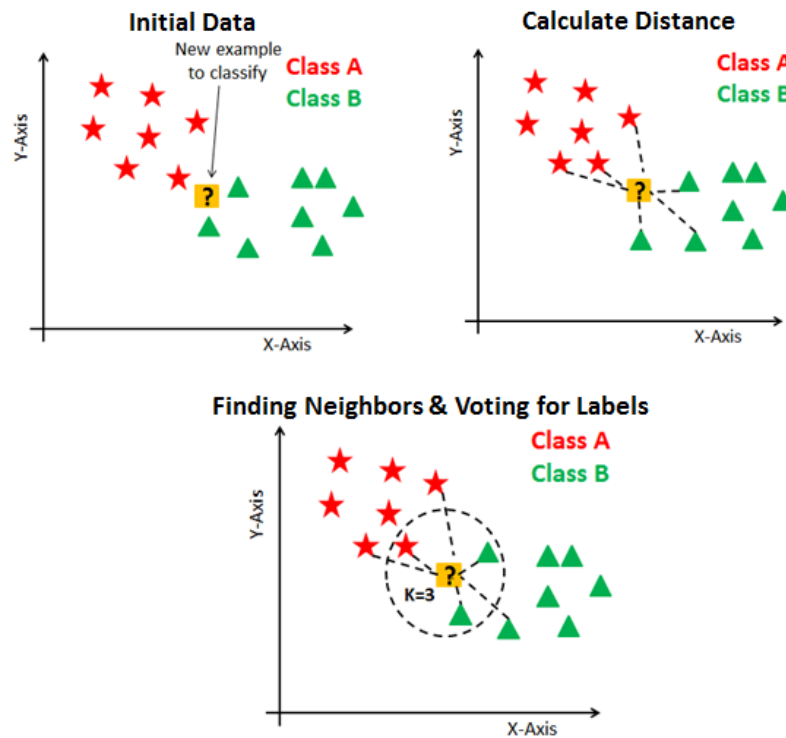


FIGURE 7.7 – L’algorithme KNN pour la classification des variables.

imputées en comparant cette ligne avec les lignes de ses K voisins les plus proches. Une régression est effectuée pour estimer les valeurs manquantes en fonction des valeurs des lignes voisines.

Les Figures 7.8a, 7.8b et 7.8c représentent respectivement les effets des trois méthodes de traitement des valeurs manquantes sur les dimensions des données d’entraînement et de test, ainsi que sur le coefficient de regression R_2 (score) du modèle de prédiction.

Il est à remarquer que la première méthode de prédiction a donné un coefficient de regression près de 0.98 par rapport aux deux autres qui ont donné respectivement 0.913 et 0.922.

Pour mieux visualiser les résultats et les effets des trois méthodes, les Figures 7.9a, 7.9b et 7.9c représentent respectivement les courbes de distribution des sorties réelles et des sorties prédites par le modèle prédictif pour les trois méthodes de gestion des valeurs manquantes.

trainsets shape : -----60 trainsets shape : -----115
 testsets shape : -----27 testsets shape : -----27

score : 0.9806908492157466

score : 0.9130325571200927

(a) Suppression des Données Manquantes

(b) Interpolation

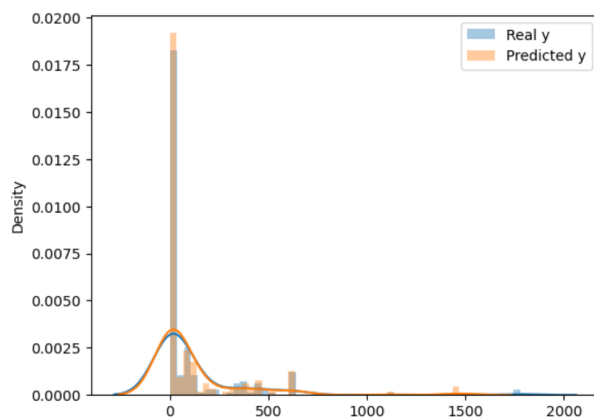
trainsets shape : -----215

testsets shape : -----27

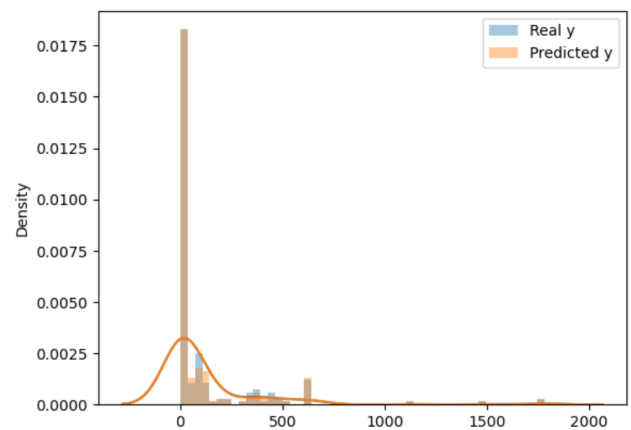
score : 0.9228985776464234

(c) Imputation KNN (Régression)

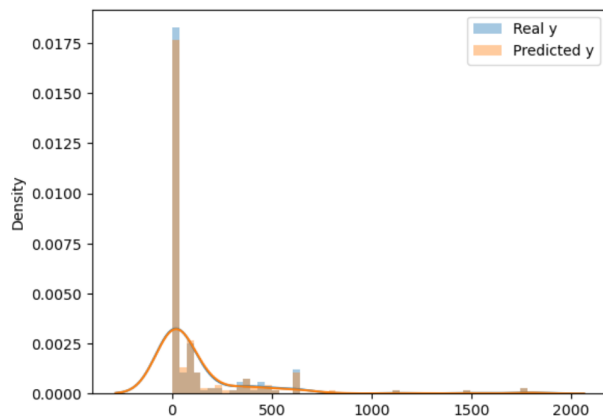
FIGURE 7.8 – Le résultat des trois méthodes de traitement des valeurs manquantes



(a) Suppression des Données Manquantes



(b) Interpolation



(c) Imputation KNN (Régression)

FIGURE 7.9 – Les courbes de distribution des sorties réelles et des sorties prédites par le modèle prédictif pour les trois méthodes de gestion des valeurs manquantes

Fractionnement des Données

Les données doivent être divisées en ensembles d'entraînement, de validation et de test. L'ensemble d'entraînement est utilisé pour former le modèle, l'ensemble de validation est utilisé pour régler les hyperparamètres du modèle, et l'ensemble de test est utilisé pour évaluer les performances finales du modèle.

1. **Ensemble d'Entraînement (Training Set)** : L'ensemble d'entraînement est la portion des données réservée à l'apprentissage du modèle. C'est sur cet ensemble que le modèle est exposé aux données et apprend à effectuer des prédictions. Plus l'ensemble d'entraînement est représentatif et diversifié, mieux le modèle pourra généraliser à de nouvelles données.
2. **Ensemble de Validation (Validation Set)** : L'ensemble de validation est utilisé pour régler les hyperparamètres du modèle et surveiller sa performance pendant l'entraînement. Les hyperparamètres sont des paramètres du modèle qui ne sont pas appris à partir des données, tels que la profondeur d'un arbre de décision ou le taux d'apprentissage d'un algorithme d'apprentissage automatique. En ajustant les hyperparamètres sur l'ensemble de validation, nous pouvons optimiser les performances du modèle.
3. **Ensemble de Test (Test Set)** : L'ensemble de test est réservé pour évaluer les performances finales du modèle, une fois qu'il a été formé et ajusté sur l'ensemble d'entraînement et de validation. Cet ensemble de données est essentiel pour estimer la capacité du modèle à généraliser à de nouvelles données non vues. Il fournit une évaluation impartiale de la performance réelle du modèle.

le fractionnement des données en ensembles d'entraînement et de validation peut être réalisé selon différentes méthodes, et l'une des méthodes les plus connues est la validation croisée (cross-validation en anglais). La validation croisée est une approche robuste pour évaluer la performance d'un modèle et pour ajuster les hyperparamètres.

K-Fold Cross-Validation : L'une des méthodes les plus courantes est la validation croisée en k-fold. Dans cette méthode, l'ensemble d'entraînement est divisé en k plis (folds) de taille égale. Le modèle est ensuite entraîné k fois. À chaque itération, l'un

des plis est utilisé comme ensemble de validation, tandis que les $k-1$ autres plis sont utilisés comme ensemble d'entraînement. Cela permet d'obtenir k estimations de la performance du modèle, qui sont ensuite moyennées pour obtenir une estimation globale.

