

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
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

Développement d'un fluide de forage nanométrique intelligent
introduisant des nanoparticules d'oxyde de fer.

AOUNE Sara & ZIREG Nacira

Sous la direction de **Pr. AKKAL Rezki** ENP

Présenté et soutenu publiquement le (22/09/2024)

Composition du jury :

Président :	Pr. YAHYAOUI Sami	ENP
Promoteur :	Pr. AKKAL Rezki	ENP
Examineur :	M. CHANANE Larouci	ENP
Incubateur :	M. BOUSBAl M'hamed	ENP
Invité :	M. RAHMOUNI Lakhdar	DFSP

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
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.

Développement d'un fluide de forage nanométrique intelligent
introduisant des nanoparticules d'oxyde de fer.

AOUNE Sara & ZIREG Nacira

Sous la direction de **Pr. AKKAL Rezki** ENP

Présenté et soutenu publiquement le (22/09/2024)

Composition du jury :

Président :	Pr. YAHYAOUI Sami	ENP
Promoteur :	Pr. AKKAL Rezki	ENP
Examineur :	M. CHANANE Larouci	ENP
Incubateur :	M. BOUSBAl M'hamed	ENP
Invité :	M. RAHMOUNI Lakhdar	DFSP

يعالج هذا المشروع في نهاية الدراسات مشكلة تحسين سائل حفر ذكي، يتكون أساسًا من جزيئات أكسيد الحديد النانوية الاصطناعية، مع إضافة مكونات أخرى، يلعب كل منها دورًا محددًا بوضوح. سائل الحفر المحسن هذا هو نتيجة الإختيار الحكيم لظروف التشغيل في المختبر، بهدف تعديل بعض المعلومات التي تؤثر على خصائص سائل الحفر، ولا سيما اللزوجة ونقطة إنتاجية هذه السوائل. وقد أظهرت إضافة الجسيمات النانوية (NP) إلى سوائل الحفر، سواء القائمة على النفط (OBM) أو القائمة على الماء (WBM)، تأثيرات كبيرة على خصائصها. بالنسبة إلى سوائل الحفر القائمة على النفط (OBM)، أدى دمج الجسيمات النانوية إلى تقليل حجم الترشيح تحت الضغط والحرارة المرتفعين (HPHT)، مع كفاءة مثلى عند 1.5% من الجسيمات النانوية، مما قلل الحجم إلى حوالي 2.8 سم مكعب. كما انخفضت سماكة كعكة الحمأة أيضًا، حيث وصلت إلى 0.025-0.035 بوصة لتركيزات 1-1.5% من جزيئات أكسيد الحديد النانوية. أما في الحمأة الرطبة، فقد أدت إضافة جزيئات أكسيد الحديد النانوية والزانثان إلى تقليل حجم الترشيح إلى 4.4 سم مكعب وسماك الكعكة إلى 0.03 بوصة. أما من حيث الكثافة، فقد أدت إضافة جزيئات أكسيد الحديد النانوية إلى سائل الحفر القائم على النفط إلى انخفاض طفيف، بينما ظلت الكثافة في سائل الحفر القائم على الماء مستقرة عند 1.26 جم/سم مكعب. وتسبب هذه النتائج الضوء على التأثير الإيجابي لجزيئات أكسيد الحديد النانوية على خصائص الترشيح وتكوين كعكة الطين، مما يوفر آفاقًا واعدة لتحسين سائل الحفر.

الكلمات المفتاحية: سائل حفر ذكي، جزيئات أكسيد الحديد النانوية، اللزوجة، كعكة الطين.

Abstract

This project addresses the issue of optimizing an intelligent drilling fluid, mainly composed of synthetic iron oxyde nanoparticles, with the addition of other ingredients, each playing a specific role. This optimized drilling fluid is the outcome of a careful selection of operating circumstances in the laboratory, aiming to adjust critical parameters that influence the properties of a drilling fluid, namely the viscosity and yield point of these fluids. The addition of nanoparticles (NP) to both oil-based (OBM) and water-based (WBM) drilling fluids has shown significant effects on their properties. Regarding the OBM, adding NP has decreased the volume of HPHT (High Pressure High Temperature) filtrate, with the best efficiency at 1.5% of NP, reducing the volume to around 2.8 cc. The thickness of the filter cake has also been reduced, reaching 0.025-0.035 inches at concentrations of 1-1.5% of NP. Regarding density, the addition of NP in OBM resulted a slight decrease, whereas for WBM, the density remained constant at 1.26 g/cm³. These results highlight the positive influence of NP on filtration properties and mud cake formation, offering promising prospects for drilling fluid optimization.

Keywords : Nanoparticles - Drilling fluids - Viscosity - Yield point - Cake filter.

Résumé

Ce projet de fin d'études aborde la problématique de l'optimisation d'un fluide de forage intelligent, composé principalement de nanoparticules synthétiques d'oxyde de fer, avec l'ajout d'autres ingrédients dont chacun joue un rôle bien déterminé. Ce fluide de forage optimisé est le résultat d'une sélection judicieuse des conditions opératoires en laboratoire, visant à ajuster certains paramètres influençant les propriétés d'un fluide de forage, plus particulièrement la viscosité et la limite d'élasticité (yield point : la contrainte minimale nécessaire pour qu'un fluide commence à s'écouler) de ces fluides. L'ajout de nanoparticules (NP) dans les fluides de forage, tant à base d'huile (OBM) que d'eau (WBM), a démontré des effets significatifs sur leurs propriétés. Pour les OBM, l'incorporation de NP a réduit le volume de filtrat HPHT (Haute Pression Haute Température), avec une efficacité optimale à 1,5% de NP, diminuant le volume de filtrat à environ 2,8 cc. L'épaisseur du cake de boue a également été réduite, atteignant 0,025-0,035 pouce pour des concentrations de 1-1,5% de NP. Dans les WBM, l'ajout de NP et de xanthane a diminué le volume de filtrat à 4,4 cc et l'épaisseur du cake à 0,03 pouce. Concernant la densité, l'ajout de NP dans les OBM a entraîné une légère diminution, tandis que pour les WBM, la densité est restée stable à 1,26 g/cm³. Ces résultats soulignent l'impact positif des NP sur les propriétés de filtration et la formation du gâteau de boue, offrant des perspectives prometteuses pour l'optimisation des fluides de forage.

Mots clés : Nanoparticules - Fluides de forage - Viscosité - seuil de cisaillement - Filtre cake.

Remerciements

Ce mémoire est le fruit des efforts fournis et des sacrifices consentis par plusieurs personnes que nous ne pourrions oublier de remercier,

Tout d'abord, on tient à remercier ALLAH le tout puissant, créateur de toutes choses, pour son souffle et tous ses innombrables bienfaits de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à terme notre formation et pourvoir réaliser ce travail de recherche.

En guise de reconnaissance, nous tenons à remercier, très sincèrement, le Pr. **YAHYAOUI Sami**, le chef de département, on a eu l'honneur et la chance de bénéficier de ses connaissances et compétences, de ses précieux conseils et de son suivi tout au long de notre parcours académique.

On tient à exprimer nos sincères remerciements à **M. CHANANE Larouci**, non seulement pour son rôle en tant qu'examineur de ce mémoire, mais aussi pour son dévouement et son soutien tout au long de notre parcours académique. Nous sommes profondément reconnaissantes pour votre rigueur intellectuelle, vos enseignements éclairés et pour tous vos efforts et votre bienveillance durant ces années d'étude.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des professeurs du département de Génie Minier, pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant les années d'études.

On désire exprimer notre profonde gratitude à Mr le professeur **AKKAL Rezki** pour son encadrement de qualité, sa motivation professionnelle, son accompagnement rigoureux et ses conseils avisés tout au long de ce Projet de Fin d'Études. Sa disponibilité, son expertise et son soutien inébranlable ont été d'une aide inestimable et ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

On remercie également vivement **M. RAHMOUNI Lakhdar**, pour l'opportunité qui nous a été accordée de réaliser ce projet au sein de l'entreprise DFSP, et nous sommes reconnaissantes envers l'équipe de laboratoire pour leur encadrement et leur soutien qui ont joué un rôle déterminant dans la réussite de cette recherche. Ainsi, **M. Iskandar ZOUAGHI**, dont son aide précieuse durant notre stage a grandement facilité notre parcours.

Egalement notre gratitude au laboratoire QHSE pour leur collaboration a été essentielle et a permis l'accès aux installations nécessaires pour mener à bien cette étude. On vous remercie sincèrement pour avoir ouvert vos portes et pour votre assistance tout au long de ce processus.

On tient à remercier les membres du jury pour leur présence, pour leur lecture attentive de ce mémoire, ainsi que pour les remarques qu'ils nous adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer notre travail.

Un merci spécial à nos camarades de classe et amis, pour leurs encouragements, leurs échanges intellectuels stimulants et pour tous les moments partagés.

Enfin, nos plus sincères remerciements vont à nos familles pour leur soutien indéfectible et leur patience tout au long de cette aventure. Leur patience et leur encouragement ont été notre refuge et notre motivation durant tout le parcours académique.

De peur d'en avoir oublié, on souhaite remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce parcours universitaire.

AOUNE Sara et ZIREG Nacira.

Dédicaces

À tous ceux qui m'ont cru en moi, m'ont guidé , soutenu et inspiré durant ce parcours, je dédie humblement ce mémoire.

À mes chers parents,

Mon père, Ma mère, quoi que je dise ou que je fasse, je n'arrivai jamais à vous remercier comme il se doit.

Vous avez toujours été là, me soutenant dans les moments les plus difficiles, croyant en mes capacités même lorsque je doutais de moi-même. Vous êtes mes piliers, mes modèles de persévérance, mes premiers supporteurs et ma plus grande force.

Merci pour votre présence, votre soutien, votre aide financière, et surtout votre amour inconditionnel, merci de n'avoir jamais douté de moi.

C'est grâce à vos encouragements, vos bienveillances et votre présence à mes côtés, que j'ai réussi ce respectueux parcours. Je souhaite que vous soyez fière de moi, et que j'ai pu répondre aux espoirs que vous avez fondé en moi.

**À mes chers frères,
AYMEN, FAROUK, KHEIREDDINE et ABDERRAZAK,**

Vous êtes mes compagnons de vie. Vos encouragements, votre humour et votre présence m'ont donné le bonheur et la motivation dont j'avais besoin. Je vous souhaite tout le bonheur et la réussite que vous méritez, et j'espère pouvoir être un modèle pour vous, comme vous l'êtes pour moi.

À l'âme de mes grands-pères LAKHDAR et BENAÏSSA,

Aux personnes les plus admirables qui nous ont quittés, je dédie ce travail, dont la mémoire continue de m'inspirer et de m'accompagner. Leur héritage et leurs valeurs demeurent une source de lumière et de guidance dans mon cheminement personnel et académique.

À ma meilleure amie AMINA,

Qui depuis des années m'encourage, me comprend et a toujours été à mes côtés , que dieu lui donne du bonheur, santé et réussite .

Sans oublier mon binôme SARA,

Qui m'a accompagné durant ce parcours avec dévouement et persévérance. Son soutien, sa bonne humeur et son esprit de collaboration ont été des atouts précieux tout au long de ce projet. Ensemble, nous avons relevé de nombreux défis et partagé des moments inoubliables, et je lui suis profondément reconnaissante pour tout ce que nous avons accompli ensemble.

À travers ses lignes je ne peux pas vous décrire tous mes sentiments d'amour, le seul mot que je peux dire est merci, vraiment merci beaucoup à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nacira

Dédicaces

Du fond du cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers.

À mes chers parents,

À mes trésors, mes prunelles, vous avez toujours été mon port d'attache et ma boussole.

Merci pour votre amour inconditionnel, votre dévouement sans limite et votre soutien indéfectible. Vous avez illuminé mon chemin dans les moments les plus sombres et vous avez toujours cru en moi. Je vous dois tout.

Vous m'avez appris la valeur du travail acharné, de la persévérance et de l'honnêteté. Je vous suis profondément reconnaissante pour vos conseils avisés et votre encouragement constant.

Vous m'avez inspirée à viser plus haut et à poursuivre mes rêves. Votre confiance et votre amour sont ma plus grande force.

À mes merveilleux frères, Abderrahmane et Yasser,

Chacun de vos sourires a éclairé mon chemin, et chaque mot d'encouragement a nourri mes rêves. À travers ce travail, je célèbre notre lien indéfectible. Merci d'avoir été mes anges gardiens. Cette réussite est aussi la vôtre.

À mes grands-parents,

Je vous dédie cette réussite, vous qui m'avez toujours soutenue et qui avez cru en moi. Vos prières ont été ma force silencieuse, guidant chacun de mes pas.

À mon ami Kacimo,

Compagnon de mille aventures et confident de chaque instant, je te remercie pour ta loyauté inébranlable et ta présence réconfortante, qui illumine ma vie au quotidien.

À ma chère binôme, Nacira,

À ma sœur de cœur, avec qui j'ai partagé une partie de mon parcours et vécu des moments inoubliables de joie et de complicité. Ta gentillesse et ton soutien m'ont été précieux. Merci du fond du cœur d'avoir été ma partenaire de chaque instant. Ton amitié sincère est un cadeau inestimable.

À moi-même, Djihane,

À la petite fille que j'étais, à la femme que je suis devenue, je me dédie cette réussite, fruit de ma détermination et de mon courage. À chaque défi affronté, j'ai investi tout mon cœur, mon âme, mon énergie et ma passion. Je suis profondément émue par le chemin parcouru. Je continue d'avancer avec une force renouvelée et une conviction ardente. Aujourd'hui, je me célèbre avec une immense fierté et une gratitude sincère.

À tous ceux qui ont contribué à ma réussite et à ceux qui m'aiment, Votre soutien, vos encouragements et votre amour m'ont portée jusqu'ici. Merci infiniment.