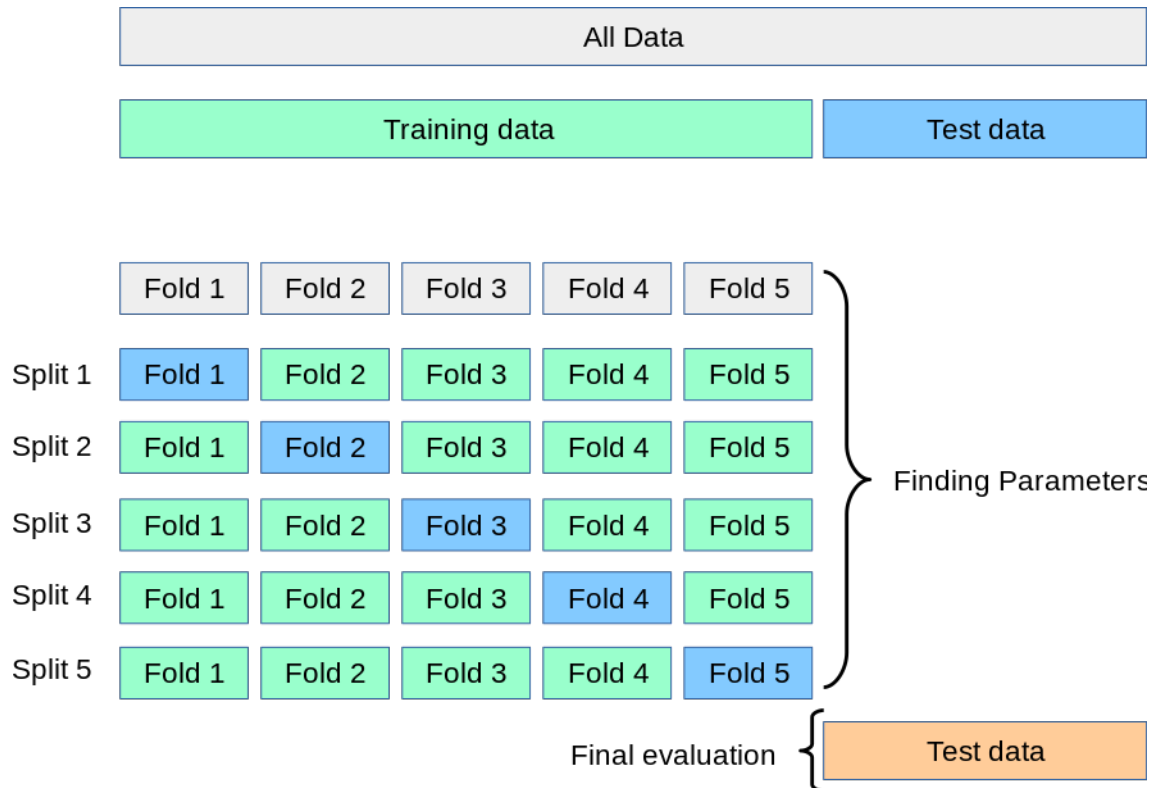


FIGURE 7.10 – La méthode de Cross Validation selon Scikit learn

En résumé, le processus de collecte des données initiales pour notre prototype a été une étape complexe, impliquant une organisation, une analyse exploratoire, un prétraitement approfondi, ainsi que des sélections et des améliorations des caractéristiques. Cette approche méticuleuse était essentielle pour garantir que notre modèle IA/ML soit alimenté par des données de haute qualité et puisse fournir des résultats fiables et précis.

7.1.3 Choix de l'Algorithme

Dans notre cas, nous utilisons des techniques de régression pour résoudre notre problème spécifique. Notre problème implique de prédire des valeurs continues ou numériques liées aux fluides de forage. Pour ce faire, nous explorons diverses méthodes de régression, en fonction de la complexité de la relation entre les caractéristiques spécifiques à notre domaine et la variable cible que nous cherchons à prédire.

Dans un premier temps, nous pouvons envisager d'utiliser la régression linéaire, qui établit une relation linéaire entre les caractéristiques d'entrée et la variable cible. Cette méthode est un bon point de départ pour comprendre les tendances de base de nos données.

Cependant, compte tenu de la nature complexe de notre domaine et de nos données, nous pourrions également explorer des méthodes plus avancées telles que les arbres de décision et les forêts aléatoires. Ces approches sont capables de capturer des relations non linéaires et de gérer des ensembles de données complexes.

De plus, étant donné que la qualité de la prédiction est cruciale, nous pourrions envisager d'utiliser des réseaux de neurones, en particulier des réseaux de neurones profonds, qui sont connus pour leur capacité à modéliser des relations hautement complexes. Cependant, ils peuvent nécessiter plus de données et de puissance de calcul.

Le choix de la méthode de régression dépendra de la nature précise de nos données, de la complexité de la relation que nous cherchons à modéliser et de nos objectifs de performance. Par conséquent, nous effectuerons des expérimentations approfondies pour déterminer quelle méthode de régression convient le mieux à notre problème de prédiction de valeurs dans le domaine des fluides de forage.

Régression Linéaire

La régression linéaire est une technique d'apprentissage supervisé qui vise à modéliser la relation linéaire entre une variable cible Y et un ensemble de variables explicatives X_1, X_2, \dots, X_p . Le modèle prend la forme suivante :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

où β_0 est l'intercept, β_i sont les coefficients de régression, et ε est le terme d'erreur. L'objectif est de trouver les coefficients β_i qui minimisent la somme des carrés des résidus.

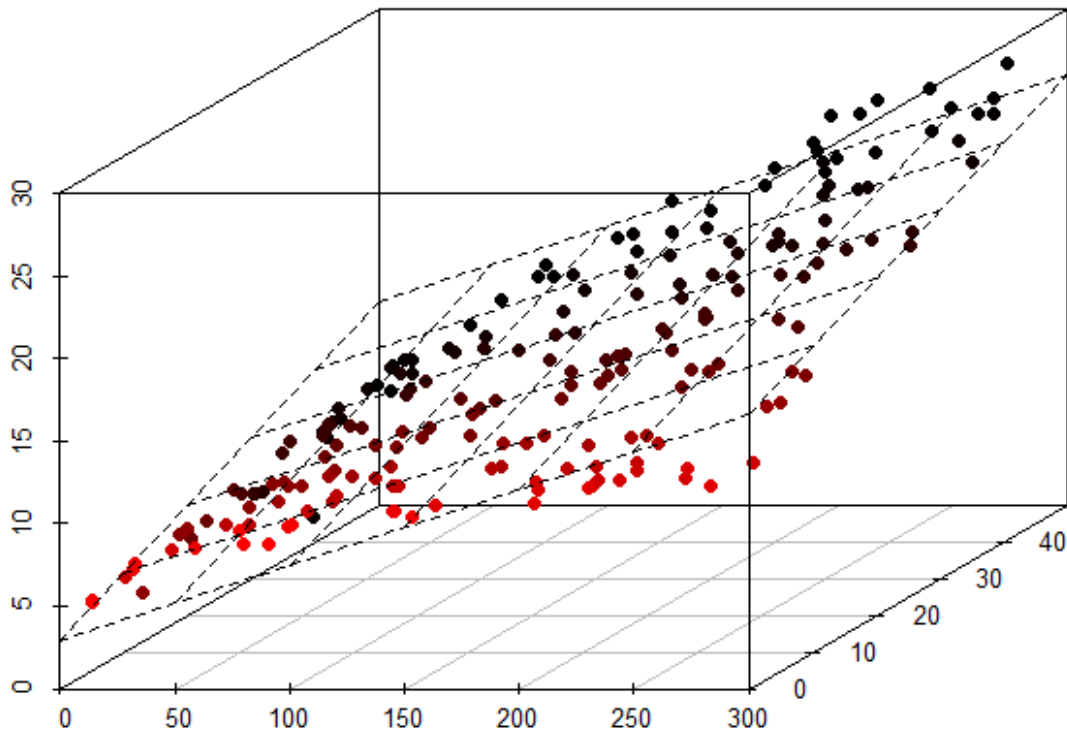


FIGURE 7.11 – Exemple de Régression Linéaire

Arbres de Décision

Les arbres de décision sont des structures arborescentes qui divisent les données en sous-ensembles en fonction des caractéristiques. Chaque nœud de décision représente une caractéristique, et chaque feuille de l'arbre représente une prédiction. La division se fait en maximisant l'homogénéité (par exemple, l'indice de Gini ou l'entropie) des sous-ensembles. La [Figure 7.12](#) illustre le concept de l'arbre de décision.

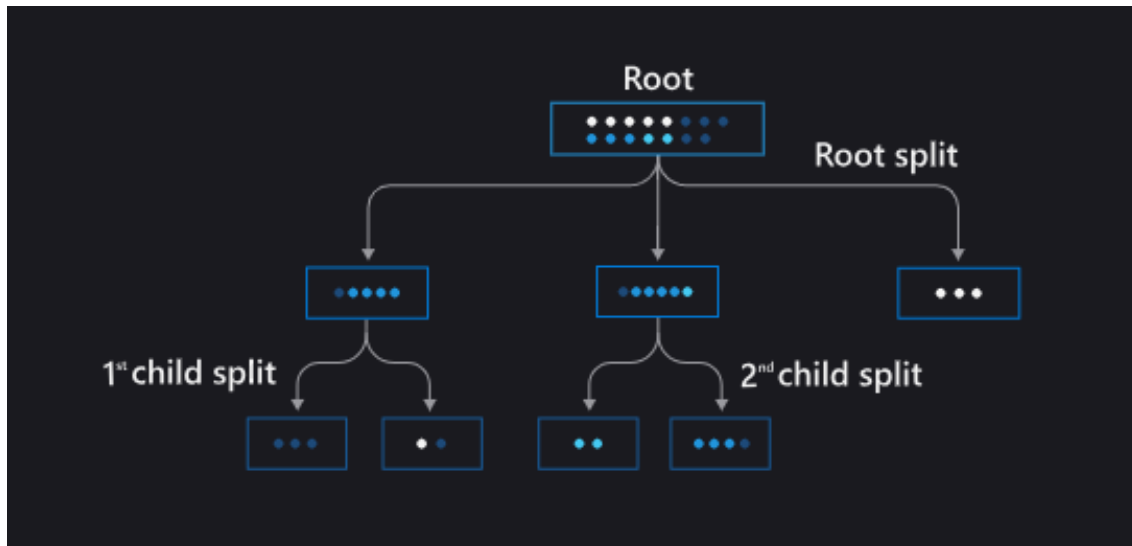


FIGURE 7.12 – Illustration des arbres de décision (Decision Tree) selon Azure Microsoft

Forêts Aléatoires

Les forêts aléatoires sont des ensembles d'arbres de décision. Chaque arbre est construit sur un échantillon aléatoire des données, et les prédictions sont agrégées pour obtenir une prédiction finale. Cela réduit le surajustement et améliore la robustesse. La [Figure 7.13](#) illustre le concept des Forêts Aléatoires.

Machines à Vecteurs de Support (SVM)

Les SVM sont utilisées pour la classification et la régression. En régression, l'objectif est de trouver une fonction $f(x)$ telle que $f(x)$ est le plus proche possible des valeurs réelles y . Les SVM utilisent un hyperplan pour effectuer la régression, et l'objectif est de maximiser la marge entre les données et l'hyperplan. La [Figure 7.14](#) illustre le principe des méthodes SVM.

Réseaux de Neurones (Perceptrons Multi-Couches)

Les réseaux de neurones (ou perceptrons multi-couches) sont des modèles d'apprentissage profond inspirés par le fonctionnement du cerveau humain. Ils sont composés de plusieurs couches de neurones interconnectés. Chaque neurone effectue une opéra-

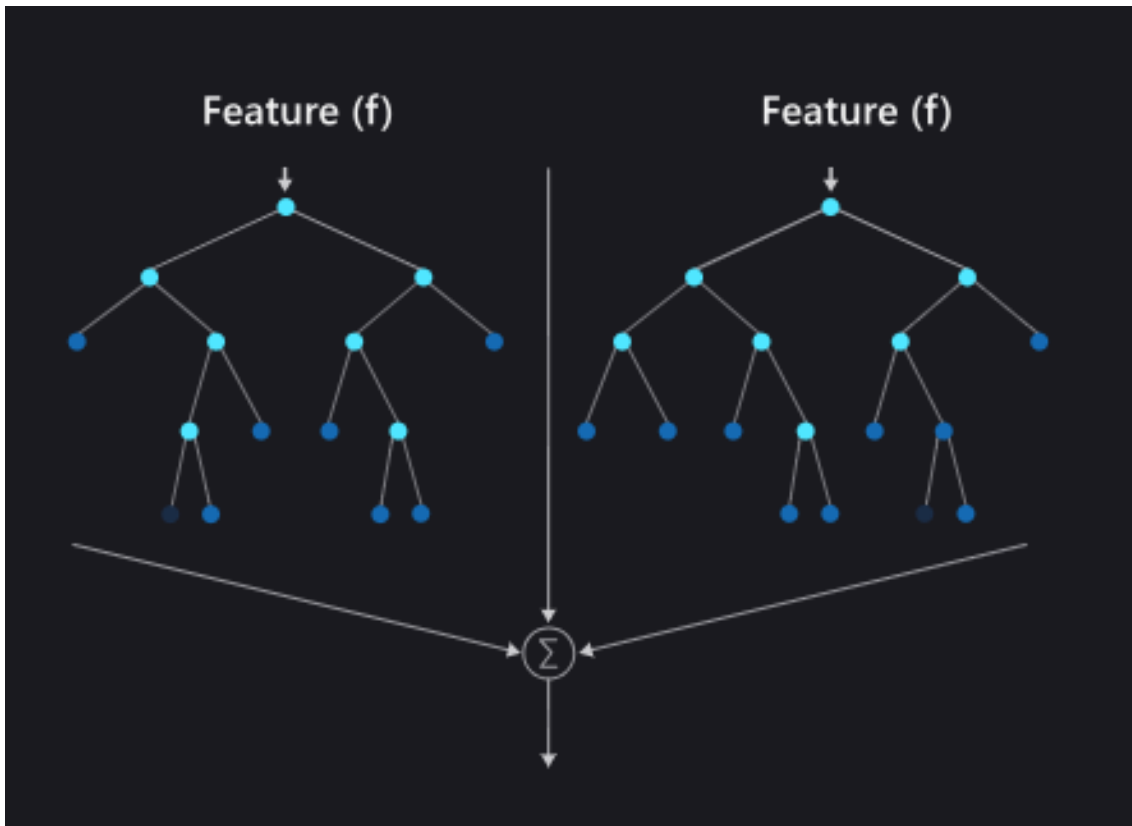


FIGURE 7.13 – Illustration des Forêts Aléatoires (Random Forest) selon Azure Microsoft

tion linéaire suivie d'une fonction d'activation non linéaire. Les réseaux de neurones profonds (DNN) sont capables de modéliser des relations complexes entre les entrées et les sorties.

Principe de Fonctionnement

Un réseau de neurones est composé de trois types de couches : couche d'entrée, couches cachées et couche de sortie. Chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante. L'opération d'un neurone est décrite comme suit :

$$y = \sigma\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \quad (7.1)$$

où : - y est la sortie du neurone. - σ est la fonction d'activation, qui introduit une