Sara

Table des matières

Liste des tableaux	12
Table des figures	14
Introduction générale	18
1 Présentation du gisement de Hassi Messaoud	20
1.1 Présentation sur la géologie du Hassi Messaoud	20
1.2 Présentation de la région	20
1.3 Situation géographique	20
1.4 Situation géologique de Hassi-Messaoud	21
1.5 Structure du Champ de Hassi Messaoud	22
1.6 Evolution Structurale du Champ de Hassi Messaoud	23
1.7 Historique de production du champ	23
2 Généralités sur les fluides de forage	25
2.1 Introduction	25
2.2 Le forage du puits	25
2.3 Système de forage rotary	26
2.4 Définition de fluide de forage	27
2.5 Fonctions de fluide de forage	29
2.6 Cycle de fluide de forage	30
2.7 Le choix de boue de forage	31
2.8 Les types de fluide de forage	31
2.8.1 Les boues dont la phase continue est l'eau (WBM)	32
2.8.2 Les boues dont la phase continue est l'huile (OBM)	32

2.8.2.1	Caractéristiques des boues à base d’huile	33
2.8.2.2	Les principaux avantages des boues à l’huile :	33
2.8.2.3	Les principaux inconvénients des boues à l’huile :	33
2.8.3	Les boues dont la phase continue est d’huile synthétique (SBM)	34
2.8.4	Les boues dont la phase continue est du gaz	34
2.8.4.1	Forage à l’air	34
2.8.4.2	Forage à la mousse	35
2.8.4.3	Forage à la boue aérée	35
2.9	Composition des fluides de forage	35
2.9.1	Composition des fluides de forage à base d’eau WBM (Water Based Mud)	35
2.9.2	Composition des fluides de forage à base d’huile OBM (Oil Based Mud)	37
2.10	Caractéristiques des fluides de forage	37
3	Généralités sur les nanoparticules	41
3.1	Introduction	41
3.2	Définition de la nanotechnologie	41
3.3	Définition des nanoparticules	41
3.4	Les formes des nanoparticules	42
3.5	Les sources des nanoparticules	42
3.6	Généralités sur les oxydes de fer	42
3.7	Nanoparticules d’oxyde de fer	43
3.8	Caractérisation des nanoparticules	44
3.9	Concentration des nanoparticules	45
3.10	Méthodes de fabrication de nanoparticules	45
3.11	Avantages de nanoparticules	46
3.12	Application des nanoparticules dans l’industrie pétrolière et gazière	47
3.13	Application des nanoparticules dans divers secteurs	47
4	Synthèse de Production des Nanoparticules de Fer	48
4.1	Introduction	48
4.2	Synthèse des nanoparticules d’oxyde de Fer au laboratoire	48
4.2.1	Etapas des essais préliminaires	48

4.2.2	Matériaux et Réactifs Utilisés	49
4.2.2.1	Instruments de mesure	49
4.2.2.2	Réactifs utilisés	50
4.2.3	Procédure de Synthèse	51
4.2.3.1	Préparation des réactifs :	51
4.2.3.2	Co-précipitation et Formation des nanoparticules	52
4.2.3.3	Séparation par centrifugation	54
4.2.3.4	Lavage et purification	54
4.2.3.5	Le séchage :	55
4.2.4	Contrôle des paramètres de synthèse	56
4.2.4.1	Les paramètres contrôlés	56
4.3	Conclusion	57
5	Formulation et Caractérisation des Fluides de Forage	58
5.1	Introduction	58
5.2	Formulation des fluides de forage	58
5.2.1	Composition des Boues à Base d'Eau	58
5.2.2	Composition des fluides de forage à base d'huile	59
5.2.3	Intégration des Nanoparticules d'oxyde de Fer dans les fluides	60
5.2.4	Protocoles de préparation	61
5.3	Mesures et caractérisations des fluides de forage	61
5.3.1	Propriétés Rhéologiques (Viscosité, Thixotropie)	61
5.3.1.1	Signification et variation des paramètres rhéologiques	61
5.3.1.2	Mesures et instruments	62
5.3.1.3	Protocole des mesures	63
5.3.1.4	Exploitation des résultats	64
5.3.2	Propriétés de Filtration	69
5.3.2.1	Filtration des Fluides de Forage	69
5.3.2.2	Appareils de Mesure	69
5.3.2.3	Interprétation des résultats	72
5.3.3	La densité	77

5.3.3.1	Appareil de Mesure	78
5.3.3.2	Exploitation des résultats	78
5.3.4	Mesures de distillation	81
5.3.4.1	Appareil de Mesure	81
5.3.4.2	Exploitation des résultats :	81
5.3.5	Mesures de la stabilité électrique	82
5.3.5.1	Exploitation des résultats	83
5.3.6	Évaluation de l'Efficacité des Nanoparticules	85
5.4	Résultats et discussion	85
5.4.1	Performances des boues à base d'eau	85
5.4.2	Performances des fluides à base d'huile	86
5.4.3	Comparaison entre fluides avec et sans Nanoparticules	86
5.4.4	Analyse des résultats et interprétations	86
5.5	Conclusion	87
6	Plan Financier : Analyse des Coûts	88
6.1	Introduction	88
6.2	Analyse des Coûts	88
6.3	Analyse de la Rentabilité	92
6.3.1	Chiffre d'Affaires Prévisionnel	92
6.3.1.1	Estimation des Ventes sur le Marché Pétrolier et Gazier	93
6.3.1.2	Estimation des Ventes sur les autres marchés	93
6.3.2	Analyse des Marges Bénéficiaires	93
6.3.2.1	Calcul de la Marge Brute	93
6.3.2.2	Calcul de la Marge Nette	94
6.3.3	Retour sur Investissement (ROI)	94
6.3.3.1	Méthodologie de Calcul du ROI	95
6.3.3.2	Résultats et Interprétation	95
6.3.4	Potentiel de Croissance	95
6.4	Analyse Financière	96
6.4.1	Plan de Financement	96

6.4.1.1	Sources de Financement	96
6.4.1.2	Besoins de Financement à Court et Long Terme	96
6.4.2	Prévisions Financières	97
6.4.2.1	Prévisions de Trésorerie	97
6.4.2.2	Prévisions des bénéfices	97
6.4.3	Analyse de Sensibilité	98
6.4.3.1	Impact des variables clés sur la rentabilité	98
6.4.3.2	Scénarios Optimistes, Pessimistes et Réalistes	98
6.5	Étude de Marché	99
6.5.1	Analyse de la Demande	99
6.5.1.1	Segmentation du Marché	99
6.5.1.2	Tendances et Perspectives de Croissance	99
6.5.2	Analyse de la Concurrence	100
6.5.2.1	Principaux Acteurs du Marché	100
6.5.2.2	Forces et Faiblesses des Concurrents	100
6.5.2.3	Concurrence Locale en Algérie	100
6.6	Conclusion	101
	Conclusion générale	102
	Bibliographie	106

Liste des tableaux

2.1	Les principaux additifs ajoutés dans les fluides de forage	36
3.1	Propriétés physico-chimiques des oxydes de fer[1]	43
3.2	Caractéristiques physiques et chimiques des nanoparticules	44
4.1	Les principaux instruments de mesure	50
4.2	Tableau de contrôle du pH pour un essai.	56
5.1	Principaux constituants de fluide de forage à base d'eau	59
5.2	Principaux constituants de fluide de forage à base d'huile	60
5.3	Résultats des propriétés rhéologiques des formulations OBM	64
5.4	Résultats des propriétés rhéologiques des formulations WBM	67
5.5	Les résultats de filtration et l'épaisseur de cake des différentes formulations à base d'huile	73
5.6	Les résultats de filtration et l'épaisseur de cake des différentes formulations à base d'eau	75
5.7	Les résultats de la densité pour les formulations à base d'huile	79
5.9	Tableau de résultat de mesures de distillation	82
5.10	Les résultats mesurés de la stabilité électrique	83
6.1	Les coûts et les charges de la startup au cours de la première année.	89
6.2	Les investissements amortissables de la startup sur une période de cinq ans.	90
6.3	Coût des équipements de production de nanoparticules	91
6.4	Coût de production de 100g des nanoparticules	92
6.5	Prévision du chiffre d'affaires de la startup pour la première année.	93
6.6	Analyse de la rentabilité de la startup au cours des trois premières années.	94
6.7	Analyse du retour sur investissement de la startup pour la première année.	95

6.8	Prévisions financières de la startup pour les quatre premières années.	96
6.9	Prévisions de flux de trésorerie de la startup pour la première année.	97
6.10	Prévision du chiffre d'affaires, des coûts et des bénéfices de la startup au cours des quatre premières années.	98
6.11	Scénarios envisageables pour la startup.	99

Table des figures

1.1	Situation géographique du champ de Hassi Messaoud [2]	21
1.2	Situation géologique du champ de Hassi Messaoud [2]	22
1.3	L'anticlinal d'Hassi Messaoud [2]	22
1.4	Zonation du champ de Hassi Messaoud [2]	24
2.1	Différents types d'installaion de forage rotary [3]	26
2.2	Système de forage [4]	27
2.3	Illustration schématique d'un système de circulation de fluide de forage [5]	28
2.4	Circulation de fluide de forage [6]	28
2.5	Circuit de fluide de forage [7]	31
3.1	Structure cristalline des nanoparticules de Fe_3O_4 [8]	43
3.2	Structure de maille de Fe_3O_4 [8]	44
3.3	Classification des nanoparticules par méthodes de fabrication [9]	45
3.4	Classification des nanoparticules selon leur composition [9]	46
4.1	L'ensemble de verrerie de laboratoire utilisé dans nos expériences.	49
4.2	Les réactifs utilisés lors des expériences de co-précipitation : Chlorure de fer hexahydraté ($\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) et Sulfate ferreux ammoniacal ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$)	50
4.3	Solution d'ammoniaque NH_3 utilisée pour le processus de synthèse	51
4.4	Pesée des réactifs chimiques	52
4.5	Solutions de réactifs préparées pour la synthèse	52
4.6	Mélange des réactifs pour obtenir une solution de chlorures de fer	53
4.7	Titration de la solution de l'ammoniaque avec la solution de fer.	53
4.8	Contrôle de pH pendant l'opération du titrage.	53
4.9	La solution finale qui contient les nanoparticules d'oxyde de fer	54

4.10	Transfert de la solution dans des tubes à essais pour l'analyse ou le stockage. . .	54
4.11	Appareil utilisé pour effectuer le processus de centrifugation.	55
4.12	Les opérations du lavage et de filtration des nanoparticules préparées.	55
4.13	Évolution des nanoparticules d'oxyde de fer : avant séchage, après séchage et état final	56
5.1	Schéma d'un rhéomètres à cylindres rotatifs [10]	62
5.2	Rhéomètres à cylindres rotatifs modèle FANN	63
5.3	Courbes rhéologiques des fluides de forage à base d'huile avec l'ajout de NP d'oxyde de fer	65
5.4	Courbes rhéologiques des fluides de forage à base d'eau avec l'ajout de NP d'oxyde de fer	68
5.5	Schéma de Fonctionnement du Filtre-Pressé HPHT [11].	70
5.6	Appareil de filtration sous haute pression et haute température (HPHT) de type FANN	70
5.7	Schéma du dispositif de presse-filtre API pour l'évaluation de la filtration des boues de forage [12]	71
5.8	Filter Press API model FANN	72
5.9	Le résultat de volume de filtrat	73
5.10	Le graphe qui représente le volume de filtrat HPHT des différentes formulations OBM	74
5.11	Le résultat de cake	74
5.12	Le graphe qui représente l'épaisseur du gâteau (cake) de filtration des différentes formulations OBM	75
5.13	Le graphe qui représente le volume de filtrat API des différentes formulations WBM	76
5.14	Le graphe qui représente l'épaisseur du gâteau (cake) de filtration des différentes formulations WBM	76
5.15	Le résultat de filtrat et le cake de formulations WBM	77
5.16	Densimètre model FANN	78
5.17	Valeurs de densité pour les différentes formulations de boues à base d'huile (OBM)	79
5.18	Le graphe de densité des différentes formulations de boues à base d'eau (WBM) et WBM + (XG+NP)	80
5.19	Distillateur de type Fann pour la collecte du condensat.	81
5.20	Testeur de stabilité électrique model FANN	83

5.21 La courbe de la stabilité électrique des différentes formulations pour une boue à base d'huile (OBM).	84
--	----

TABLE DES FIGURES

Introduction générale

Les fluides de forage ou boues de forage, jouent un rôle essentiel dans les opérations de forage pétrolier et gazier. Ils sont conçus pour remplir plusieurs fonctions qui garantissent l'efficacité et la sécurité du processus de forage. Les principales fonctions des fluides de forage incluent le contrôle de la pression dans le puits, le refroidissement et la lubrification du trépan, et le transport des débris rocheux (cuttings) vers la surface. En contrôlant la pression, les fluides de forage empêchent les éruptions incontrôlées (blowouts) en équilibrant la pression de formation. Ils maintiennent également la stabilité du puits en scellant les parois à travers la formation d'un gâteau de boue, évitant ainsi l'effondrement des parois du puits.

Les fluides de forage sont généralement classés en trois catégories principales : les boues à base d'eau (WBM)¹, les boues à base d'huile (OBM)² et les boues synthétiques (SBM)³.

Chacune de ces catégories présente des avantages et des inconvénients en fonction des conditions de forage spécifiques.

Les OBM sont particulièrement efficaces pour forer à travers des formations instables en raison de leur faible réactivité avec l'eau, mais leur utilisation est limitée par des considérations environnementales strictes. Les avancées récentes en technologie des fluides de forage incluent l'incorporation de nanoparticules pour améliorer les propriétés des boues, telles que les nanoparticules améliorent les propriétés rhéologiques des fluides de forage par divers mécanismes liés à la phase continue des fluides et à leurs propres caractéristiques. Elles peuvent augmenter la viscosité apparente, faciliter le déplacement des fluides dans les processus de récupération assistée du pétrole, et renforcer la stabilité thermique. Il est bien établi que les nanofluides présentent une viscosité supérieure à celle des dispersions conventionnelles à concentration volumique égale de particules.

De plus, les nanoparticules augmentent la stabilité des fluides de forage à base d'émulsions, grâce à leur grande énergie libre d'adsorption qui leur permet de se fixer à l'interface huile-eau en fonction de leur hydrophobie. Elles améliorent également la stabilité électrique et les capacités de transport des cuttings. Grâce à leur conductivité thermique élevée, les nanoparticules dissipent efficacement la chaleur générée par le mouvement brownien, ce qui permet au fluide de conserver sa forme liquide même à haute température.

Les études montrent que les nanofluides possèdent des conductivités thermiques plus élevées que les fluides de base. Ces innovations sont conçues pour relever les défis des forages pétroliers en conditions de haute température et haute pression (HPHT), où les fluides traditionnels peuvent échouer. Le développement de fluides de forage performants et respectueux de l'environnement constitue un domaine de recherche en constante évolution, essentiel pour soutenir les opérations dans des environnements de plus en plus complexes et exigeants.

1. WBM : Water based mud
2. OBM : Oil based mud
3. SBM : Synthetic based mud

Les fluides de forage à base de nanoparticules sont souvent qualifiés de fluides intelligents en raison de leur capacité à répondre de manière adaptative aux conditions variées et souvent extrêmes rencontrées lors des opérations de forage. Contrairement aux fluides traditionnels, ces fluides intelligents possèdent des propriétés modulables qui leur permettent de s'ajuster automatiquement aux changements de température, de pression, et d'autres paramètres environnementaux en temps réel. Par exemple, les nanoparticules intégrées dans ces fluides peuvent modifier la viscosité du fluide en réponse à une augmentation de la température, ce qui permet de maintenir la stabilité et l'efficacité du forage même dans des conditions de haute température et haute pression (HPHT).

De plus, grâce à leur taille nanométrique et à leur grande surface spécifique, ces particules peuvent interagir de manière ciblée avec les particules de roche et d'autres contaminants présents dans le puits, facilitant ainsi le transport des cuttings et la prévention des bouchons dans le forage. Ces caractéristiques confèrent aux fluides à base de nanoparticules une intelligence intrinsèque, leur permettant d'optimiser les opérations de forage en fonction des conditions spécifiques du puits, tout en minimisant les risques d'échec et en maximisant l'efficacité opérationnelle.

L'objectif principal de cette étude, menée par notre startup, est de développer un fluide de forage intelligent à base d'eau et d'huile, spécifiquement conçu pour répondre aux exigences rigoureuses des compagnies pétrolières. Ces exigences se concentrent principalement sur la maîtrise de la viscosité et du yield point (c'est la contrainte minimale nécessaire pour qu'un fluide commence à s'écouler) des fluides de forage, des paramètres critiques pour garantir la performance et la sécurité des opérations de forage en milieu difficile.

Afin de satisfaire ces attentes, nous avons entrepris une série d'essais préliminaires visant à définir les paramètres optimaux pour notre plan d'expériences. Ces essais nous ont également permis d'identifier les ingrédients spécifiques à incorporer dans la formulation de nos fluides de forage.

En développant un fluide de forage capable de s'ajuster de manière dynamique aux conditions de forage, notre ambition est d'inscrire notre solution comme une référence dans le secteur pétrolier pour les opérations en environnements complexes et exigeants.

Le présent document est structuré en deux grandes parties. La première, de volée théorique, comprend trois chapitres : le premier chapitre est consacré à la description géologique du champ de Hassi Messaoud, le deuxième chapitre aborde les généralités sur les fluides de forage, et le troisième chapitre traite les nanoparticules, en détaillant leurs types, leurs applications dans les fluides de forage à base d'eau et d'huile, ainsi que leurs rôles spécifiques.

La deuxième partie, quant à elle, comprend trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à la fabrication des nanoparticules à base d'oxydes de fer synthétiques. Le deuxième chapitre porte sur la formulation et la caractérisation des fluides de forage intégrant ces nanoparticules, en abordant des aspects tels que la viscosité, la yield point, les tests de stabilité électrique et les tests HPHT. Enfin, le troisième chapitre traite de l'aspect financier du processus de fabrication des nanoparticules à une échelle semi-industrielle.