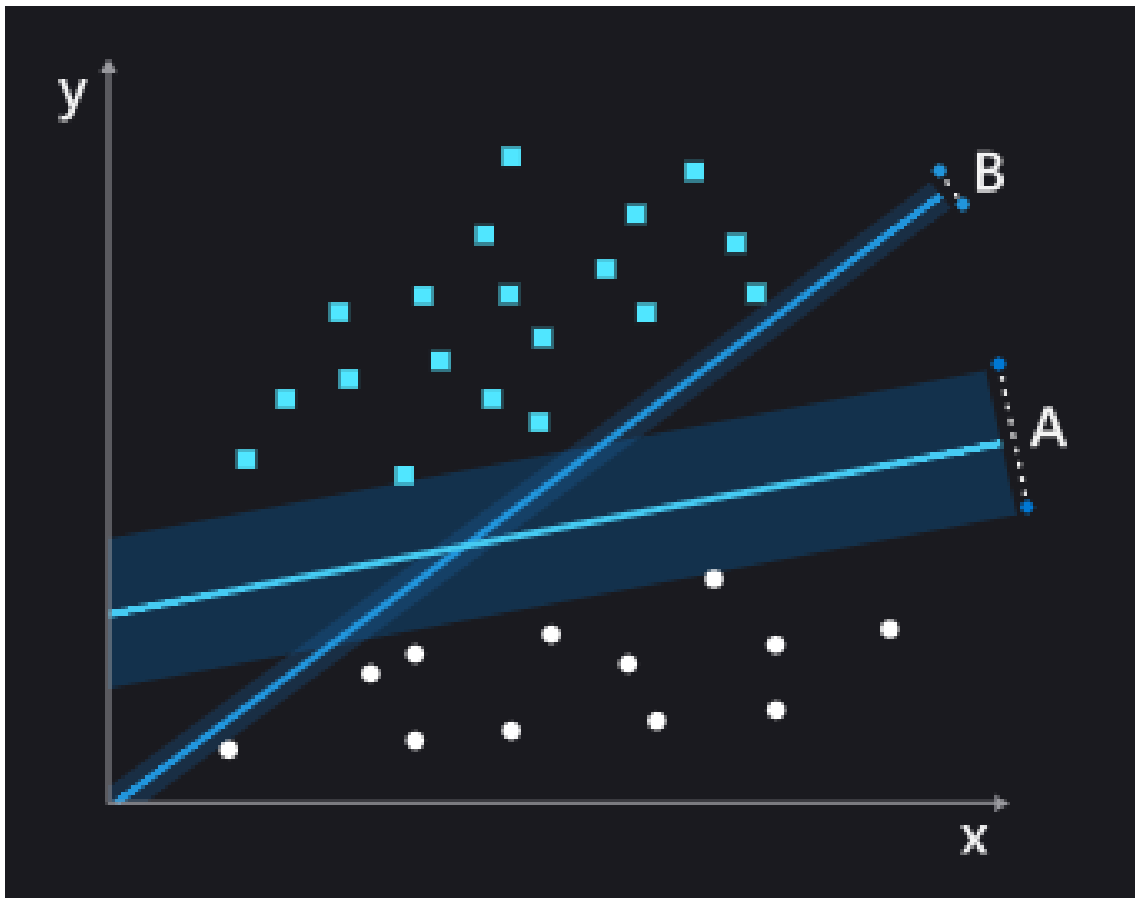


FIGURE 7.14 – Illustration de l' SVM selon Azure Microsoft

non-linéarité dans le modèle. - w_i sont les poids des connexions entre le neurone et les neurones de la couche précédente. - x_i sont les sorties des neurones de la couche précédente. - b est le biais du neurone.

Le processus de formation d'un réseau de neurones implique la rétropropagation de l'erreur (backpropagation) pour ajuster les poids et les biais afin de minimiser une fonction d'erreur.

Les fonctions d'activations

Les fonctions d'activation introduisent une non-linéarité dans le modèle, ce qui permet aux réseaux de neurones de capturer des relations complexes. Voici quelques exemples de fonctions d'activation couramment utilisées :

1. La fonction sigmoïde :

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (7.2)$$

où z est l'entrée pondérée du neurone. Elle produit des sorties dans l'intervalle (0, 1) et est utilisée dans les couches cachées.

2. La fonction ReLU (Rectified Linear Unit) :

$$\text{ReLU}(z) = \max(0, z) \quad (7.3)$$

qui est une fonction linéaire pour des valeurs positives et 0 pour des valeurs négatives. Elle est largement utilisée dans les couches cachées pour accélérer l'apprentissage.

3. La fonction Tangente Hyperbolique (tanh) :

$$\text{ReLU}(z) = \max \tanh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}} \quad (7.4)$$

, qui produit des sorties dans l'intervalle (-1, 1). Elle est similaire à la sigmoïde mais centrée à zéro.

La fonction d'Erreur

La fonction d'erreur mesure la différence entre les prédictions du réseau et les valeurs cibles réelles. Une fonction d'erreur couramment utilisée pour la régression est l'erreur quadratique moyenne (MSE) :

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7.5)$$

où n est le nombre d'exemples de formation, y_i sont les valeurs cibles réelles, et \hat{y}_i sont les prédictions du réseau.

La rétropropagation minimise cette fonction d'erreur en ajustant les poids et les biais à l'aide de techniques d'optimisation telles que la descente de gradient.

Les réseaux de neurones sont des modèles puissants utilisés dans diverses applications, de la classification d'images à la prédiction de séries temporelles. Leur capacité à

modéliser des relations complexes en fait des outils précieux en apprentissage automatique. La [Figure 7.15](#) représente une schématisation d'un réseau de neurones artificiel.

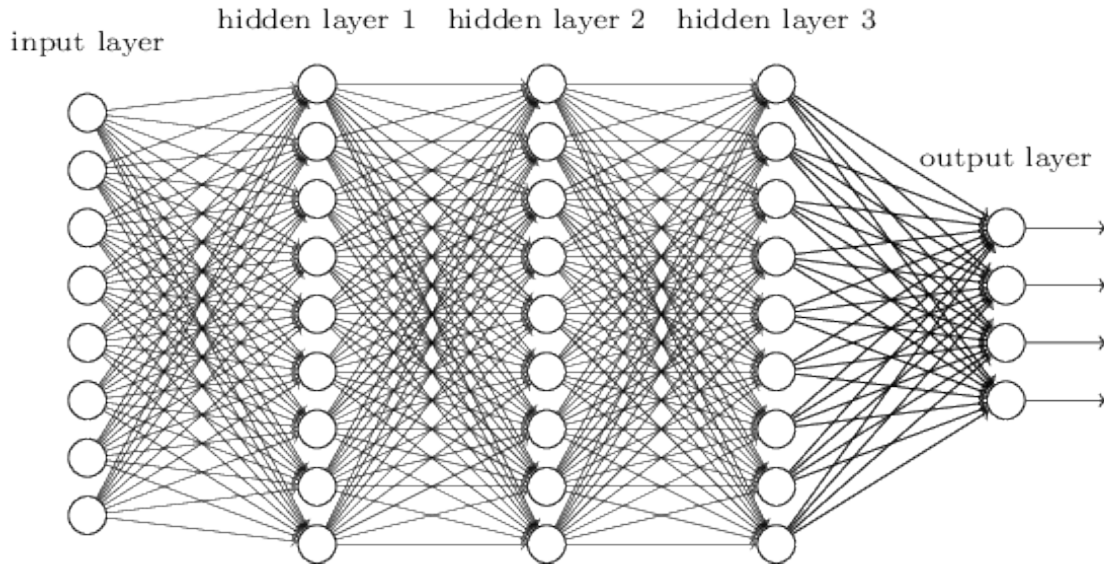


FIGURE 7.15 – Illustration d'un réseau de neurones artificiel (ANN)

Exemples d'applications :

Modélisation de la Perméabilité de Retour en Utilisant des Algorithmes d'Apprentissage Machine

Dans le domaine des fluides de forage, la détermination du ratio d'endommagement de la roche réservoir est d'une importance cruciale pour évaluer la viabilité d'un gisement. Un essai essentiel pour cette évaluation est la mesure de la perméabilité de retour, effectuée à l'aide d'une machine de déplacement. La [Figure 7.16](#) présente une illustration schématique de la machine de déplacement ([Akkal, 2014](#)).

Dans le cadre de notre travail, nous avons entrepris de modéliser ce test en utilisant des techniques d'apprentissage machine, notamment les Machines à Vecteurs de Support (SVM) et les Réseaux de Neurones à Couches Multiples (MLP). L'objectif était de développer des modèles prédictifs précis pour estimer le ratio d'endommagement de la roche réservoir en se basant sur les données de perméabilité de retour.

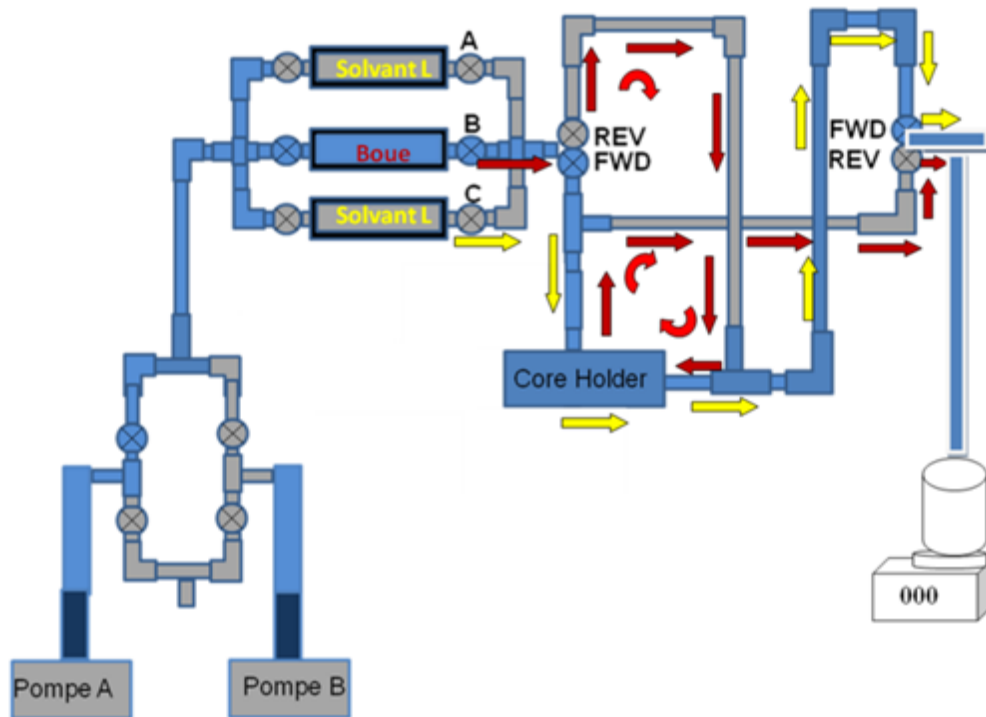


FIGURE 7.16 – Schématisation de la Machine de Déplacement utilisée pour la mesure de la perméabilité de retour (Akkal, 2014).

Résultats

Nous avons réalisé des expériences en utilisant des jeux de données réels de mesures de perméabilité de retour, enregistrées par la machine de déplacement. Les modèles SVM et MLP ont été formés sur ces données pour prédire le ratio d'endommagement de la roche réservoir.

Les Figures 7.17 et 7.18 illustrent les courbes d'apprentissage obtenues avec les méthodes SVM et MLP respectivement. Une observation notable est que, dans le cas de l'architecture profonde des réseaux de neurones (MLP), la capacité d'apprentissage continue d'augmenter à mesure que la base de données d'entraînement est alimentée en données supplémentaires. En revanche, la méthode SVM montre une tendance à la stagnation, avec un score R2 qui se stabilise autour de 94.5% . Cette observation suggère que les réseaux de neurones profonds ont un potentiel d'apprentissage plus

élevé lorsqu'ils sont exposés à des données supplémentaires, tandis que la méthode SVM atteint un plateau dans sa performance.

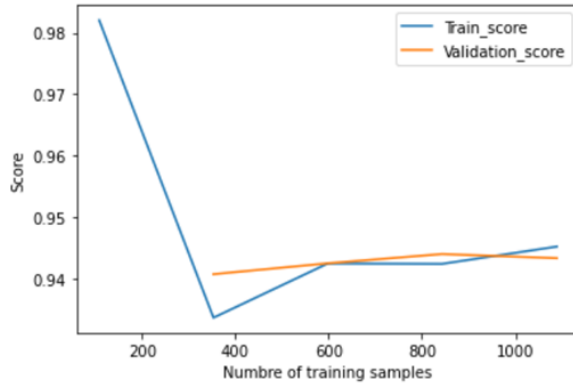


FIGURE 7.17 – Courbes d'apprentissage pour la méthode SVM

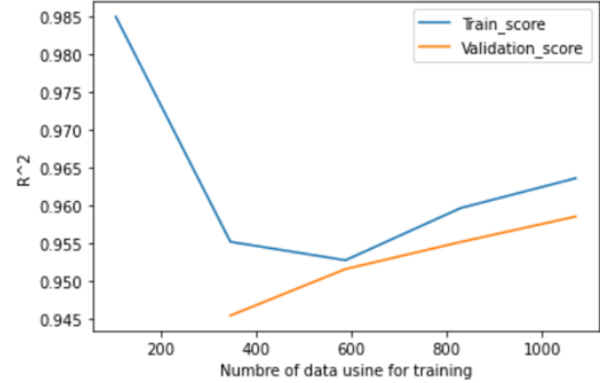


FIGURE 7.18 – Courbes d'apprentissage pour la méthode ANN (Réseau de Neurones Artificiels)

Optimisation des Hyperparamètres

Pour obtenir ces résultats précis, nous avons effectué un ajustement minutieux des hyperparamètres de nos modèles. L'optimisation des hyperparamètres est une étape critique dans le processus d'apprentissage machine, car elle permet d'obtenir des modèles performants.

Nous avons utilisé des techniques telles que la recherche par grille (grid search) pour explorer différentes combinaisons d'hyperparamètres. Par exemple, pour les SVM, nous avons réglé les paramètres de régularisation et le type de noyau, tandis que pour les MLP, nous avons ajusté le nombre de couches cachées, le nombre de neurones par couche, et le taux d'apprentissage.

En conclusion, notre travail de modélisation de la perméabilité de retour avec les algorithmes SVM et MLP a montré des résultats prometteurs pour l'estimation du ratio d'endommagement de la roche réservoir. Ces modèles peuvent avoir un impact significatif sur l'optimisation des fluides de forage en permettant des prédictions précises et rapides.

7.1.4 Le Déploiement des modèles ML

Le déploiement de nos modèles ML suit un processus en plusieurs étapes. Initialement, nous développons une interface de programmation d'application (API :Application Programming Interface) à l'aide de FastAPI pour rendre nos modèles disponibles sous forme de services Web. Cette API est ensuite déployée sur nos propres serveurs locaux, facilitant les tests et la validation de nos modèles dans un environnement contrôlé. Après avoir validé les modèles, nous les intégrons au sein du système AI Software as a Service (SaaS global), permettant ainsi aux utilisateurs finaux d'accéder aux fonctionnalités de prédiction. Une fois en production, nous assurons une surveillance continue des performances et procédons à des mises à jour au besoin.

7.1.5 La partie d'une application ou Backend :

Nous avons choisi d'utiliser FastAPI ([Figure 7.19](#)), pour mettre en place la partie backend de notre projet. Cette décision a été motivée par les performances exceptionnelles et la simplicité de mise en œuvre de FastAPI. Grâce à cette framework, nous avons pu créer une API robuste et rapide pour la communication avec notre modèle. L'utilisation de FastAPI a grandement facilité le développement de notre application, nous permettant de gérer efficacement les requêtes et les réponses, ainsi que de mettre en place des endpoints pour les différentes fonctionnalités de notre modèle. En fin de compte, l'utilisation de FastAPI a été un choix judicieux pour notre backend, nous offrant la flexibilité et la rapidité nécessaires pour garantir une expérience utilisateur fluide. Dans la figure ([Figure 7.20](#) et [Figure 7.21](#) respectivement), nous montrons une partie de la documentation du notre API avec l'endpoint /calculate



FIGURE 7.19 – Logo du framework FastAPI de python.

pour relever ce défi. Grâce à sa capacité à générer des interfaces utilisateur attrayantes et responsives pour plusieurs plateformes à partir d'un code source unique, nous avons pu économiser un temps précieux en développement. La polyvalence de Flutter nous a également permis de tester efficacement notre solution sur différentes plateformes, offrant ainsi une expérience utilisateur cohérente. Donc, l'utilisation de Flutter pour notre frontend s'est avérée être une stratégie gagnante pour atteindre nos objectifs dans des délais courts et pour valider rapidement notre solution.