Chapitre 1

Présentation du gisement de Hassi Messaoud

1.1 Présentation sur la géologie du Hassi Messaoud

Le gisement de Hassi Messaoud est l'un des gisements les plus importants d'hydrocarbures en Algérie. Il présente une structure en dôme anticlinal, largement héritée de la phase orogénique hercynienne dont le paroxysme s'est produit à la fin du Paléozoïque. Découvert en 1956 et mis en production généralisée en 1958. Le gisement de Hassi Messaoud continue, après plus de 50 ans, de fournir à l'Algérie cette ressource naturelle qu'est le pétrole brut. Des investissements importants ont été réalisés et d'autres le seront dans le futur pour extraire le maximum de pétrole, contribuant ainsi au développement de l'économie nationale.

1.2 Présentation de la région

La région de Hassi Messaoud est localisée dans le Nord de la partie centrale du Sahara algérien, connue pour ses puits productifs d'huile principalement dans les réservoirs cambriens. Le champ de Hassi-Messaoud représente l'un des champs les plus complexes au monde. Durant l'histoire géologique, ce champ a subi d'une part une évolution tectonique intense caractérisée par des phases compressives distinctives. D'autres part, par la transformation diagénétique dans le réservoir, lors de son enfouissement au cours des temps géologiques, jusqu'à ce que le gisement a pris la forme ou la configuration actuelle [13].

1.3 Situation géographique

Le champ de Hassi Messaoud est le plus grand gisement d'huile d'Algérie, et se situe à environ 850 km au Sud-Est d'Alger, à 280 km au Sud-Est du gisement du gaz de Hassi R'Mel et à 350 km à l'Ouest de la frontière Tunisienne (figure 1.1), Il s'étend sur une superficie de 2500 Km². Il a pour coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator) [13] :

X = [772.000 - 840.000] Est

Y = [348.4000 - 353.5000] Nord

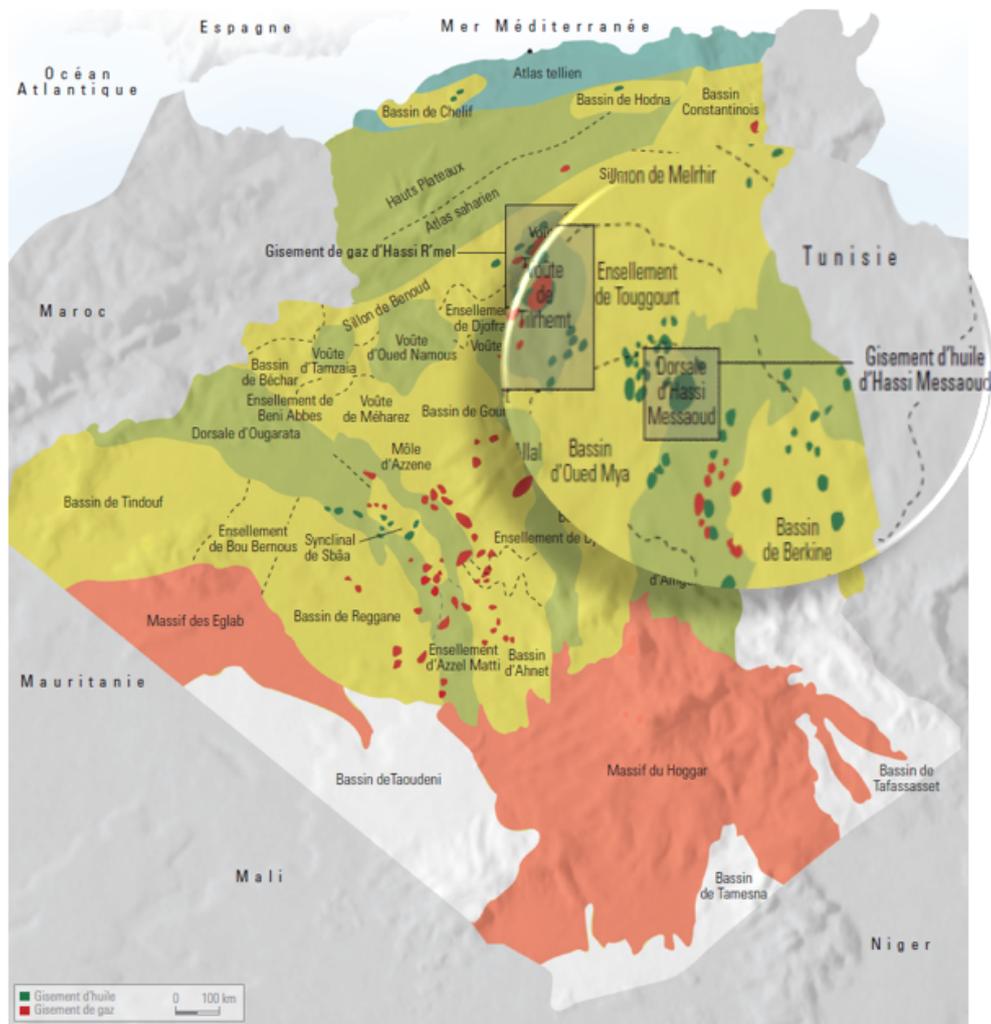


FIGURE 1.1 – Situation géographique du champ de Hassi Messaoud [2]

1.4 Situation géologique de Hassi-Messaoud

Le champ de Hassi Messaoud occupe la partie centrale de la province triasique. Par sa superficie et ses réserves, qui est connue par ses puits productifs d'huile principalement dans les réservoirs cambriens (voir figure 1.2). Le gisement pétrolier de Hassi Messaoud est délimité par les coordonnées géographiques suivantes :

- Au Nord-Ouest par les gisements d'Ouargla [Gellala, Ben Kahla et Haoud Berkaoui].
- Au Sud-Ouest par les gisements d'El Gassi, Zotti et El Agreb.
- Au Sud-Est par les gisements Rhourde El Baguel et Mesdar.

De point de vue géologique, il est limité par :

- A l'Ouest par la dépression d'Oued Mya.
- Au Sud par le môle d'Amguid El Biod.
- Au Nord par la structure Djemâa-Touggourt.
- A l'Est par les hauts fonds de Dahar, Rhourde El Baguel et la dépression de Ghadamès.

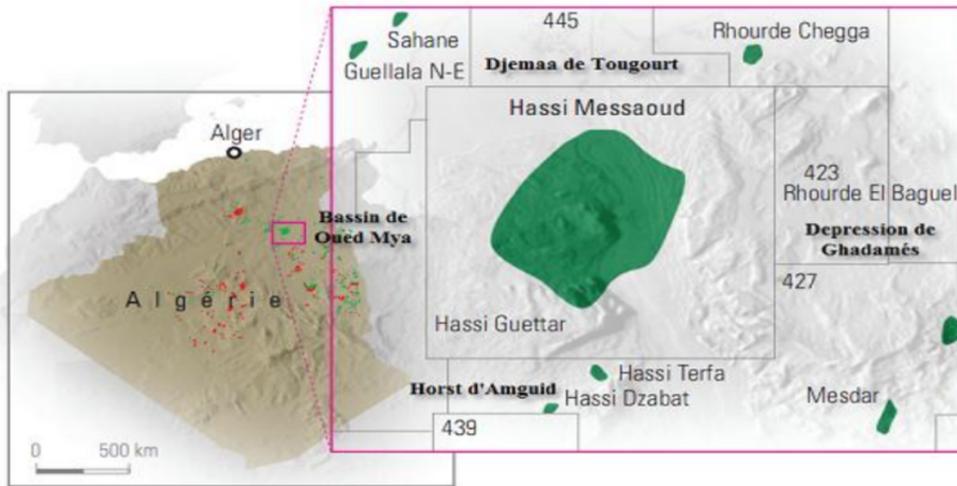


FIGURE 1.2 – Situation géologique du champ de Hassi Messaoud [2]

1.5 Structure du Champ de Hassi Messaoud

La structure du champ pétrolier de Hassi Messaoud est caractérisée par un anticlinal subcirculaire étendu, mesurant environ 45 km de diamètre et s’orientant selon un axe NNE-SSW comme le montre la figure 1.3. Cette formation géologique est clairement visible dans la figure 1.3, où l’anticlinal est délimité en rouge, entouré par des roches mères du Silurien. La section schématique sur le côté droit de l’image illustre la structure en coupe, montrant le plissement des couches géologiques et la disposition stratigraphique qui comprend le socle (Basement) en dessous et les strates d’Ordovicien et de Cambrien au-dessus, contribuant à la complexité du gisement[13].

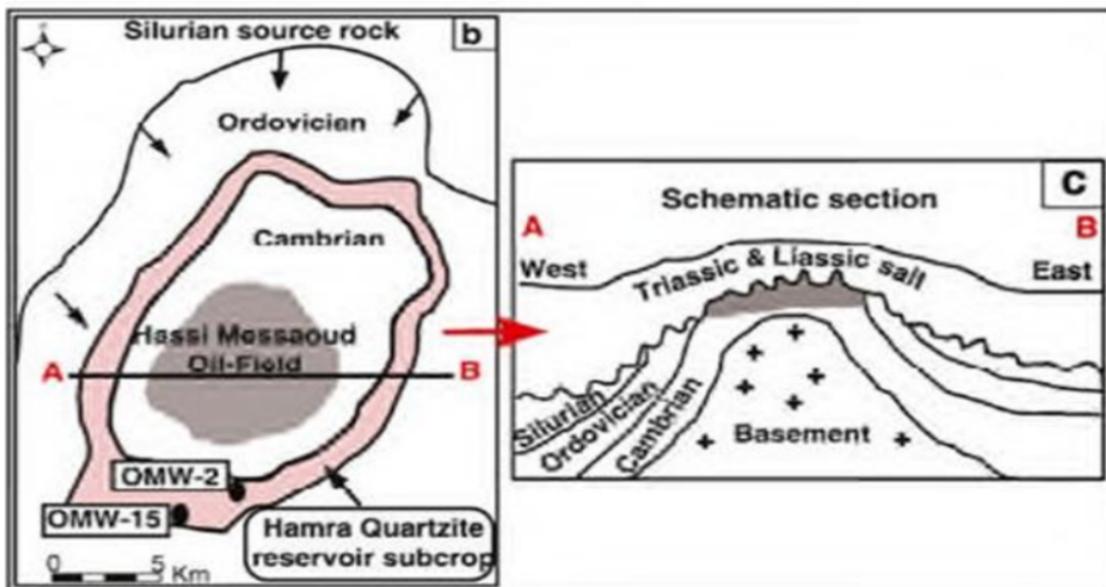


FIGURE 1.3 – L’anticlinal d’Hassi Messaoud [2]

1.6 Evolution Structurale du Champ de Hassi Messaoud

L'évolution structurale du champ de Hassi Messaoud, est le résultat de plusieurs périodes de structuration tectoniques affectant le Sahara central, parmi lesquelles on peut citer :

1- La Phase Panafricaine : C'est une phase compressive de direction E-W, résultat d'une collision continental entre le craton ouest africain rigide et le bloc Est africain plastic [14], provoquant un réseau de failles de direction NE-SW, NW-SE suivie d'une Érosion intense jusqu'au cambrien, conduisant à la formation d'une surface de pénéplanation appelée InfraTassilienne [13].

2 -La Phase Hercynienne : Cette phase est datée de 225 à 280 Ma. Elle est responsable d'un grand bombement de direction NE-SW, accompagné d'un jeu de failles de même direction qui dissocie le réservoir en bloc (horst et graben), ayant chacun son comportement propre. On marque une érosion de toute la couverture paléozoïque à l'aplomb du gisement et par la disposition radiale de grandes vallées de creusement [13].

3- La Phase Atlasique : C'est une phase compressive de direction NNE-SSW, postérieure à la formation des hydrocarbures. Donc elle est probablement à l'origine des barrières de perméabilités dues à un décalage des niveaux réservoir [13].

1.7 Historique de production du champ

Le premier forage du puits MD1 a été réalisé le 15 janvier 1956, et le 15 juin de la même année, ce forage a permis de découvrir une couche productrice gréseuse datant du Cambrien, située à une profondeur de 3338 mètres, caractérisée par une grande variabilité de ses propriétés pétrophysiques, telles que la porosité et la perméabilité, des paramètres cruciaux pour la productivité des puits. En mai 1957, la CFPA a foré un autre puits, l'OM1, situé environ 7 km au nord-ouest du puits MD1, confirmant l'existence d'un gisement de pétrole dont l'épaisseur peut atteindre 200 mètres et la pression initiale est estimée à 482 kg/cm². La production du champ a commencé en 1958 avec 20 puits producteurs. Initialement, le drainage se faisait par expansion du gaz dissous, mais aujourd'hui, il repose sur la récupération secondaire par injection d'eau ou de gaz miscible. Depuis la nationalisation des hydrocarbures le 24 février 1971, les forages n'ont cessé de se multiplier.

Actuellement, le gisement de Hassi Messaoud est subdivisé en 25 « zones de production », définies en fonction du comportement moyen des pressions de gisement. Une zone de production est un ensemble de puits qui communiquent entre eux, mais très peu ou pas du tout avec ceux des zones voisines. Ces zones sont séparées par des interzones, qui correspondent généralement à des secteurs où passent des failles. Ces failles constituent des barrières plus ou moins étanches à la circulation des fluides entre les différentes zones de production (voir figure 1.4).

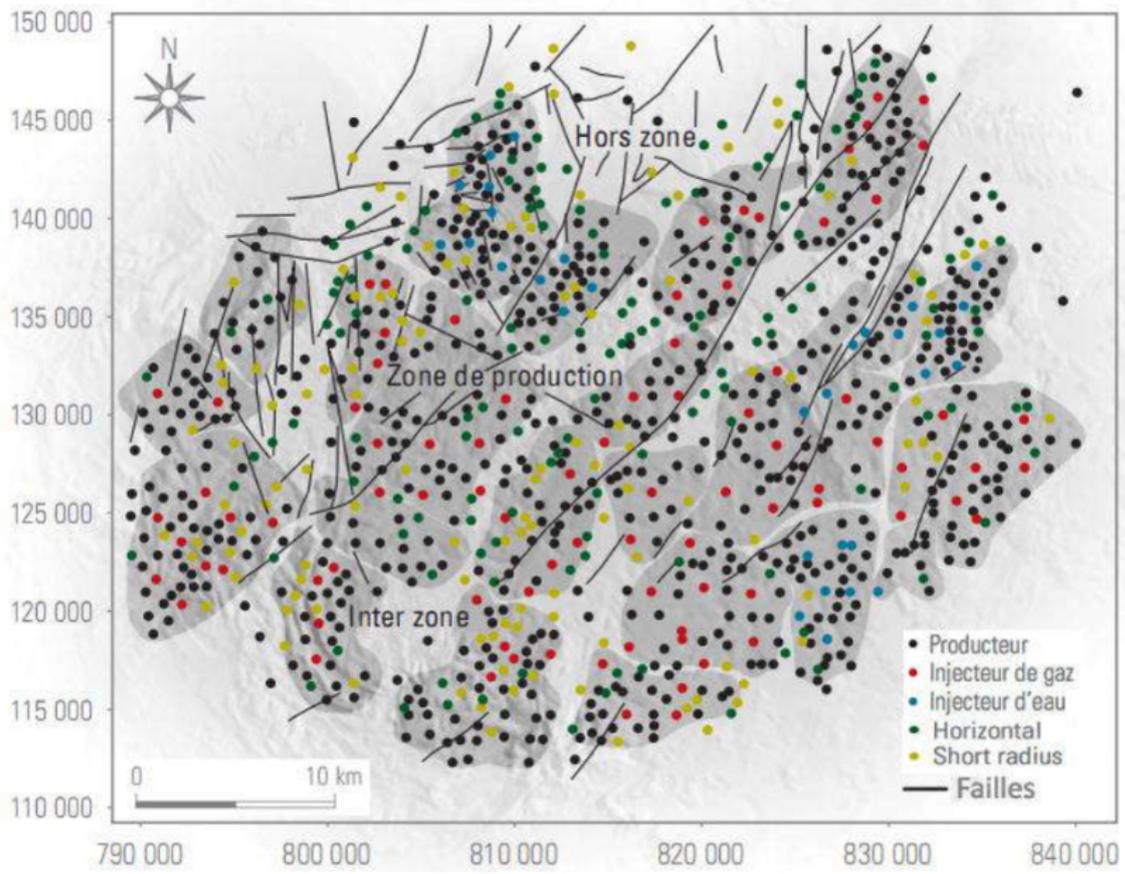


FIGURE 1.4 – Zonation du champ de Hassi Messaoud [2]

Chapitre 2

Généralités sur les fluides de forage

2.1 Introduction

Les fluides de forage jouent un rôle prépondérant dans le succès du forage des puits de pétrole en raison de leurs nombreuses fonctions essentielles. Leur importance est telle que toute erreur dans leur utilisation peut entraîner la perte du puits ou, au minimum, causer des dommages sévères, retardant ainsi le processus de forage.