FIGURE 7.22 – Logo du Flutter

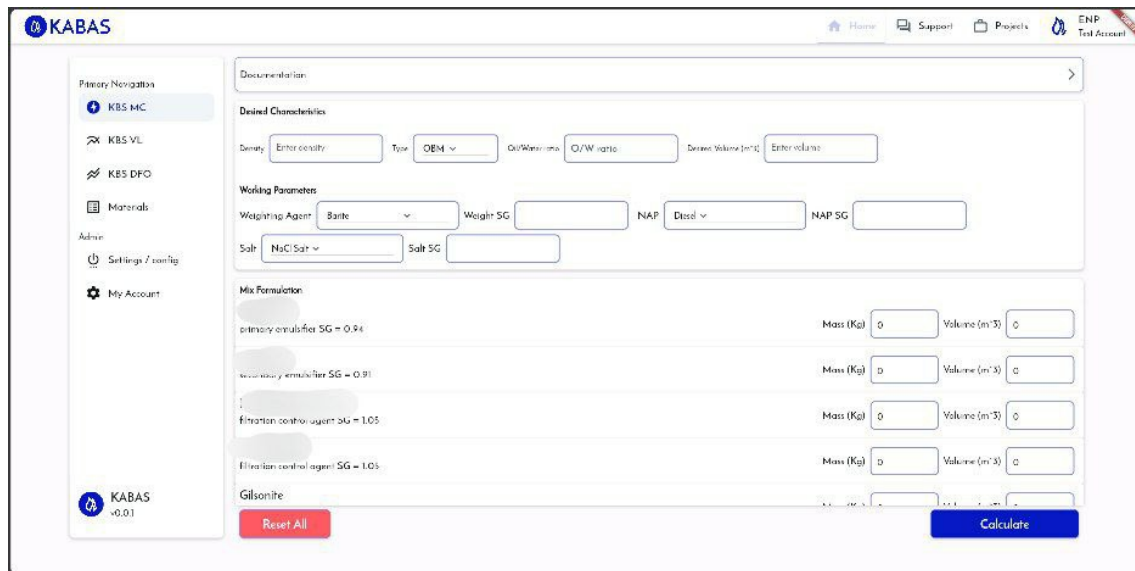
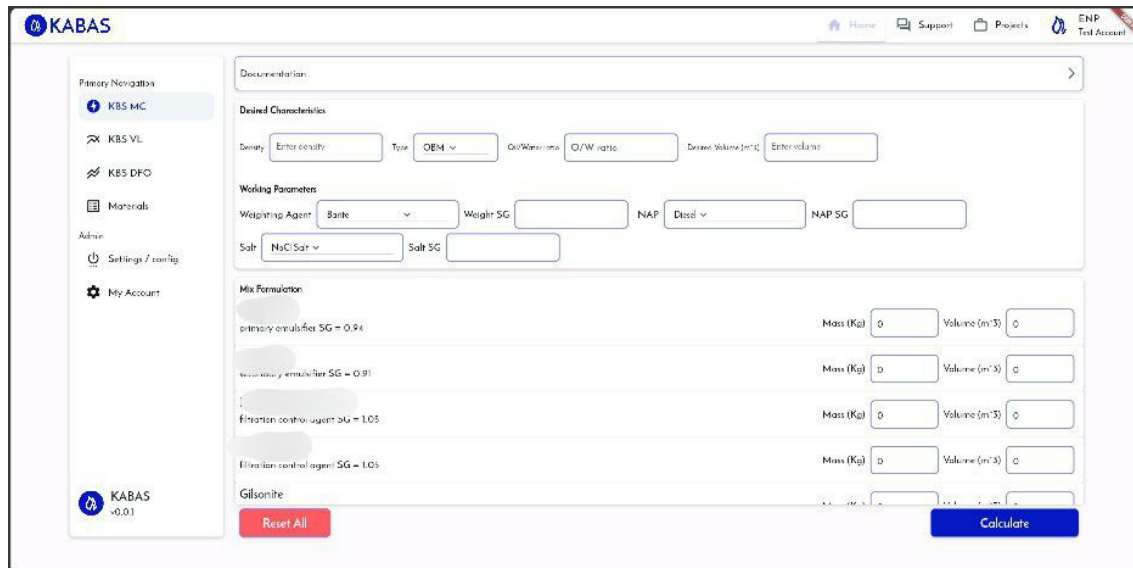


FIGURE 7.23 – Capture d'écran du MVP

7.1.7 Interface utilisateur

Notre interface utilisateur future représente une évolution significative de notre projet, intégrant des fonctionnalités innovantes et une expérience utilisateur améliorée. Cependant, il est important de noter que cette interface est confidentielle, ce qui signifie que nous ne pouvons pas divulguer de détails spécifiques à ce stade. Cependant, soyez assuré que notre équipe travaille avec détermination pour créer une interface utilisateur qui répondra aux besoins de nos utilisateurs de manière efficace, intuitive et esthétiquement agréable. Nous sommes impatients de partager davantage d'informations à mesure que nous progressons dans le développement de cette interface.



The screenshot displays the KABAS user interface. On the left is a 'Primary Navigation' sidebar with options: K&S MC, K&S VL, K&S DFO, Materials, Admin (Settings / Config, My Account), and the KABAS v0.01 logo. The main content area is titled 'Documentation' and contains several sections:

- Desired Characteristics:** Includes input fields for Density, Type (OEM), Oil/Water ratio, Desired Volume (m³), and Enter oil class.
- Working Parameters:** Includes dropdowns for Watering Agent, Salt (NaCl), and Diesel, along with input fields for Weight SG, NAP, and Salt SG.
- Mix Formulation:** A table with four rows, each showing a component name (e.g., primary emulsifier SG = 0.94), its Mass (Kg), and Volume (m³), with corresponding input fields.
- Gilsonite:** A section at the bottom with a 'Reset All' button and a 'Calculate' button.

 The top right corner features navigation links for Home, Support, Projects, and ENP Test Account.

FIGURE 7.24 – Capture sur l'avancement du conception de l'interface utilisateur du premier produit

Conclusion Générale

Des processus complexes et cruciaux d'exploration et d'extraction des précieuses ressources enfouies sous la surface terrestre sont au cœur de l'industrie pétrolière et gazière. Les fluides de forage, également appelés boues de forage, sont essentiels à ces opérations et sont importantes pour assurer les tâches mécaniques, le nettoyage, la stabilisation des parois et le transport des débris pour un puits pétrolier. Leurs compositions et leurs caractéristiques sont soigneusement adaptées pour répondre aux besoins particuliers des différentes formations géologiques rencontrées lors du forage et assurer leurs objectifs. Il est important de noter que ces boues de forage, bien qu'importantes, ne sont qu'une partie du grand domaine de l'industrie pétrolière. L'ensemble de ces procédures est en constante évolution et utilise des technologies de pointe telles que l'intelligence artificielle pour optimiser les fluides de forage et, par conséquent, l'ensemble du processus de forage. Les opérations doivent être plus sûres, plus efficaces et plus rentables grâce à cette combinaison d'expertise humaine et d'innovation technologique. Le succès de ces opérations dépend de la recherche constante d'optimisation des fluides de forage, et l'intelligence artificielle joue un rôle croissant dans cette démarche. Les paramètres des fluides peuvent être ajustés en temps réel pour résoudre des problèmes spécifiques de forage de chaque formation géologique, réduisant ainsi les risques et maximisant l'efficacité en utilisant des technologies avancées, telles que l'IA. En combinant des tests virtuels et des tests réels, ces méthodes permettent de parvenir à des formulations optimales tout en minimisant les charges liées aux essais laboratoires. Ces avancées ouvrent la voie à une meilleure gestion des ressources et à des opérations de forage plus durables, contribuant ainsi à l'avenir de l'industrie de l'énergie. Ajouter un commentaire sur les

membres du projet En exploitant ces diverses compétences, l'intelligence artificielle devient un moteur de création de produits novateurs dans le domaine des fluides de forage. Notre Startup est alors l'opportunité de proposer des solutions qui rehaussent l'efficacité, les performances et la durabilité des opérations de forage. Ces nouvelles offres enrichissent l'expérience des clients, renforcent la position concurrentielle de notre Startup sur le marché et encouragent une innovation continue au sein du secteur des fluides de forage. D'un autre côté et dans le cadre de ce projet et afin de chercher des marchés au niveau national, il est important de préciser que l'estimation de la part de marché est un processus complexe et dépend de plusieurs facteurs, notamment la concurrence, la demande du marché, la capacité de production, la qualité du produit final et la réputation de notre Startup. L'estimation de la part de marché peut être basée sur des analyses de marché approfondies, des études de faisabilité, des prévisions de la demande ainsi que des tendances du marché. Ces informations importantes permettent d'évaluer la part de marché potentielle que notre Startup peut atteindre avec notre produit ou service final. Il est à noter également que, dans la gestion de notre projet d'optimisation des fluides de forage basé sur l'intelligence artificielle, nous avons rigoureusement suivi un planning pour garantir l'efficacité et la cohérence de nos opérations. Ce planning a facilité la gestion optimale et l'exploitation meilleure des ressources et favorisé ainsi la collaboration au sein de notre équipe. En suivant cette technique de planification à long terme de notre Startup, nous nous efforçons d'atteindre nos objectifs conformément au calendrier établi en amont, mettant en évidence l'importance d'une planification méticuleuse dans la réussite des projets d'optimisation des fluides de forage basés sur l'IA. Le choix du mode et des sources de financement est une décision importante pour la réussite de notre Startup. Il dépend de divers facteurs, notamment la taille du projet, la maturité de notre startup, le niveau de risque et obstacles ainsi que les objectifs financiers à long terme. La combinaison de différentes sources de financement peut s'avérer bénéfique pour réduire les risques et optimiser les chances de succès. Il est fortement recommandé de collaborer étroitement avec des experts financiers et des conseillers juridiques pour structurer efficacement les modalités de financement, garantissant ainsi la viabilité financière de notre projet. Une

planification financière réfléchi est essentielle pour répondre aux besoins de croissance de notre startup. L'analyse stratégique du marché pétrolier révèle clairement que l'optimisation des fluides de forage par le biais de l'intelligence artificielle représente un virage majeur. Cette innovation technologique offre un potentiel significatif pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts et minimiser les impacts environnementaux des opérations de forage. Les entreprises qui investissent dans cette approche se positionnent avantageusement pour répondre aux besoins changeants de l'industrie pétrolière, renforcer leur compétitivité et contribuer à la transition vers des pratiques plus durables. L'avenir du secteur des fluides de forage sera incontestablement façonné par l'IA et les acteurs visionnaires qui embrassent cette évolution technologique. En sélectionnant ce marché cible spécifique, nous nous distinguons de nos concurrents en offrant des solutions sur mesure, parfaitement ajustées aux besoins des entreprises évoluant dans le secteur pétrolier et gazier. Cette stratégie nous confère un avantage concurrentiel marqué, car elle nous permet de nous focaliser sur un segment de marché clairement défini, plutôt que de chercher à couvrir un marché plus large et généraliste. En établissant des collaborations stratégiques avec ces acteurs de premier plan, nous avons la possibilité de tirer parti de leurs ressources, de leur savoir-faire et de leur réseau pour renforcer notre Startup, encourager sa réussite et accélérer sa croissance. Le choix judicieux de nos partenaires, en fonction de leur alignement avec nos objectifs, de leur réputation, de leurs compétences et de leur engagement à une coopération à long terme, demeure essentiel. En résumé, le plan de trésorerie se révèle être un outil essentiel pour la gestion financière de notre startup. Il nous permet d'anticiper et de superviser nos flux de trésorerie, de discerner les sources de revenus et de dépenses, et de prendre des décisions éclairées pour préserver le côté financier de notre Startup. Une surveillance régulière de notre plan de trésorerie nous permet d'ajuster nos stratégies et nos activités, garantissant ainsi le maintien d'une position financière robuste et la pérennité de notre startup. En ce qui concerne les résultats obtenus grâce à l'application de l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine de l'optimisation des fluides de forage sont éloquentes. L'analyse comparative des performances des techniques d'apprentissage automatique a révélé une tendance distincte : l'Algorithme des Réseaux de Neurones

Artificiels (ANN) a démontré une nette amélioration au fil du temps par rapport à la technique du Support Vector Machine (SVM). Cette observation souligne l'efficacité croissante de l'approche basée sur les ANN pour améliorer l'optimisation des fluides de forage, tandis que la performance de la méthode SVM semble stagner.

Cette tendance à l'amélioration continue des ANN peut être attribuée à leur capacité à s'adapter et à apprendre de manière dynamique à partir des données historiques. Ils sont capables de gérer des informations complexes et non linéaires, ce qui les rend particulièrement adaptés pour traiter des problèmes de plus en plus complexes dans le domaine des fluides de forage. En revanche, les SVM, bien qu'initialement prometteurs, peuvent montrer des limites lorsqu'ils sont confrontés à des données en constante évolution, ce qui pourrait expliquer leur stagnation relative. Ces résultats soulignent l'importance de l'IA, en particulier des ANN, dans l'optimisation des fluides de forage, en offrant une solution dynamique et évolutive pour répondre aux défis changeants de l'industrie pétrolière. Cette avancée prometteuse dans le domaine de la recherche montre que l'IA est en train de révolutionner la manière dont nous abordons l'optimisation des fluides de forage, ouvrant la voie à des améliorations continues et à des solutions plus efficaces pour cette industrie importante pour notre pays. À l'avenir, notre startup a la possibilité d'élargir son champ d'application pour englober diverses problématiques associées aux fluides de forage. Cette expansion potentielle offre l'opportunité d'accroître notre impact en développant des solutions pour répondre à un éventail plus large de besoins de l'industrie pétrolière et gazière.

Bibliographie

- Agenda, I. (2015). Industrial internet of things : unleashing the potential of connected products and services. *White Paper, in Collaboration with Accenture*, 34.
- Agwu, O. E., Akpabio, J. U., Alabi, S. B., & Dosunmu, A. (2018). Artificial intelligence techniques and their applications in drilling fluid engineering : A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 167, 300–315.
- Agwu, O. E., Akpabio, J. U., Ekpenyong, M. E., Inyang, U. G., Asuquo, D. E., Eyoh, I. J., & Adeoye, O. S. (2021). A critical review of drilling mud rheological models. *Journal of petroleum science and engineering*, 203, 108659.
- Ahmadi, M. A., Shadizadeh, S. R., Shah, K., & Bahadori, A. (2018). An accurate model to predict drilling fluid density at wellbore conditions. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(1), 1–10.
- Akkal, A. (2014). *Optimisation des fluides de forage et endommagement de la formation* (Thèse de doctorat non publiée). Alger, Ecole Nationale Polytechnique.
- Algerie Presse Service, A. (2022). *Fonds de financements des startups : 510 millions de da mobilisés à ce jour*. (<https://www.citedrive.com/overleaf> [Accessed : (Use the date of access)])
- Apaleke, A. S., Al-Majed, A., & Hossain, M. E. (2012). Drilling fluid : state of the art and future trend. In *Spe north africa technical conference and exhibition* (pp. SPE–149555).
- Ba geri, B. S., Mahmoud, M., Al-Mutairi, S. H., & Abdurraheem, A. (2016). Effect of sand content on the filter cake properties and removal during drilling maximum reservoir contact wells in sandstone reservoir. *Journal of Energy Resources Technology*, 138(3), 032901.
- BDC.com. (2023). *8 sources of start-up financing*.
- Bern, P., Zamora, M., Slater, K., & Hearn, P. (1996). The influence of drilling variables on barite sag. In *Spe annual technical conference and exhibition ?* (pp. SPE–36670).
- Bonamigo, A., da Silva, A. A., da Silva, B. P., & Werner, S. M. (2022, 01 Jan). Criteria for selecting actors for the value co-creation in startups. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 37(11), 2332-2343. Consulté sur <https://doi.org/10.1108/JBIM-02-2021-0083> doi: 10.1108/JBIM-02-2021-0083
- Caenn, R., & Chillingar, G. V. (1996). Drilling fluids : State of the art. *Journal of petroleum science and engineering*, 14(3-4), 221–230.

- Caenn, R., Darley, H. C., & Gray, G. R. (2011). *Composition and properties of drilling and completion fluids*. Gulf professional publishing.
- Campbell, C., Sands, S., Ferraro, C., Tsao, H.-Y. J., & Mavrommatis, A. (2020). From data to action : How marketers can leverage ai. *Business horizons*, *63*(2), 227–243.
- CFI.com. (2023). *Sources of funding*.
- Committee, A. S. S. A. S. S., et al. (2011). *Drilling fluids processing handbook*. Elsevier.
- Cooper, R. G. (1990). Stage-gate systems : a new tool for managing new products. *Business horizons*, *33*(3), 44–54.
- Cox, A. (1996). Relational competence and strategic procurement management : Towards an entrepreneurial and contractual theory of the firm. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, *2*(1), 57–70.
- Davoodi, S., Mehrad, M., Wood, D. A., Ghorbani, H., & Rukavishnikov, V. S. (2023). Hybridized machine-learning for prompt prediction of rheology and filtration properties of water-based drilling fluids. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *123*, 106459.
- Desai, J. N., Pandian, S., & Vij, R. K. (2021). Big data analytics in upstream oil and gas industries for sustainable exploration and development : A review. *Environmental Technology & Innovation*, *21*, 101186.
- Epelle, E. I., & Gerogiorgis, D. I. (2020). A review of technological advances and open challenges for oil and gas drilling systems engineering. *AIChE Journal*, *66*(4), e16842.
- Faster-capital.com. (2023). *Get a loan for your ai startup*.
- Faster.com. (2023). *Increase your revenue, reduce costs and cut down risk*.
- Füller, J., Hutter, K., Wahl, J., Bilgram, V., & Tekic, Z. (2022). How ai revolutionizes innovation management—perceptions and implementation preferences of ai-based innovators. *Technological Forecasting and Social Change*, *178*, 121598.
- Gautam, S., & Guria, C. (2020). Optimal synthesis, characterization, and performance evaluation of high-pressure high-temperature polymer-based drilling fluid : The effect of viscoelasticity on cutting transport, filtration loss, and lubricity. *SPE Journal*, *25*(03), 1333–1350.
- González, S., García, S., Del Ser, J., Rokach, L., & Herrera, F. (2020). A practical tutorial on bagging and boosting based ensembles for machine learning : Algorithms, software tools, performance study, practical perspectives and opportunities. *Information Fusion*, *64*, 205–237.
- Gooneratne, C. P., Magana-Mora, A., Otalvora, W. C., Affleck, M., Singh, P., Zhan, G. D., & Moellendick, T. E. (2020). Drilling in the fourth industrial revolution—vision and challenges. *IEEE Engineering Management Review*, *48*(4), 144–159.
- Hestad, V., & Gulbrandsen, A. (2018). Drilling fluids automix. In *Spe/iadc middle east drilling technology conference and exhibition* (p. D031S002R002).
- (s. d.). Consulté sur <https://azure.microsoft.com/fr-fr/resources/cloud-computing>