Plusieurs problèmes peuvent survenir lors du forage, notamment la perte de fluides et la contamination du liquide par divers polluants tels que l'eau salée ou le sulfate de calcium. Pendant le forage, on récupère autant que possible le fluide de forage pour le diriger vers les réservoirs actifs après un traitement spécial ou chimique. Les déchets restants, en revanche, sont dirigés vers des bassins de décantation, ce qui entraîne de graves problèmes environnementaux. Ces déchets contiennent souvent des métaux lourds et des polluants organiques, qui sont nocifs pour les humains, les animaux et les plantes. Pour atténuer les risques environnementaux liés aux déchets de forage, il est essentiel d'adopter des méthodes de traitement efficaces telles que la décontamination chimique, la bioremédiation et la neutralisation des polluants. Ces techniques permettent de transformer les substances nocives en composés moins dangereux, de décomposer les polluants organiques et de stabiliser les métaux lourds. En mettant en œuvre ces approches, on peut réduire l'impact environnemental des déchets et protéger la santé publique ainsi que l'écosystème.

2.2 Le forage du puits

Le forage, qu'il soit en mer (offshore) ou sur terre (onshore) (voir figure 2.1), est l'opération qui consiste à extraire des matériaux pour réaliser un puits. Il est généralement destiné à exploiter plusieurs ressources naturelles du sous-sol, notamment différents fluides tels que l'eau, le pétrole et le gaz naturel, piégés dans les roches poreuses de la série lithologique d'un bassin sédimentaire. Ce processus comprend l'ensemble des opérations nécessaires pour atteindre les roches poreuses et imperméables du sous-sol, susceptibles de contenir des hydrocarbures liquides ou gazeux. Il requiert des équipements en surface, appelés « installation », qui sont connectés à d'autres équipements s'étendant sous terre, connus sous le nom de « garniture ». [3].



FIGURE 2.1 – Différents types d'installaion de forage rotary [3]

2.3 Système de forage rotary

Les puits de pétrole et de gaz sont principalement forés à l'aide du procédé de forage rotatif. Le principe général de ce procédé consiste à faire tourner un outil sur lequel une force est appliquée dans le sens de l'avancement pour atteindre le réservoir. Le poids exercé sur l'outil (Weight On Bit : WOB) est obtenu par gravité grâce à l'utilisation de tiges lourdes appelées masses-tiges. Le couple nécessaire pour forer la roche est fourni par un système de rotation des tiges en surface, ainsi que par un moteur de type moineau placé au-dessus de l'outil et contrôlé depuis la surface (voir figure 2.2). Cet outil, appelé trépan, est utilisé pour tailler, strier et détruire la roche [3].

Le forage rotary est le procédé le plus utilisé de nos jours, car il permet d'obtenir de meilleures vitesses d'avancement et, surtout, d'atteindre des profondeurs extrêmement élevées (plus de 7000 mètres). Au fur et à mesure que la roche est fragmentée en petits débris, appelés "cuttings" ou déblais de forage, une circulation continue de boue descend par l'intérieur des tiges et remonte par l'espace annulaire entre les tiges et le trou, évacuant ainsi les débris vers la surface [4]. Un système de forage rotary est composé de deux parties : L'installation et la garniture de forage.

- Installation

L'installation de forage est la partie située à la surface du sol. Elle comprend une tour, appelée derrick ou mât, sur laquelle sont situés les équipements de levage et de plancher qui permettent la manutention, le vissage et dévissage des tiges et le changement de l'outil (trépan).

- Garniture

La garniture désigne la partie souterraine du système de forage. Elle est constituée de deux parties principales : La partie haute formée du train des tiges (drill strings), la partie basse formée de l'assemblage de fond que l'on a coutume de désigner par BHA (« Bottom Hole Assembly »). L'installation de forage, conçue pour permettre la manœuvre de la garniture de forage, inclus les systèmes suivants :

- Un système de suspension,
- Un système rotary,
- Un système de circulation de boue,
- Un système de production d'énergie

L'avantage de cette technique est de pouvoir injecter en continu un fluide au niveau de l'outil destructif de la formation pour emporter les débris hors du trou grâce au courant ascensionnel de ce fluide vers la surface [3].

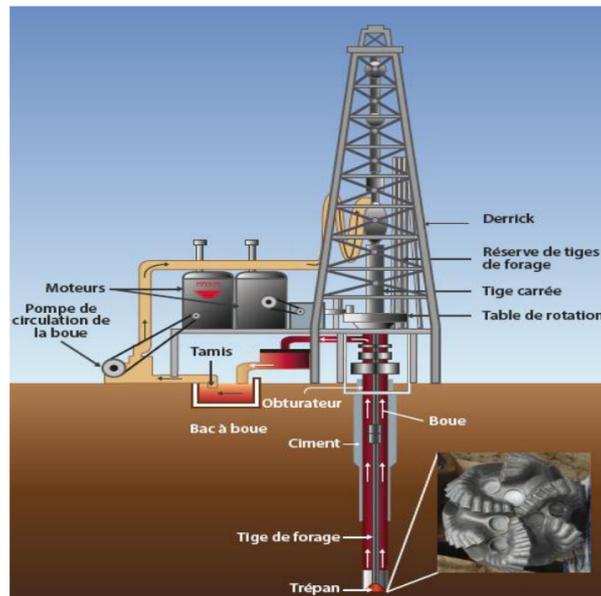


FIGURE 2.2 – Système de forage [4]

Le forage directionnel consiste à piloter le puits à forer suivant une trajectoire qui peut être tridimensionnelle et complexe en vue d'atteindre une cible dans le sous-sol qui est généralement le réservoir. Ce type de forage trouve son apogée dans plusieurs applications comme les puits à grand déport, le forage horizontal et le forage multilatéral à plusieurs niveaux.

2.4 Définition de fluide de forage

Historiquement, les fluides de forage ont évolué d'un simple mélange d'eau et d'argile appelé "boue" vers des systèmes de plus en plus complexes composés d'eau ou huile avec une multitude d'additifs répondant aux caractéristiques requises et aux problèmes rencontrés. Les fluides de forage sont des fluides complexes classés en fonction de la nature de leurs constituants de base. Le fluide de forage, est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments etc...).

Le fluide de forage était déjà présenté en 1933 lors du premier Congrès Mondial du Pétrole, où il a fait l'objet de cinq communications [15]. Le premier traité sur les fluides de forage a été publié en 1936 par Evans et Reid. En 1979, l'American Petroleum Institute (API) définit le fluide de forage comme un fluide en circulation continue durant toute la durée du forage, aussi bien dans le sondage qu'en surface.

Le fluide est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille (figure 2.3).

A la sortie du puits, il subit différents traitements, tamisage, dilution, ajout de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales. Il est ensuite réutilisé [16], [17]. Le fluide de forage est pompé dans le puits en phase de forage, généralement à l'aide d'un système de circulation en boucle fermée comme le montre le schéma ci-dessous.

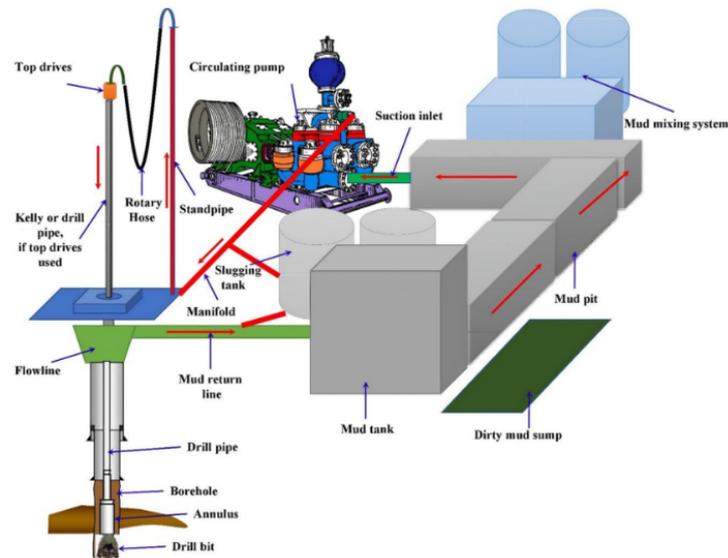


FIGURE 2.3 – Illustration schématique d'un système de circulation de fluide de forage [5]

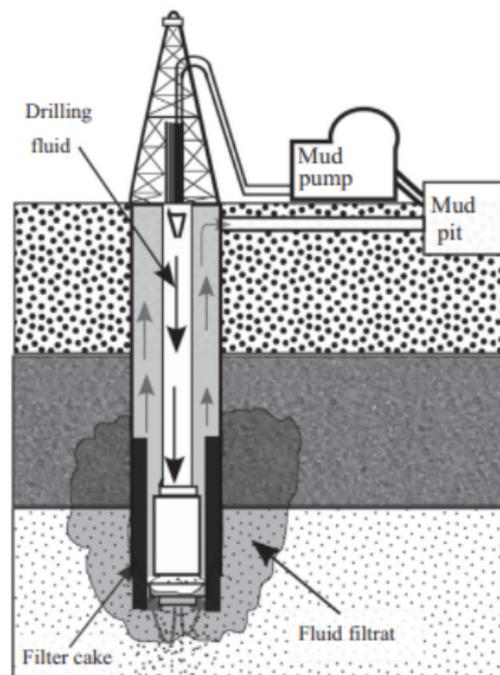


FIGURE 2.4 – Circulation de fluide de forage [6]

2.5 Fonctions de fluide de forage

De nombreuses exigences sont placées sur le fluide de forage. Historiquement, le premier but du fluide de forage était le nettoyage du puits, mais maintenant les applications diversifiées pour les fluides de forage rendent la tâche de certaines fonctions difficile. Lors du forage rotary, les boues de forage doivent avoir des propriétés leur permettant d'optimiser les fonctions suivantes :

- **Nettoyage du puits**

La boue doit évacuer du puits les particules de formation forées, connues sous le nom de « cuttings » ou « déblais ». Ces débris de roche doivent être efficacement transportés hors du trou de forage.

- **Maintien des déblais en suspension**

Le fluide de forage doit non seulement éliminer les déblais de forage du puits pendant les périodes de circulation, mais aussi les maintenir en suspension lorsque la circulation est interrompue.

- **Sédimentation des déblais fins en surface**

Alors que la boue doit maintenir les déblais en suspension dans le puits pendant les arrêts de circulation, elle doit également permettre la sédimentation des déblais fins à la surface pour leur élimination. Bien que ces deux fonctions semblent contradictoires, elles ne sont pas incompatibles.

- **Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde**

Du fait de son passage en surface, la boue en circulation se trouve à une température inférieure à celle des formations, ce qui lui permet de réduire efficacement l'échauffement de la garniture de forage et de l'outil. Cet échauffement est dû à la transformation d'une partie de l'énergie mécanique en énergie calorifique.

- **Dépôt d'un cake imperméable**

La filtration de la phase liquide de la boue dans les formations perméables crée une couche de filtration sur les parois du puits, appelée « cake ». Ce dépôt contribue à consolider les parois du puits et à réduire leur perméabilité.

- **Prévention des venues d'eau, de gaz, ou d'huile**

Pour éviter que les fluides présents dans les réservoirs rencontrés lors du forage ne s'écoulent dans le puits, la boue doit exercer une pression hydrostatique suffisante pour équilibrer les pressions de formation. La pression hydrostatique nécessaire est maintenue en ajustant la densité de la boue entre des valeurs maximales et minimales.

- **Augmentation de la vitesse d'avancement**

Comme le poids exercé sur l'outil, la vitesse de rotation et le débit du fluide, le choix du type et des caractéristiques de la boue influence les vitesses d'avancement instantanées, la durée de vie des outils, le temps de manœuvre et, en somme, les performances du forage. Un filtrat élevé peut accroître la vitesse d'avancement, tandis que des viscosités très faibles favorisent également la pénétration des outils.

- **Prévention des resserrements des parois du puits**

La boue doit avoir des caractéristiques physiques et chimiques telles qu'elle permette au trou de conserver un diamètre proche de celui de l'outil. Le cavage peut être causé par des éboulements, la dissolution du sel, la dispersion des argiles, ou l'érosion due à la circulation de la boue à travers des formations fragiles. Les resserrements sont souvent dus à une insuffisance de la pression hydrostatique de la colonne de boue, qui ne parvient pas à équilibrer la pression exercée par les roches.

- **Entraînement d'outils (turbine, etc...)**

Dans le cas du turboforage, la boue fait tourner la turbine. Cette action, nécessitant son passage à travers une série de composants et mettant en mouvement des aubages, impose certaines caractéristiques spécifiques. Cela rend l'utilisation de certains produits, tels que les colmatants, impossible ou très difficile.

- **Apport des renseignements sur le sondage**

La boue fournit des informations continues sur l'évolution des formations et des fluides rencontrés. Ces données sont obtenues :

- Par les déblais remontés avec la circulation du fluide.
- Par l'évolution des caractéristiques physiques et/ou chimiques de la boue.
- Par la détection de gaz ou d'autres fluides mélangés à la boue.

- **Contamination des formations productrices**

La présence d'un fluide au niveau de formations poreuses et perméables peut générer une pression hydrostatique supérieure à celle du réservoir, ce qui peut compromettre la mise en production future de cette zone.

- **Corrosion et usure du matériel**

Le fluide peut accélérer l'usure du matériel de forage par une action mécanique s'il contient des matériaux abrasifs. Il peut également être corrosif en raison d'une action électrolytique (présence d'ions), résultant d'un déséquilibre chimique.

- **Toxicité et sécurité**

La boue de forage ne doit pas présenter de danger pour la santé du personnel ni créer de risques d'incendie, notamment lors de l'utilisation de boues à base d'huile [18].

2.6 Cycle de fluide de forage

Les fluides de forage sont des systèmes liquides complexes comprenant des émulsions, de l'aération et des particules en suspension, adaptés à diverses applications souterraines. Le fluide de forage est pompé autour d'un puits, généralement au moyen d'un système de circulation en boucle fermée [9]. Pendant toute la durée du forage, aussi bien dans le puits qu'en surface, le fluide est préparé dans les bacs à boue, injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil, puis remonte dans l'espace annulaire chargé des déblais formés au front de taille. À la sortie du puits, il subit divers traitements (tamisage, dilution, ajout de produits, etc.) afin d'éliminer les déblais transportés et de réajuster ses caractéristiques physicochimiques et rhéologiques aux valeurs optimales avant sa réinjection [7].