[-dictionary/what-is-machine-learning-platform/](#)

- Jenkins, G. P., Harberger, A. C., et al. (2020). *Analyse couts-avantages pour les decisions d'investissement chapitre 8 : Le coût d'opportunité économique de tous les capitaux* (Rapport technique). JDI Executive Programs.
- Khodja, M., Khodja-Saber, M., Canselier, J. P., Cohaut, N., & Bergaya, F. (2010). Drilling fluid technology : performances and environmental considerations. *Products and services ; from R&D to final solutions*, 227–256.
- Khokhawala, S., & Iyer, R. (2021). Entrepreneurial ecosystems : Spanning the institutional gaps in emerging economies via incubator networks. *Journal of the International Council for Small Business*, 2(3), 177–202.
- Kiron, D., Altman, E. J., & Riedl, C. (2023). Workforce ecosystems and ai.
- Koroteev, D., & Tekic, Z. (2021). Artificial intelligence in oil and gas upstream : Trends, challenges, and scenarios for the future. *Energy and AI*, 3, 100041.
- Kreuzberger, D., Kühn, N., & Hirschl, S. (2023). Machine learning operations (mlops) : Overview, definition, and architecture. *IEEE Access*.
- Kumar, R., & Kumar, U. (2004). A conceptual framework for the development of a service delivery strategy for industrial systems and products. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 19(5), 310–319.
- Labenski, F., Reid, P., & Santos, H. (2003). Drilling fluids approaches for control of wellbore instability in fractured formations. In *Spe/iadc middle east drilling technology conference and exhibition* (pp. SPE–85304).
- Lashari, S. e. Z., Takbiri-Borujeni, A., Fathi, E., Sun, T., Rahmani, R., & Khazaeli, M. (2019). Drilling performance monitoring and optimization : a data-driven approach. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9, 2747–2756.
- Legalstart.com. (2023). *Comment gérer le besoin en fonds de roulement (bfr) de votre entreprise ?*
- Liu, N., Zhang, D., Gao, H., Hu, Y., & Duan, L. (2021). Real-time measurement of drilling fluid rheological properties : A review. *Sensors*, 21(11), 3592.
- Macpherson, J. D., de Wardt, J. P., Florence, F., Chapman, C. D., Zamora, M., Laing, M. L., & Iversen, F. P. (2013). Drilling-systems automation : Current state, initiatives, and potential impact. *SPE drilling & completion*, 28(04), 296–308.
- Metelskaia, I., Ignatyeva, O., Deneff, S., & Samsonowa, T. (2018). A business model template for ai solutions. In *Proceedings of the international conference on intelligent science and technology* (pp. 35–41).
- Miklosik, A., Kuchta, M., Evans, N., & Zak, S. (2019). Towards the adoption of machine learning-based analytical tools in digital marketing. *Ieee Access*, 7, 85705–85718.
- Mishra, A. N., & Pani, A. K. (2021). Business value appropriation roadmap for artificial intelligence.

- VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems*, 51(3), 353–368.
- Mody, F. K., & Hale, A. H. (1993). Borehole-stability model to couple the mechanics and chemistry of drilling-fluid/shale interactions. *Journal of petroleum technology*, 45(11), 1093–1101.
- Noshi, C. I., & Schubert, J. J. (2018). The role of machine learning in drilling operations; a review. In *Spe eastern regional meeting* (p. D043S005R006).
- Osamy, W., Khedr, A. M., Salim, A., Al Ali, A. I., & El-Sawy, A. A. (2022). Coverage, deployment and localization challenges in wireless sensor networks based on artificial intelligence techniques : a review. *IEEE Access*, 10, 30232–30257.
- Paddle.com. (2023). *Increase your revenue, reduce costs and cut down risk*.
- Palani, P. (2020). *An exploratory analysis of the characteristics and prerequisites of an appropriate business partner in the early stage of start-up business* (Thèse de doctorat non publiée). Griffith College.
- Paleyas, A., Urma, R.-G., & Lawrence, N. D. (2022). Challenges in deploying machine learning : a survey of case studies. *ACM Computing Surveys*, 55(6), 1–29.
- Petryshak, O., Makarychev-Mikhailov, S., Mahfoudh, F., et al. (2022). Drilling fluids recommender system—artificial intelligence in action. In *Aade fluids technical conference and exhibition, houston, texas, usa* (pp. 19–20).
- Qin, Y., Xu, Z., Wang, X., & Skare, M. (2023). Artificial intelligence and economic development : An evolutionary investigation and systematic review. *Journal of the Knowledge Economy*, 1–35.
- Que sont les mlops ?* (s. d.). Consulté sur <https://www.databricks.com/fr/glossary/mlops>
- Rahman, M. H., Warneke, H., Webbert, H., Rodriguez, J., Austin, E., Tokunaga, K., . . . Menezes, P. L. (2021). Water-based lubricants : Development, properties, and performances. *Lubricants*, 9(8), 73.
- Raj, E. (2021). *Engineering mlops : Rapidly build, test, and manage production-ready machine learning life cycles at scale*. Packt Publishing Ltd.
- Ramézani, H., Akkal, R., Cohaut, N., Khodja, M., Ahmed-Zaid, T., & Bergaya, F. (2015). On the filtrate drilling fluid formation and near well-bore damage along the petroleum well. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135, 299–313.
- Reid, P., Minton, R., & Twynam, A. (1992). Field evaluation of a novel inhibitive water-based drilling fluid for tertiary shales. In *Spe europe featured at eage conference and exhibition ?* (pp. SPE–24979).
- Saasen, A., & Ytrehus, J. D. (2018). Rheological properties of drilling fluids : use of dimensionless shear rates in herschel-bulkley and power-law models. *Applied Rheology*, 28(5), 201854515.
- Salem, A. M., Yakoot, M. S., & Mahmoud, O. (2022). Addressing diverse petroleum industry problems using machine learning techniques : literary methodology spotlight on predicting well integrity failures. *ACS omega*, 7(3), 2504–2519.

- Samylovskaya, E., Makhovikov, A., Lutonin, A., Medvedev, D., & Kudryavtseva, R.-E. (2022). Digital technologies in arctic oil and gas resources extraction : global trends and russian experience. *Resources*, 11(3), 29.
- Solanki, P., Baldaniya, D., Jogani, D., Chaudhary, B., Shah, M., & Kshirsagar, A. (2022). Artificial intelligence : New age of transformation in petroleum upstream. *Petroleum Research*, 7(1), 106–114.
- Steinle, C., & Schiele, H. (2008). Limits to global sourcing? : Strategic consequences of dependency on international suppliers : Cluster theory, resource-based view and case studies. *Journal of purchasing and supply management*, 14(1), 3–14.
- Stevens, R. E. (2006). *Market opportunity analysis : text and cases*. Psychology Press.
- Thompson, H. (1998). Marketing strategies : What do your customers really want? *Journal of Business strategy*, 19(4), 16–21.
- Tripathi, A., Singh, A. K., Singh, K. K., Choudhary, P., & Vashist, P. C. (2021). Machine learning architecture and framework. In *Machine learning and the internet of medical things in healthcare* (pp. 1–22). Elsevier.
- Vartak, M., Subramanyam, H., Lee, W.-E., Viswanathan, S., Husnoo, S., Madden, S., & Zaharia, M. (2016). Modeldb : a system for machine learning model management. In *Proceedings of the workshop on human-in-the-loop data analytics* (pp. 1–3).
- Waqar, A., Othman, I., Shafiq, N., & Mansoor, M. S. (2023). Applications of ai in oil and gas projects towards sustainable development : a systematic literature review. *Artificial Intelligence Review*, 1–28.
- Whatls.com. (2023). *cost management*.
- Wilson, H. J., Daugherty, P., & Bianzino, N. (2017). The jobs that artificial intelligence will create. *MIT Sloan Management Review*, 58(4), 14.
- Xue, Q., & Xue, Q. (2020). Prospect of big data application in drilling engineering. *Data Analytics for Drilling Engineering : Theory, Algorithms, Experiments, Software*, 279–312.
- Yang, H., Shang, G., Li, X., & Feng, Y. (2023). Application of artificial intelligence in drilling and completion.
- Yathiraju, N. (2022). Investigating the use of an artificial intelligence model in an erp cloud-based system. *International Journal of Electrical, Electronics and Computers*, 7(2), 1–26.