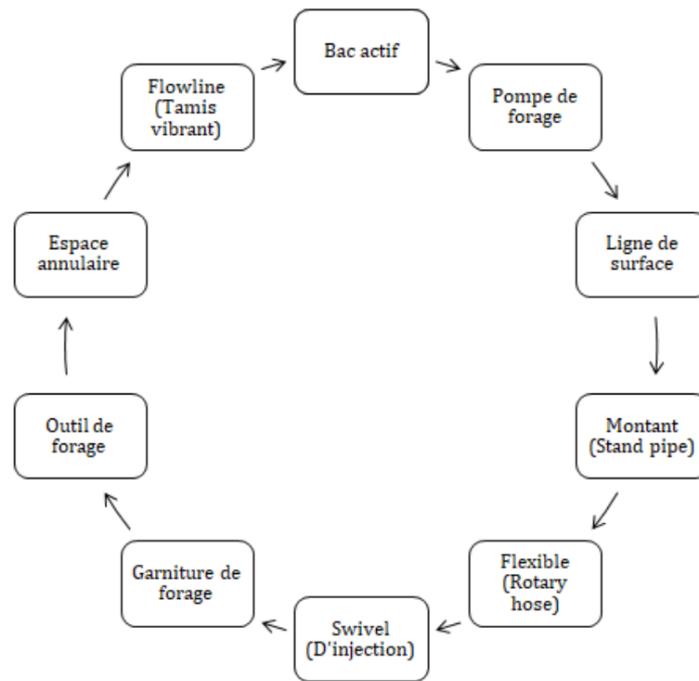


FIGURE 2.5 – Circuit de fluide de forage [7]

2.7 Le choix de boue de forage

Le choix des fluides de forage repose sur les conditions géologiques spécifiques et les contraintes associées à chaque phase de l'opération. Chaque étape du forage nécessite l'utilisation d'un fluide de forage ayant une densité adaptée aux exigences techniques et aux formations traversées.

Dans la première phase de forage, on utilise généralement une boue à base d'eau, comme la boue benthonique, pour sa capacité à stabiliser les formations superficielles. Ensuite, pour les phases plus profondes, une boue à base d'huile est préférée, en raison de sa meilleure stabilité thermique et de son efficacité à limiter les pertes de fluide dans des formations plus complexes. Le rapport huile/eau de cette boue varie selon les phases de forage, afin de répondre aux besoins spécifiques de chaque formation et de contrôler la pression de manière optimale.

2.8 Les types de fluide de forage

Les fluides de forage sont des systèmes complexes, classés en fonction de la nature de leurs constituants de base. Ils sont généralement subdivisés en trois groupes principaux :

- Les boues dont la phase continue est l'eau (Water Based Mud) ;
- Les boues dont la phase continue est l'huile (Oil Based Mud) ;
- Les boues dont la phase continue est d'huile synthétique (Synthetic Based Mud) ;
- Les boues dont la phase continue est du gaz.

2.8.1 Les boues dont la phase continue est l'eau (WBM)

Ces boues sont constituées par trois phases distinctes :

1. La phase liquide : L'eau constitue la phase la plus importante en volume et peut contenir de l'huile émulsifiée ainsi que divers produits chimiques solubles.
2. Les argiles et colloïdes organiques : Ajoutées volontairement ou issues des formations forées, ces substances sont employées pour conférer de la viscosité et réduire le filtrat. Lorsqu'elles sont mises en suspension dans l'eau, les argiles gonflent en absorbant de grandes quantités de liquide, augmentant ainsi la viscosité du mélange. La viscosité finale dépend de la qualité de l'argile et de la composition électrolytique de l'eau.
3. Les solides inertes : Composés de sable, barytine, etc, ces matériaux sont généralement insolubles dans l'eau et n'ont d'effet que par leur masse par exception : dolomies et calcaires.
4. Les boues de forage à base d'eau sont les plus couramment utilisées en raison de leur facilité de préparation et de leur coût abordable. Elles sont principalement employées pour forer les sections supérieures d'un puits. Pendant le forage, les matériaux issus des formations traversées peuvent se mélanger avec la boue, modifiant ainsi sa composition et ses propriétés. Ces boues se classifient en deux grandes catégories :
 - LES BOUES DOUCES : Leur teneur en NaCl ne dépasse pas quelques grammes par litre. Ces boues, appelées benthoniques, sont constituées principalement d'une suspension colloïdale de bentonite sodique dans l'eau.
 - LES BOUES SALÉES : Avec une teneur en NaCl variant de quelques dizaines de grammes par litre jusqu'à la saturation, ces boues sont utilisées pour forer à travers des zones salifères afin de prévenir le cavage. Elles sont composées d'eau, de sel (NaCl), de colloïdes minéraux, de colloïdes organiques (comme l'amidon), et d'un fluidifiant minéral ou organique (tel que la chaux ou la soude).

2.8.2 Les boues dont la phase continue est l'huile (OBM)

Les fluides à base d'huile, également appelés "Oil Based Muds" (OBM), sont des fluides où la phase continue est constituée d'huile minérale (telle que le pétrole brut, le fuel, le gasoil, etc.), et la phase dispersée est de l'eau. On distingue deux types principaux : les boues à l'huile, qui contiennent de 5 à 15 % d'eau au maximum, et les boues à émulsion inverse, pouvant contenir jusqu'à 60 % d'eau.

Comme les boues à base d'eau, les boues à base d'huile sont composées de trois phases distinctes :

- L'HUILE : Cette phase peut être raffinée ou brute, tandis que l'eau d'émulsion peut être douce, salée ou saturée.
- LES SAVONS ET ARGILES ORGANOPHILES : Ces composants apportent viscosité et corps à la boue tout en réduisant le filtrat.
- LES PRODUITS INERTES : Incluent des argiles, de la barytine, du carbonate de calcium, du sable, de la dolomie, etc. [19].

Cependant, un inconvénient majeur des fluides à base d'huile est la dégradation thermique des polymères utilisés dans leur formulation. Par exemple, le xanthane, un polymère couramment employé, a une stabilité thermique limitée, généralement entre 120°C et 138°C, ce qui peut poser des problèmes lors du forage à haute température.

2.8.2.1 Caractéristiques des boues à base d'huile

En plus du refroidissement assuré par l'huile sur les tiges de l'outil, qui réduisant les frottements des tiges contre les parois, les boues à base d'huile sont surtout sélectionnées pour les qualités techniques suivantes :

- Très bonnes caractéristiques de filtration statique (filtrat faible et constitué par de l'huile) avec un cake mince et soluble dans le brut ;
- Caractéristiques rhéologiques remarquables permettant le maintien des déblais et des alourdisants en suspension ;
- Inertie vis-à-vis des contaminants, argiles, marnes, sel, gypse, ciment ;
- Viscosité élevée de la phase fluide par rapport à celle des boues à base d'eau.

Les boues à base d'huile se sont imposées comme le premier système de boue en termes de propriétés lubrifiantes. Le système offre une stabilité du puits de forage, un faible couple et une faible traînée, un excellent contrôle des pertes de fluide et une excellente qualité du gâteau de filtration, des propriétés rhéologiques appropriées pour le nettoyage du trou et une stabilité de la température.

2.8.2.2 Les principaux avantages des boues à l'huile :

- Contrôle aisé des caractéristiques en l'absence de venues d'eau .
- Insensibilité aux contaminants habituels des boues à base d'eau (NaCl, CaSO₄, ciment, argile).
- Excellentes caractéristiques de filtration statique en température et pression, cake très mince.
- Forage à densité inférieure ou égale à 1,00.
- Meilleur calibrage du trou.
- Réduction des frottements de la garniture sur les parois du puits ou diminution du couple de torsion et de l'usure de la garniture.
- Réduction des risques de bourrage d'outil et d'accumulation des déblais sur les drill collars et diminution du pistonnage lors des manœuvres.
- Diminution du collage par pression différentielle.
- Meilleure récupération en carottage.
- Augmentation par rapport au forage en boue à l'eau, de la productivité.
- Moindres dommages à la formation.

2.8.2.3 Les principaux inconvénients des boues à l'huile :

- Sensibilité à l'eau et à certains bruts : Les boues à base d'huile peuvent être affectées par la présence d'eau ou par certains types de pétrole brut, ce qui peut altérer leurs propriétés.
- Risque de sédimentation des alourdisants : Les particules lourdes ajoutées aux boues peuvent se déposer et se concentrer au fond des réservoirs, ce qui nécessite un entretien supplémentaire pour maintenir leur efficacité.
- Manipulation salissante : Les boues à base d'huile peuvent être difficiles à manipuler et nettoyer, ce qui entraîne des conditions de travail moins hygiéniques et plus compliquées.

- Risque d'incendie : L'utilisation d'hydrocarbures comme phase continue présente un risque accru d'incendie, nécessitant des mesures de sécurité rigoureuses.
- Détérioration des caoutchoucs non résistants aux hydrocarbures : Les composants en caoutchouc des équipements peuvent se détériorer rapidement en présence d'hydrocarbures, ce qui peut entraîner des pannes et des coûts supplémentaires.
- Difficultés pour détecter la présence d'huile de formation dans les déblais : Il est souvent difficile de distinguer l'huile de formation des autres composants dans les déblais, ce qui peut compliquer l'analyse des formations traversées.
- Coût plus élevé : Les boues à base d'huile sont généralement plus coûteuses à produire et à utiliser que les boues à base d'eau, augmentant ainsi le coût global du forage.[19]

2.8.3 Les boues dont la phase continue est d'huile synthétique (SBM)

Les fluides de forage à base d'huile synthétique (SBM) sont conçus pour offrir des performances améliorées et un meilleur respect de l'environnement par rapport aux fluides à base d'huile minérale. Composés de bases synthétiques telles que les esters ou les acides gras modifiés, ces fluides sont principalement utilisés dans les environnements offshore ou sensibles, où la minimisation de l'impact écologique est cruciale.

Les boues à base d'huile synthétique présentent plusieurs avantages :

- Meilleure stabilité thermique : Elles résistent mieux aux températures élevées, ce qui est essentiel dans les conditions de forage haute pression et haute température (HPHT).
- Excellente lubrification : Leur capacité à réduire les frottements améliore l'efficacité du forage et prolonge la durée de vie des équipements.
- Faible toxicité : Elles sont non polluantes et ont un impact environnemental réduit, ce qui est particulièrement important dans les zones écologiquement sensibles.
- Réduction de la formation de filtrats : Elles limitent la perte de fluide et la contamination des formations.

Ces caractéristiques font des boues à base d'huile synthétique une option de choix pour des conditions de forage particulièrement exigeantes et des environnements où la préservation de l'écosystème est une priorité.

2.8.4 Les boues dont la phase continue est du gaz

Ce sont les fluides où, la phase continue est un gaz (généralement de l'air ou du gaz naturel) mélangé avec de l'eau à différentes proportions, formant ainsi une boue aérée ou moussante. L'application de ces fluides a été limitée aux forages à faible profondeur. Les fluides gazeux utilisés

2.8.4.1 Forage à l'air

L'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité et le prix de revient le moins élevé, il est recommandé dans le cas des pertes totales répétées de la boue lors de la circulation ainsi que dans le forage des couches productrices sous faible pression.

2.8.4.2 Forage à la mousse

Les mousses sont des dispersions d'un volume de gaz (relativement) important dans un volume de liquide relativement faible. Elles sont utilisées comme fluides de forage lorsque les terrains traversés sont fracturés, ou lorsque le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier. L'avantage du forage à la mousse se résume par sa faible pression hydrostatique au fond et par son excellent pouvoir de remontée des déblais à moins que la mousse ne refroidisse pas convenablement les terrains traversés ainsi que le train de sonde et ne contrôle pas la tenue des parois du puits (pas de cake).

2.8.4.3 Forage à la boue aérée

Le forage à la boue aérée est utilisé afin d'éviter les pertes de circulation et pour avoir un fluide de forage plus léger. Les avantages sont une bonne tenue des parois grâce à un cake contrôlé, une tendance aux pertes de circulation fortement réduite et une vitesse d'avancement plus grande, une assez bonne capacité de refroidissement des terrains traversés et du train de sonde, à moins que la stabilité de la boue aérée ne soit liée à une circulation effective des fluides [4] [20].

2.9 Composition des fluides de forage

Les compositions des boues de forage sont multiples. Elles dépendent essentiellement des propriétés exigées. En plus de l'eau et du gasoil utilisé comme phase continue ou émulsionnée, de nombreux composants multifonctions sont ajoutés à la boue pour lui conférer les propriétés désirées. Ces produits sont classés par familles :

1. Colloïdes argileux : qui comportent, les bentonites et les attapulgites.
2. Colloïdes organiques : telles que les Amidons et CMC (Carboxy Méthyl Cellulose)
3. Fluidifiants ou défloculants : telles que les polyphosphates et les tanins, les lignosulfonates et les lignines chromées.
4. Les additifs minéraux : comme Soude caustique NaOH, Carbonate de soude Na_2CO_3 , Le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, Chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Bicarbonate de sodium NaHCO_3 .
5. Produits organiques : spéciaux par exemple les anti-ferments, les anti-mousses, les anti-coincements, les anti-corrosions, les anti-bourrants.
6. Les alourdissants : comme Barytine ou sulfate de baryum BaSO_4 , $d=4.3$, Le carbonate de calcium CaCO_3 , $d=2.7$, La galène PbS , $d=7$, Hématite Fe_2O_3 , $d=5.2$.
7. Les colmatants : telles que colmatant organiques, colmatant minéraux, colmatant fibreux, colmatant lamellaires, colmatant gonflants, colmatant à prise (liants hydrauliques).

2.9.1 Composition des fluides de forage à base d'eau WBM (Water Based Mud)

Parmi les additifs utilisés pour la préparation de boue de forage on peut mentionner les suivants :

1. Viscosifiants : qui se présentent sous forme d'argiles naturelles (souvent des bentonites), polymères synthétiques ou bio polymères ;

2. Réducteurs de filtrats : servant à consolider le cake de filtration pour limiter l'invasion par le fluide comme l'amidon, carboxyméthylcelluloses ou CMC, celluloses poly anioniques (PAC), ou résines ;
3. Inhibiteurs de gonflement et de dispersion des argiles : telles que KCl, glycérol, silicates ou divers polymères comme (le polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA), claycide, etc.....) ;
4. Agents alourdissants : comme la barytine ("baryte" ou sulfate de baryum BaSO_4) et la calcite (carbonate de calcium CaCO_3) qui sont les plus utilisés pour assurer à la boue une densité convenable. Le carbonate de calcium (calcites) est souvent recommandé pour le forage de la phase réservoir à cause de sa solubilité dans l'acide et de son utilisation selon une granulométrie variable pour réduire les problèmes de pertes et l'endommagement de réservoir ;
5. Colmatants : sont des additifs plutôt exotiques comme des granuleux (coquilles de noix), des fibreux ;

Le tableau 2.1 présente les principaux additifs utilisés dans les fluides de forage, chacun ayant un rôle spécifique pour optimiser les performances selon les conditions de forage. Les additifs incluent des agents pour le contrôle de l'alcalinité, des bactéricides pour inhiber la croissance bactérienne, et des anti-calcium pour prévenir les dépôts. Ils comprennent également des anti-mousses et agents moussants pour gérer la mousse, des émulsifiants et réducteurs de filtrat pour stabiliser les émulsions et minimiser la perte de fluide. D'autres additifs comme les floculants, colmatants, lubrifiants, et inhibiteurs de gonflement des argiles optimisent la gestion des solides et la performance du forage. Enfin, les produits facilitant la séparation, stabilisants haute température, défloculants, viscosifiants, alourdissants, saumure et huiles minérales ou organiques sont adaptés aux exigences particulières des formations et conditions de forage [17].

TABLE 2.1 – Les principaux additifs ajoutés dans les fluides de forage

1	Contrôle d'alcalinité	11	Lubrifiants
2	Bactéricides	12	Decoinçants
3	Anti-Calcium	13	Inhibiteurs de gonflement des argiles
4	Inhibiteurs de corrosion	14	Produits facilitant la séparation
5	Anti-mousses	15	Stabilisant haute température
6	Agents moussants	16	Défloculants
7	Emulsifiants	17	Viscosifiants
8	Réducteurs de filtrat	18	Alourdissants
9	Floculants	19	Saumure
10	Colmatants	20	Huile minérale ou organique

2.9.2 Composition des fluides de forage à base d'huile OBM (Oil Based Mud)

Les propriétés rhéologiques (thixotropie) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents viscosifiants, généralement des argiles. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (composés asphalténiques et polymères) et d'autres additifs spéciaux. L'huile de base constitue la phase liquide continue dans laquelle les autres constituants sont émulsionnés ou mis en suspension. Selon les contraintes de sécurité et environnementales, on utilise des huiles de différentes compositions allant de l'huile diesel à l'huile minérale désaromatisée.

- Stabilisateurs d'émulsion : Ces produits sont utilisés pour stabiliser l'émulsion eau-huile : ils entrent dans la composition de la plupart des boues à l'huile. Ils diffèrent selon le type de boue mis en œuvre et le pourcentage d'eau.
- Réducteurs de filtrat : Principalement des asphaltes ou de la gilsonite, agissant comme support de cake.
- Fluidifiants : Le but de ces produits est de réduire la viscosité de la boue. Le premier et le plus simple est l'huile.
- Alourdissants : En pratique, on utilise comme pour les boues à base d'eau :

Carbonate de calcium pour les faibles alourdissements, Sulfate de baryum pour les densités élevées, Hématite pour les densités très élevées.

- Produits spécifiques : Citons la chaux, des viscosifiants pour faibles taux de cisaillement, etc

Chaque type de boue faisant appel à des additifs différents, il est difficile de définir clairement un mode général de fabrication, d'entretien, et de traitement[17].

2.10 Caractéristiques des fluides de forage

L'efficacité d'une boue de forage est déterminée par le contrôle des différentes caractéristiques suivantes :

La densité

La densité est définie comme étant le rapport de "le poids par unité de volume" sur la masse volumique d'un corps référence (l'eau, air). La pression exercée par une colonne de boue statique dépend à la fois de la densité et de la profondeur[21].

La densité est un paramètre important des boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour contrebalancer la pression exercée par les venues d'eau, d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions. Cependant, elle ne doit pas dépasser la limite de résistance des parois du puits (formations traversées) pour ne pas les fracturer et ne pas risquer une perte de boue au cours de la circulation[7].

La rhéologie

L'importance de la rhéologie pour la résolution des problèmes de forage est une littérature assez développée existe au sujet du comportement rhéologique des fluides de forage. Les fluides de forage sont souvent des suspensions colloïdales qui ont un comportement complexe et variable suivant leur composition et les conditions d'utilisation [17].

La rhéologie est une branche de la mécanique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps. En régime laminaire, il existe une relation entre la contrainte de cisaillement (τ) et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$, c'est l'équation rhéologique d'état : $\tau = f(\dot{\gamma})$. Cette relation permet de connaître toutes les propriétés rhéologiques du matériau, en particulier la viscosité qui est une mesure de la résistance du fluide à l'écoulement. Ces propriétés dépendent de la nature et des caractéristiques de ce matériau, ainsi que de la température et de la pression extérieures [22]. Ces propriétés conditionnent le bon rendement des pompes, la pression de refoulement, et elles sont à l'origine de l'ensemble des fonctions assurées par le fluide de forage [4].

La viscosité

La viscosité est l'un des principaux paramètres mesurés lors de l'étude de l'écoulement de fluides. Les mesures de viscosité sont en général liées à la qualité et aux performances d'un produit. Plusieurs industriels voient à présent les viscosimètres comme faisant partie intégrante de leurs programmes de recherche, développement et contrôle. Elle représente la méthode la plus rapide, précise et sûre pour analyser certains des facteurs les plus importants affectant la performance des produits (la concentration en solide, la taille et la forme des solides, la viscosité de la phase liquide).

- Viscosité plastique

La viscosité plastique augmente avec l'accroissement de la teneur en solide ou à teneur constante avec l'augmentation du nombre de particules solides (particules plus fine) et par conséquent de leur surface inversement, la viscosité plastique diminue lorsque la teneur en solides diminue ou, à teneur égale, par diminution du nombre de particules solides (particules plus grosses) et par conséquent de leur surface (par floculation).

$$VP = L_{600} - L_{300} (cp) \quad (2.1)$$

L_{600} et L_{300} sont les lectures respectives à 600 rpm et 300 rpm sur le rhéomètre.

- Yield value

La contrainte seuil, plus connue sous le nom de Yield value ou Yield point, est la mesure dynamique de résistance initiale à franchir pour que le fluide s'écoule.[21]

$$YP = L_{300} - VP \quad (\text{lb}/100 \text{ ft}^2) \quad (2.2)$$

Elle est causée par les forces attractives entre particules solides, dues aux charges électriques se manifestant à la surface, elle est en fonction de :

- Type de solides et des charges de surface qui leur sont propres ;
- La quantité de solide ;
- La concentration en ions dans la phase fluide ;
- Les Yields values élevées peuvent être causées par le broyage des solides par l'outil, les tiges, accroissant leur surface particules..

Gels et thixotropie

Une boue de forage laissée au repos édifie progressivement une structure qui augmente sa rigidité et qui peut être réduite par agitation. On appelle thixotropie le fait que ce phénomène soit non instantané et réversible. Le caractère thixotrope d'une boue est évalué en mesurant le "gel 0" et le "gel 10".

Le gel 0 représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Ils sont mesurés à l'aide du viscosimètre à une vitesse de 3 tr/min et exprimé en lb/100ft². Le gel 10 représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes [17].

Le gel initial et le gel 10 minutes sont une indication des forces attractives mises en jeu dans un fluide statique. Lorsque la différence entre le gel 0 et le gel 10 est élevée, les gels sont appelés progressif. Lorsqu'il n'y a pratiquement pas de différence, on dit que les gels sont plats. Les gels mesurent les forces attractives en statique, alors que la Yield value est une mesure de ces forces en dynamique, Yield value et gels relèvent donc des mêmes traitements [20].

Le gel 0 varie pratiquement comme la viscosité plastique et le gel 10 comme la contrainte seuil avec cependant, pour ce dernier, une sensibilité particulière au traitement chimique. La connaissance des propriétés rhéologiques est d'une grande importance pour la résolution des problèmes de forage et permet de recommander et de prévoir le comportement des fluides au cours du forage. Il faut souvent arriver à un compromis entre les caractéristiques des fluides. Une viscosité maximale améliore la mise en suspension des déblais et réduit l'infiltration et l'érosion, tandis qu'une faible viscosité facilite le pompage du fluide, améliore la lubrification et réduit les pertes de charges, accélérant ainsi l'avancement du forage. De plus, une valeur importante de contrainte seuil permet le bon nettoyage du trou et la mise en suspension des solides [17].

Filtration (API/HPHT)

Le filtrat est lié à la perméabilité de la formation et la pression différentielle. Le fluide de forage, qui est constitué d'une phase liquide et de produit argileux en suspension, est soumis à la pression hydrostatique tout en étant en contact avec des formations poreuses et perméables. Si le diamètre des pores est supérieur à celui des argiles en suspension, la formation absorbe entièrement le fluide, il n'y a donc aucun retour de la boue à la surface. Si le diamètre des pores est inférieur à une partie des éléments sur la paroi (constitution d'un cake) et envahissement par le liquide de base (filtrat) de la formation. C'est la perméabilité du cake qui conditionne la filtration [20].

Le filtrat se produit sous l'effet de la différence de pression entre le fluide de forage et les parois perméables des formations traversées. Pour la boue à base d'huile, le volume du filtrat et l'épaisseur du cake résultant sont mesurés simultanément avec un filtre HPHT (Haute Pression Et Haute Température), l'échantillon à étudier est soumis pendant un temps de 30 minutes à une pression différentielle de 3 447 380 Pa et une température de 121.11 °C. Les boues à faible filtrat (jusqu'à 5cm³ en 30mn) sont utilisées pour le forage des terrains instables, en particulier des argiles, qui sous l'action du filtrat perdent la cohérence et s'éboulent. Des terrains plus stables sont forés en utilisant des boues à coefficient de filtration plus grand (20 à 30 cm³ en 30 mn). L'influence de ce filtrat sur le forage consiste dans le fait que le filtrat de la boue contenant des agents chimiques, en pénétrant dans les pores, les élargit et en crée des nouveaux par adsorption des agents à la surface des fissures. La résistance de la roche se trouve ainsi réduite et sa forabilité s'améliore [4].

Concentration (solide, huile, eau)

Par distillation, on sépare les deux phases liquide et solide, par mesure on détermine le rapport d'eau et d'huile, et par calcul on détermine la teneur en solide.

$$T_{solide} = 100 - V_{liquide} \quad (2.3)$$

La quantité d'eau et d'huile est mesurée par une éprouvette graduée déposée au-dessous du retord [20]. Le rapport d'eau est donné par la loi :

$$RE = (V_{eau}/V_{liquide}) * 100 \quad (2.4)$$

Par analogie on trouve le rapport d'huile :

$$RH = (V_{huile}/V_{liquide}) * 100 \quad (2.5)$$

Stabilité électrique

La stabilité électrique (ES) d'un fluide de forage à base d'huile est liée à la stabilité de l'émulsion et à la capacité de mouillage de l'huile. L'émulsion peut être définie comme un système contenant deux phases fluides dont l'une est dispersée dans l'autre sous forme des fines gouttelettes. Dans les boues émulsionnées, c'est l'huile qui est dispersée dans l'eau. On appelle cela une émulsion directe (par opposition à l'émulsion inverse ou c'est l'eau qui est dispersée dans l'huile). Pour émulsionner une boue, on y ajoute de l'huile (gas-oil, fuel domestique, brut.) et parfois un agent émulsifiant [20].

Chapitre 3

Généralités sur les nanoparticules

3.1 Introduction

Les difficultés rencontrées lors des opérations de forage de puits de pétrole et de gaz, ainsi que la nécessité de solutions novatrices, stimulent le débat sur l'utilisation de la nanotechnologie. Bien que cette technologie ait été appliquée avec succès dans divers secteurs, son utilisation dans l'exploration et la production pétrolière et gazière reste encore limitée. Néanmoins, la nanotechnologie est perçue comme une solution potentielle pour surmonter les obstacles technologiques dans ce domaine, ce qui a conduit à une augmentation du financement par les gouvernements et l'industrie pétrolière mondiale. En particulier, les nanocomposites ont montré un potentiel prometteur pour améliorer les propriétés rhéologiques des fluides de forage. Contrairement aux additifs conventionnels, qui sont souvent coûteux, difficiles à synthétiser et ne possèdent pas toujours les propriétés rhéologiques souhaitées, les nanotechnologies offrent des perspectives d'amélioration significatives.

3.2 Définition de la nanotechnologie

La nanotechnologie est l'étude des phénomènes, de l'ingénierie et des matériaux à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire à des dimensions de 100 nm ou moins [23]. Elle permet de mesurer et de manipuler la matière à cette échelle, favorisant ainsi la création de matériaux avec des propriétés mécaniques, optiques et magnétiques améliorées. En utilisant des éléments moléculaires pour construire des machines et en contrôlant la structure des matériaux, la nanotechnologie ouvre la voie à des avancées significatives. Elle permet la fabrication de nanomatériaux dont l'unité de structure varie de 1 nm à 100 nm [24].

3.3 Définition des nanoparticules

Les nanoparticules, qu'elles soient artificielles ou naturelles, sont des particules dont la taille varie de 1 à 100 nm et trouvent de nombreuses applications en nanotechnologie. Grâce à leurs caractéristiques uniques, elles sont particulièrement utiles dans le secteur pétrolier, notamment pour la détection et l'imagerie, la récupération améliorée du pétrole (EOR), le contrôle de la mobilité du gaz, le forage, la complétion, et les applications dans des réservoirs étanches [25]. Les nanoparticules peuvent pénétrer dans les pores des formations qui sont fermés aux particules

plus grosses, et leurs propriétés, ajustées en fonction de la taille, les rendent adaptées à des applications spécifiques, augmentant ainsi leur efficacité. Le rapport surface/volume élevé des nanoparticules contribue également à cette efficacité accrue [23]. Bien que les nanomatériaux se situent entre les amas et les matériaux macroscopiques, ils ne présentent pas simplement les propriétés atomiques ou macroscopiques attendues, mais exhibent des effets uniques tels que l'effet de surface, l'effet de petite taille, l'effet quantique, et l'effet macroscopique [24].

3.4 Les formes des nanoparticules

Les nanoparticules peuvent présenter diverses formes, telles que sphériques (incluant les liposomes, micelles, nanoparticules polymériques, nanocapsules, ainsi que les nanoparticules inorganiques comme celles en or et en argent), tubulaires (comme celles en carbone ou en oxyde de titane), ou encore des structures plus complexes telles que les dendrimères et les hybrides métal-organiques [26]. Elles peuvent être classées en trois catégories principales : les nanoparticules organiques, principalement constituées de polymères ; les nanoparticules métalliques, telles que Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , et TiO_2 ; et les nanoparticules composites, comme les quantum dots CdSe-ZnS.

3.5 Les sources des nanoparticules

Les nanoparticules se classifient en trois types selon leur origine :

- Les nanoparticules d'origine naturelle, formées par des phénomènes de nucléation et de condensation des gaz et vapeurs dans l'atmosphère, tels que les feux de forêt ou les éruptions volcaniques.
- Les nanoparticules d'origine anthropogénique non intentionnelle, produites par des procédés chauds comme le soudage ou la combustion des moteurs.
- Les nanoparticules d'origine anthropogénique intentionnelle, fabriquées spécifiquement pour des applications particulières.

Parmi les nanoparticules d'oxyde métallique les plus courantes, on trouve les oxydes de titane (TiO_2), de fer (Fe_2O_3 et Fe_3O_4), de zinc (ZnO), d'aluminium (Al_2O_3), et la silice (SiO_2) [27]. La magnétite (Fe_3O_4), un oxyde de fer avec une structure spinelle inverse, est composée d'un réseau cubique à face centrée d'atomes d'oxygène délimitant des sites tétraédriques (Td) et octaédriques (Oh) où se trouvent les atomes de fer, selon la formule suivante : $[\text{Fe}_3^{+}] \text{Td} [\text{Fe}_3^{+}\text{Fe}_2^{+}] \text{Oh}_4$.

3.6 Généralités sur les oxydes de fer

Les oxydes de fer se présentent sous plusieurs formes, parmi lesquelles la magnétite (Fe_3O_4), la maghémite ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) et l'hématite ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) sont les plus courantes. Les nanoparticules magnétiques (NPM) sont constituées de trois couches distinctes : un noyau central en fer magnétique, souvent à base de magnétite (Fe_3O_4) ou parfois de maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), une couche interne de colorant fluorescent lipophile, et une couche externe de polysaccharide ou de chitosane. Cette couche externe peut également servir de matrice pour le transport d'agents thérapeutiques si nécessaire. Outre les matrices de polysaccharides ou de chitosane, d'autres types de matrices sont également disponibles. Les NPM se divisent généralement en trois catégories : métaux purs, oxydes métalliques et nanocomposites magnétiques.

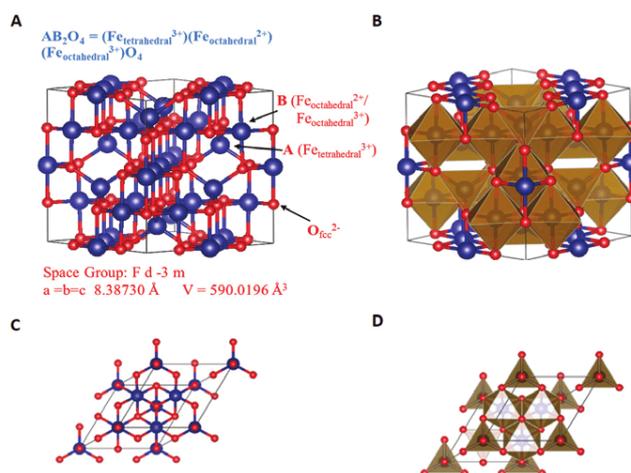


FIGURE 3.1 – Structure cristalline des nanoparticules de Fe_3O_4 [8]

Les propriétés physico-chimiques des oxydes de fer tels que l’hématite, la magnétite et la maghémite à l’état massif sont regroupées dans le tableau 3.1 [27].

TABLE 3.1 – Propriétés physico-chimiques des oxydes de fer[1]

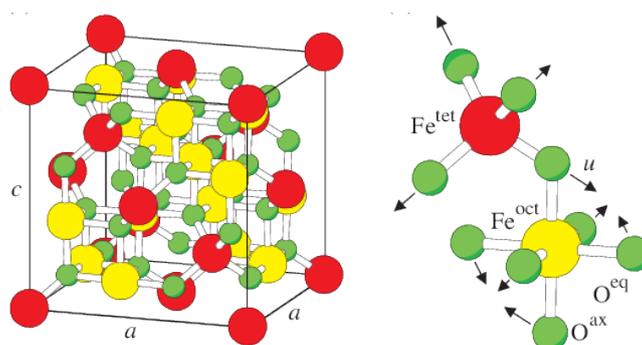
Oxyde de fer	Couleur	Masse molaire(g · mol ⁻¹)	Température de fusion (°C)	Masse volumique(kg.m ³)
Hématite	Rouge à noir	160	1350	5260
Magnétite	noir	232	1583-1597	5180
Maghémite	marron	160	-	4870

De par leur nombre fini d’atomes, les nanoparticules métalliques ont des propriétés différentes de celles du matériau à l’état massif : température de fusion, propriétés optiques, propriétés magnétiques. Ainsi, la couleur d’une nanoparticule métallique peut être différente de celle du même métal massif. Les propriétés magnétiques, électriques et optiques des nanoparticules sont aussi influencées par leur taille, leur morphologie, leur degré de cristallinité et leur composition chimique. Cependant un contrôle judicieux de ces paramètres est très difficile. Par conséquent, les propriétés des nanoparticules d’un même matériau peuvent être différentes selon les méthodes de synthèse [26].

3.7 Nanoparticules d’oxyde de fer

Ces nanoparticules sont composées d’oxyde de fer Fe_3O_4 , aussi connu sous le nom de tétraoxyde de trifer. Lorsqu’elles ne sont pas en solution, elles forment une poudre noire. Le Fe_3O_4 existe naturellement comme minéral noir à l’échelle macroscopique, la magnétite. Sa structure cristalline est complexe, elle met en jeu les couples cation ferreux Fe_2^+ /anion O_2^- et cation ferrite Fe_3^+ /anion O_2^- qui forment des sous-réseaux FeO et Fe_2O_3 (figure 3.2).

L’échange d’électrons entre Fe_2^+ et Fe_3^+ s’effectue facilement dans cette structure, ce qui est à l’origine des propriétés magnétiques du matériau .[26]

FIGURE 3.2 – Structure de maille de Fe_3O_4 [8]

3.8 Caractérisation des nanoparticules

Les exigences en matière d'analyse des nanoparticules sont quelque peu différentes de celles des produits chimiques conventionnels. Bien que le produit chimique NP. Les compositions et les concentrations sont utilisées comme caractéristiques standard, les NP possèdent également des caractéristiques physiques clés qui doivent être prises en compte être quantifiés (voir tableau 3.2).

Ces caractéristiques incluent la forme des particules, les conditions de surface cristallographie et comment ils sont dispersés dans les matériaux hôtes. De telles caractéristiques ont une grande influence sur les propriétés qu'elles affichent, des modifications mineures de ces caractéristiques peuvent avoir des impacts positifs ou négatifs sur leurs attributs souhaitables exploités dans diverses applications industrielles. Ces caractéristiques clés peuvent, en dans certains cas, conduire à des effets négatifs du NP sur la santé, causés par l'exposition à certaines formulations ou concentrations. Cependant, La charge de surface des NP fait généralement référence à la charge provenant de la désorption ou de l'adsorption des protons sur les sites hydroxylés de leurs surfaces [9].

TABLE 3.2 – Caractéristiques physiques et chimiques des nanoparticules

Caractéristiques physiques	Caractéristiques chimiques
La forme, la taille et le rapport hauteur/largeur des NP	Améliorer le taux de réaction et stabilisation de la solution
Diminuer le point de fusion	Modifier la chimie de la surface
Améliorer la résistance mécanique	Améliorer la biocompatibilité
Induire un comportement super-paramagnétique	Lipophilie/ hydrophilie
Améliorer les propriétés optiques	Caractéristiques photocatalytiques
Améliorer la conductivité électrique	améliorer la conductivité thermique
Améliorer le taux d'agrégation/agglomération	Augmenter la solubilité sous conditions appropriées

3.9 Concentration des nanoparticules

Les techniques couramment exploitées pour l'analyse des nanoparticules (NPs) comprennent la spectroscopie infrarouge transformée (FTIR), le microscope électronique à balayage (MEB), le microscope électronique à transmission (TEM), la spectroscopie UV-visible et la diffraction des rayons X (DRX). Ces techniques permettent d'obtenir des images détaillées des NPs, d'évaluer leur forme, leur taille, et leur état de surface. Les microscopes électroniques et les microscopes à sonde à balayage sont essentiels pour l'étude des NPs en raison de leur petite taille. Cependant, ces méthodes microscopiques peuvent être destructrices et nécessitent des préparations d'échantillons complexes. Les mesures spectroscopiques évaluent les interactions entre les NPs et le rayonnement électromagnétique, utilisant la longueur d'onde comme critère discriminant. Elles permettent une meilleure caractérisation des NPs en termes de forme, taille et concentration.

En outre, la microscopie à force atomique (AFM) offre des avantages uniques pour l'étude des NPs, notamment la capacité de fournir des images 3D avec une résolution atomique. Bien que l'AFM présente des avantages par rapport au microscope électronique à balayage (SEM), comme une meilleure résolution de surface, le SEM offre une plus grande profondeur de champ et un champ de balayage plus étendu [9].

3.10 Méthodes de fabrication de nanoparticules

Les NP sont présentes dans des matériaux naturels et peuvent être fabriquées artificiellement. Il existe deux principales classes génériques de fabrication de NP méthodes : descendante et ascendante.

Les méthodes de fabrication des NP sont illustrées sur la figure 3.3.

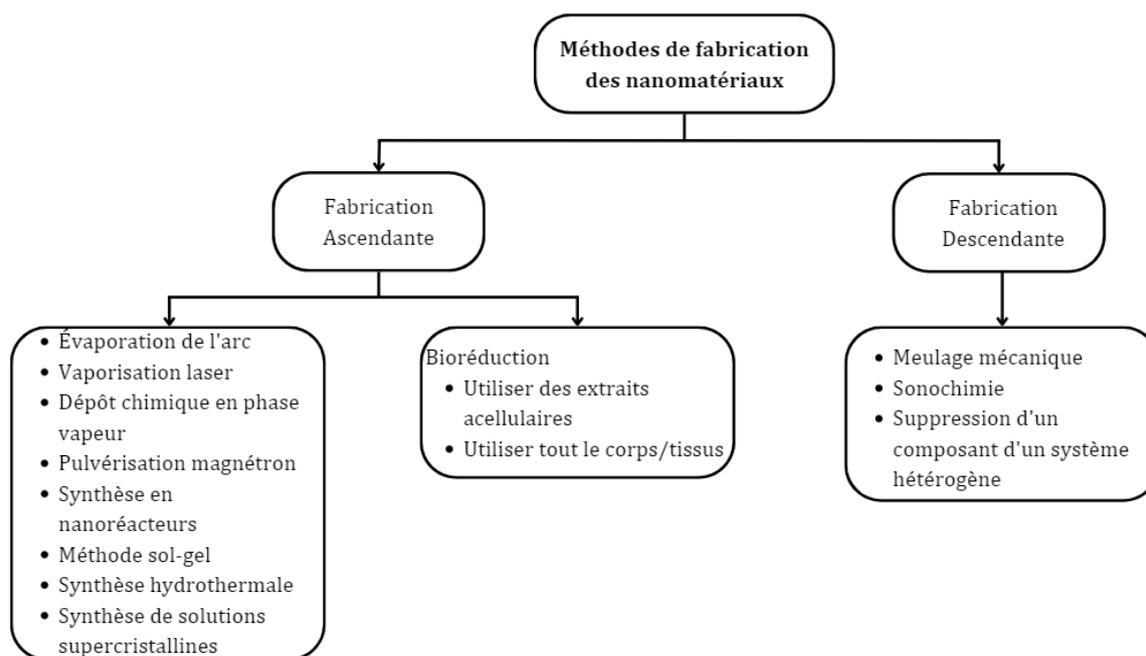


FIGURE 3.3 – Classification des nanoparticules par méthodes de fabrication [9]

Dans les approches «top-down» (figure 3.3), les nanoparticules sont produites en réduisant la taille des matériaux en vrac. Pour leur production, les processus physiques, physico-chimiques, électriques ou thermiques sont utilisés. Ces méthodes comprennent le broyage mécanique, la sonochimie, et l'élimination des composants qui sont des constituants hétérogènes matériaux de base.

Dans les approches « bottom-up » (figure 3.3), les NP sont fabriquées au niveau atomique ou moléculaire, puis raffinées, généralement en appliquant des méthodes chimiques. On parle alors de méthode de «construction». Les précipitations et la récupération sont des exemples de techniques de construction [9] ; [28] ; [29].

D'autre part, les NP métalliques peuvent être classées par type de métal (voir figure 3.4). Le NM organique est constitué de fullerènes, qui sont composés de nanotubes à base de carbone. Ceux-ci incluent le graphite, le graphène nanoplaquettes (GNP), nanotubes de carbone multi parois (MWCNT), les nanofibres de carbone (CNF) et les nanotubes de carbone (CNT). En revanche, les nanoparticules de métal et d'oxyde métallique, les points quantiques, tels que CdSe, ZnS et ZnO, sont des métalloïdes NM, qui sont généralement collectivement appelés NM inorganiques [30] ; [31] ; [32].

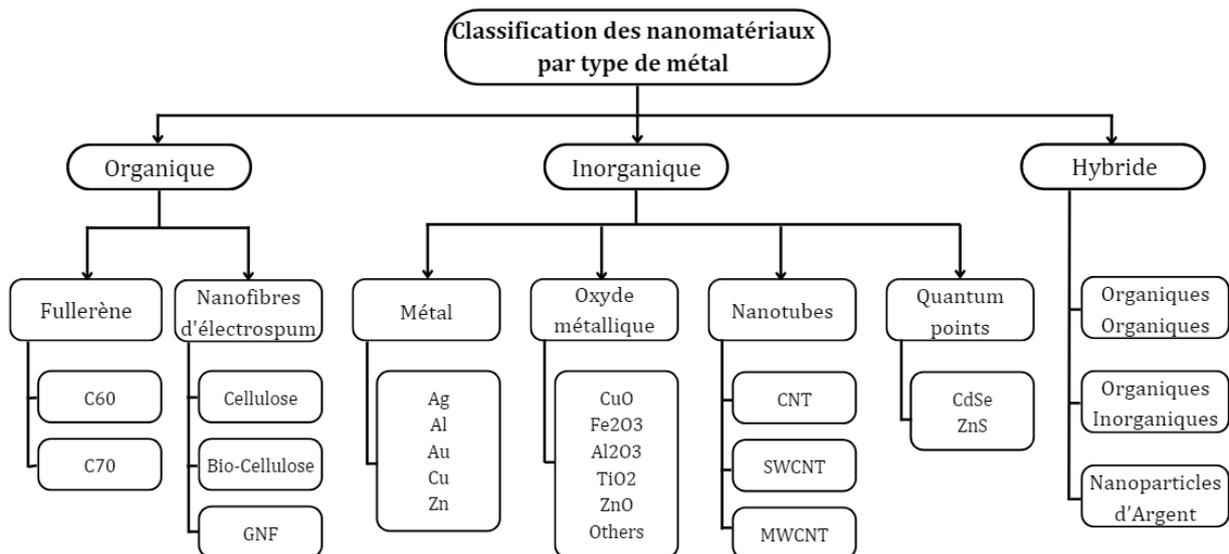


FIGURE 3.4 – Classification des nanoparticules selon leur composition [9]

3.11 Avantages de nanoparticules

Les améliorations potentielles des performances des fluides de forage pouvant être obtenues en incorporant des nanomatériaux, celles-ci incluent :

- a) Les propriétés rhéologiques (en particulier la viscosité plastique, la force du gel, la limite d'élasticité et les viscosités apparentes)
- b) Les caractéristiques de filtration
- c) Le pouvoir lubrifiant
- d) Nettoyage des forages
- e) Stabilisation de l'argile de formation
- f) Stabilité thermique des fluides de forage
- g) Inhiber les pertes de circulation
- h) Inhiber l'érosion des forages

- i) Minimiser le couple et la traînée du train de tiges
- j) Atténuer le phénomène de bouletage de bits
- k) Réduire le risque de tiges de forage coincées
- l) Amélioration de l'efficacité de nettoyage du fluide d'espacement pour éliminer la contamination du fluide de forage à base d'huile. Leurs forces abrasives sont négligeables et leur impact énergétique cinétique est moindre
- m) Traitement et purification des polluants.
- n) Amélioration de l'efficacité énergétique
- o) Réduction des émissions polluantes et les déchets [9].

3.12 Application des nanoparticules dans l'industrie pétrolière et gazière

La nanotechnologie est considérée comme un moyen viable de surmonter les obstacles technologiques dans le secteur, et les gouvernements et l'industrie pétrolière mondiale ont augmenté leur financement pour la recherche en nanotechnologie pour des mesures précises des réservoirs, des nanofluides pour augmenter production de pétrole, des nanocatalyseurs pour le raffinage du pétrole et des nanomembranes pour une production efficace de pétrole, d'eau, et séparation des gaz.

Dans les opérations de récupération secondaire et tertiaire du pétrole, les nanotechnologies ont le potentiel d'améliorer considérablement la récupération du pétrole et de résoudre les problèmes causés par dommages à la formation lors de l'inondation des réservoirs d'eau et de gaz. Les nanotechnologies peuvent améliorer la séparation des phases fluides, qualités des milieux poreux souterrains, revêtements pour les composants du réservoir et amélioration de la fonctionnalité des capteurs et des commandes du système de fabrication.

Essentiellement, les nanoparticules ont des caractéristiques uniques, principalement leur taille et leur distance rapport surface/surface plus élevé que leurs homologues plus grands. Cette propriété augmente leur réactivité et interaction avec les surfaces environnantes, améliorant la qualité du fluide transporté qualités avec une plus petite quantité de matière. De plus, en raison de leur petite taille, ils peuvent facilement passer à travers les minuscules pores des formations, permettant une circulation du fluide à l'intérieur de ces zones. Par conséquent, ces caractéristiques remarquables justifient l'utilisation des nanoparticules dans l'industrie pétrolière et gazière [23] ; [33] ;[34][35].

3.13 Application des nanoparticules dans divers secteurs

La nano-métrie (la mesure des propriétés physiques et chimiques des NP) apporte des informations essentielles permettant de manipuler la matière au niveau atomique, avec des objectifs spécifiques pour créer matériaux/fluides, dispositifs/outils et/ou systèmes avec des fonctionnalités améliorées (propriétés/fonctions). Outre le secteur de l'énergie, de nombreux autres domaines bénéficient désormais des applications des nanotechnologies, comme la santé, les télécommunications, l'agriculture et les produits de consommation. Les nanoparticules, par définition, ont une taille inférieure à 100 nm. Leurs propriétés diffèrent souvent de celles de la forme macroscopique du même matériau, ce qui les rend utiles pour des applications spécifiques [9].

Chapitre 4

Synthèse de Production des Nanoparticules de Fer

4.1 Introduction

L'objectif de cette section est de mettre au point des protocoles pour produire des nanoparticules d'oxyde de fer, afin d'obtenir des particules aux caractéristiques optimales pour leur intégration dans des fluides de forage intelligents. Nous nous concentrerons sur une méthode de production basée sur la synthèse en laboratoire. Ces nanoparticules ont pour but d'améliorer les propriétés rhéologiques et de filtration des fluides de forage, les rendant ainsi plus efficaces pour l'industrie pétrolière et gazière. Nous aborderons également l'application de ces nanoparticules dans d'autres secteurs tels que l'environnement, la médecine et l'électronique, en raison de leurs propriétés multifonctionnelles. Le choix des nanoparticules d'oxyde de fer est motivé par leurs propriétés uniques, telles que : la surface spécifique élevée, la réactivité chimique et les caractéristiques magnétiques [36].

Ces propriétés les rendent particulièrement utiles pour stabiliser les fluides de forage et minimiser les pertes de filtrat.

Peu de recherches ont été réalisées sur la production de nanoparticules de fer en Algérie, et leurs propriétés physico-chimiques demeurent peu explorées. Cette section expérimentale se consacrera donc à la description des différentes étapes de production des nanoparticules de fer, ainsi qu'aux analyses physico-chimiques menées pour évaluer la qualité et l'efficacité des produits obtenus.

4.2 Synthèse des nanoparticules d'oxyde de Fer au laboratoire

4.2.1 Etapes des essais préliminaires

Pour atteindre notre objectif de produire des nanoparticules d'oxyde de fer de haute qualité, nous avons suivi une méthodologie rigoureuse basée sur une recherche approfondie et des essais préliminaires au laboratoire. Les étapes suivantes résument notre démarche :

1. **Recherche approfondie** : Nous avons commencé par effectuer une recherche approfondie dans les brevets, articles scientifiques et études existantes afin d'identifier les meilleures pratiques et paramètres recommandés pour la synthèse des nanoparticules d'oxyde de fer. Cette démarche a permis de constituer une base solide de connaissances et de références pour nos expérimentations.
2. **Essais préliminaires** : Nous avons réalisé des essais préliminaires en laboratoire pour évaluer divers paramètres de synthèse. Chaque paramètre a été ajusté méthodiquement en respectant les intervalles recommandés, tels que la concentration des réactifs, le pH de la solution et les conditions d'agitation. Ces essais ont été essentiels pour comprendre l'impact de chaque paramètre sur la formation et les propriétés des nanoparticules.
3. **Optimisation du procédé** : Tout au long de nos expérimentations, nous avons cherché à optimiser le procédé de synthèse pour maximiser le rendement et la qualité des nanoparticules. Les ajustements continus basés sur nos résultats expérimentaux ont permis d'atteindre des nanoparticules d'oxyde de fer de haute pureté et de taille uniforme.
4. **Applications potentielles** : Enfin, nous avons exploré les diverses applications potentielles des nanoparticules d'oxyde de fer dans les industries dans notre cas c'est l'industrie pétrolière et gazière.

4.2.2 Matériaux et Réactifs Utilisés

Pour mener à bien la synthèse des nanoparticules de fer par co-précipitation, une sélection de matériaux et de réactifs a été essentielle. Chaque composant a été choisi en fonction de sa capacité à garantir la précision des mesures et la sécurité dans la manipulation des substances chimiques.

4.2.2.1 Instruments de mesure

Le tableau 4.1 illustre les principaux instruments de mesure utilisés en laboratoire, chacun ayant une fonction spécifique, comme la mesure des volumes liquides, la préparation et le dosage des solutions, la filtration, ou la séparation des particules. Ces outils sont essentiels pour assurer des mesures précises et fiables dans les expériences scientifiques.

La figure 4.1 illustre un ensemble de verrerie de laboratoire disposé sur une table, prêt à être utilisé pour diverses expériences scientifiques. Cette verrerie comprend des instruments essentiels tels que des béchers, des fioles jaugées, des burettes et des éprouvettes, chacun ayant un rôle spécifique dans la préparation, le mélange, et la manipulation des solutions chimiques.



FIGURE 4.1 – L'ensemble de verrerie de laboratoire utilisé dans nos expériences.

TABLE 4.1 – Les principaux instruments de mesure

Instrument	Description
Eprouvette	Utilisée pour mesurer des volumes liquides
Bécher	Conteneur pour mélanger des solutions
Fiole jaugée	Utilisée pour préparer des solutions précises
Burette	Utilisée pour le dosage précis des liquides
Papier filtre	Pour la filtration des solutions
Entonnoir	Utilisé avec la papier filtre
Balance	Pour peser avec précision les réactifs
Agitateur magnétique	Agitation des solutions pendant les réactions
pH-mètre	Mesure de pH des solutions
Centrifugeuse	Utilisée pour la séparation des particules

4.2.2.2 Réactifs utilisés

Les réactifs ont été sélectionnés en raison de leur pureté et de leur aptitude à réagir de manière contrôlée au cours du processus de co-précipitation (voir figure 4.2 et 4.3) :

1. Eau distillée : Solvant utilisé pour préparer toutes les solutions.
2. Solution d'ammoniaque : Utilisée pour ajuster le pH des solutions réactionnelles.
3. Chlorure de fer hexahydraté ($\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) : Précurseur pour la formation des nanoparticules.
4. Sulfate ferreux ammoniacal ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) : Autre précurseur essentiel à la réaction de co-précipitation.



FIGURE 4.2 – Les réactifs utilisés lors des expériences de co-précipitation : Chlorure de fer hexahydraté ($\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) et Sulfate ferreux ammoniacal ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$)

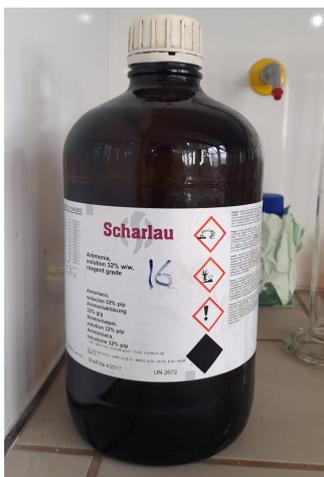


FIGURE 4.3 – Solution d’ammoniaque NH_3 utilisée pour le processus de synthèse

Chaque choix de matériel et de réactif a été déterminé par leur capacité à satisfaire les exigences spécifiques de l’expérience, afin de mener à bien la méthode de co-précipitation utilisée pour la synthèse des nanoparticules d’oxyde de fer. Cela assure la précision des mesures, la sécurité dans la manipulation des réactifs, et la qualité des résultats obtenus tout au long du processus expérimental, garantissant ainsi des résultats reproductibles et fiables pour l’étude des nanoparticules d’oxyde de fer.

4.2.3 Procédure de Synthèse

Le processus de synthèse des nanoparticules d’oxyde de fer que nous avons développé résulte d’une exploration approfondie et d’essais préliminaires rigoureux. En suivant un protocole spécifique, voici les étapes détaillées que nous avons mises en œuvre :

4.2.3.1 Préparation des réactifs :

Pour assurer la réussite du processus de co-précipitation des nanoparticules d’oxyde de fer, deux étapes préparatoires ont été réalisées :

1. Préparation d’une solution d’ammoniaque en ajustant la concentration pour obtenir une solution d’une mole (1M), essentielle pour la co-précipitation des nanoparticules.
2. Pesée des réactifs utilisés, comprenant du chlorure de fer hexahydraté ($\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) et du chlorure ferreux tétrahydraté ($\text{FeCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) (voir figures 4.4a, 4.4b), soigneusement dosés selon le protocole adopté, et leur dissolution séparée dans des fioles jaugées avec de l’eau distillée, formant ainsi des solutions de précurseurs (figure 4.5) .



(a) Pesée du chlorure de fer hexahydraté $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$



(b) Pesée du chlorure ferreux tétrahydraté ($\text{FeCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$)

FIGURE 4.4 – Pesée des réactifs chimiques



FIGURE 4.5 – Solutions de réactifs préparées pour la synthèse

Après dissolution complète, les réactifs sont mélangés dans un bécher, sous agitation à 500 tours/min, à température ambiante, pour obtenir une solution unique de chlorures de fer (figure 4.6).

4.2.3.2 Co-précipitation et Formation des nanoparticules

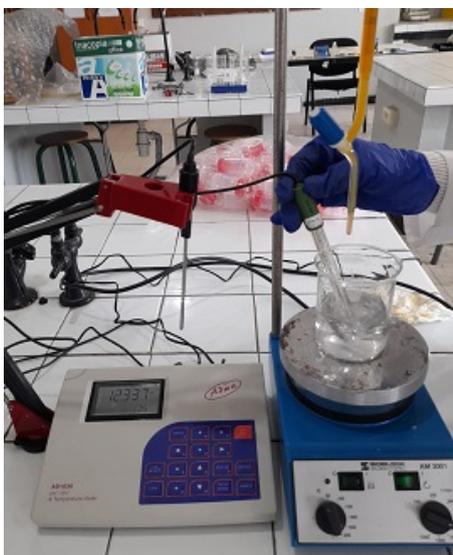
L'ajout de la solution de chlorures de fer à la solution d'ammoniaque a été réalisé lentement, goutte à goutte, par titrage, sous agitation à 500 tours/min à température ambiante. Cette opération a conduit à la formation d'une suspension noire opaque contenant les nanoparticules de fer, tout en maintenant le pH dans une plage de 10 à 11 comme le montre les figures (4.7, 4.8a, 4.8b et 4.9).



FIGURE 4.6 – Mélange des réactifs pour obtenir une solution de chlorures de fer



FIGURE 4.7 – Titrage de la solution de l'ammoniaque avec la solution de fer.



(a) Contrôle de pH avant titrage



(b) Contrôle de pH après le titrage

FIGURE 4.8 – Contrôle de pH pendant l'opération du titrage.



FIGURE 4.9 – La solution finale qui contient les nanoparticules d'oxyde de fer

4.2.3.3 Séparation par centrifugation

Les figures 4.10 et 4.11 illustrent les étapes finales de la préparation des nanoparticules d'oxyde de fer. La figure 4.9 montre la solution finale obtenue après le processus de co-précipitation, où les nanoparticules d'oxyde de fer sont en suspension dans un liquide. Cette solution noire opaque est ensuite transférée dans des tubes à essai, comme le montre la figure 4.10. Ce transfert permet de préparer les échantillons pour les étapes ultérieures d'analyse ou de stockage.



FIGURE 4.10 – Transfert de la solution dans des tubes à essais pour l'analyse ou le stockage.

4.2.3.4 Lavage et purification

Les figures 4.12a et 4.12b présentent deux étapes clés du processus de purification des nanoparticules. La première figure (4.12a) illustre le lavage des nanoparticules avec de l'eau distillée, une étape importante pour éliminer les impuretés et les résidus de réactifs après la synthèse. Cette opération est réalisée en rinçant soigneusement les nanoparticules avec un solvant approprié. La seconde figure (4.12b) montre la filtration des nanoparticules lavées, où ces dernières sont séparées du solvant à travers un filtre. Cette étape permet de collecter les nanoparticules purifiées, prêtes pour des analyses ultérieures ou pour leur utilisation dans des applications spécifiques.



FIGURE 4.11 – Appareil utilisé pour effectuer le processus de centrifugation.



(a) Le processus de lavage des nanoparticules préparées.



(b) Filtration des nanoparticules après le processus de lavage.

FIGURE 4.12 – Les opérations du lavage et de filtration des nanoparticules préparées.

4.2.3.5 Le séchage :

Les trois figures 4.13a, 4.13b et 4.13c illustrent les différentes étapes du processus de transformation des nanoparticules de fer jusqu'à leur forme finale d'oxyde de fer. La première figure 4.13a montre les nanoparticules d'oxyde de fer avant le séchage, où elles apparaissent sous une forme humide, reflétant leur état initial après la synthèse. La deuxième figure 4.13b présente les nanoparticules d'oxyde de fer après le séchage, une étape importante pour retirer toute l'humidité et obtenir des particules plus stables. Enfin, la troisième figure 4.13c montre les nanoparticules d'oxyde de fer dans leur état final, prêtes pour une utilisation ou une analyse ultérieure. Ces images permettent de visualiser clairement l'évolution physique des nanoparticules tout au long du processus, soulignant l'importance des étapes de séchage pour obtenir un produit final de qualité.

Après purification, les nanoparticules sont séchées à une température de 105°C pour évaporer l'excès d'eau et obtenir un produit sec et stable.

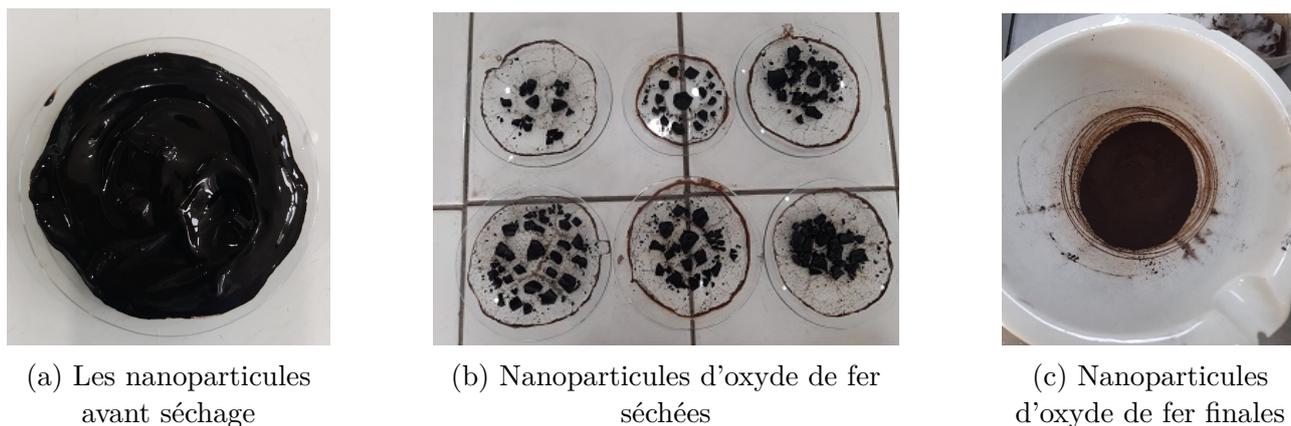


FIGURE 4.13 – Évolution des nanoparticules d'oxyde de fer : avant séchage, après séchage et état final

4.2.4 Contrôle des paramètres de synthèse

Pour assurer la reproductibilité et la qualité des nanoparticules d'oxyde de fer obtenues par co-précipitation, plusieurs variables ont été rigoureusement surveillées et ajustées tout au long du processus expérimental afin d'optimiser les propriétés des nanoparticules.

4.2.4.1 Les paramètres contrôlés

1. Le pH de la solution réactionnelle :

Le pH de la solution a été maintenu dans une plage spécifique (généralement entre 10 et 11) en utilisant une solution d'ammoniaque pour assurer des conditions favorables à la co-précipitation des ions ferriques et ferreux.

TABLE 4.2 – Tableau de contrôle du pH pour un essai.

(T= 20°C)			
V=100+15ml	Essai 1	Essai 2	Essai 3
pH initial	12.33	12.42	12.447
pH final	10.567	10.667	10.756

2. Température :

La température de la solution pendant la co-précipitation a été maintenue constante à température ambiante (21°C) pour éviter les variations thermiques qui pourraient influencer la taille et la morphologie des nanoparticules formées.

3. La vitesse d'agitation :

L'agitation de la solution réactionnelle à une vitesse constante de 500 tours/min a été essentielle pour garantir une dispersion uniforme des réactifs et permettre la formation homogène des nanoparticules.

4. Ratio des Précurseurs :

Le rapport molaire entre le chlorure de fer hexahydraté ($\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) et le sulfate ferreux ammoniacal ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) a été maintenu à 1 :3 pour garantir une co-précipitation efficace et maximiser le rendement des nanoparticules.

5. La durée de co-précipitation :

Le temps alloué au mélange des réactifs et à la co-précipitation a été soigneusement contrôlé pour maximiser la conversion des précurseurs en nanoparticules tout en évitant la surcroissance des particules.

4.3 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de développer et d'optimiser un protocole rigoureux pour la production de nanoparticules de fer, basé sur des essais en laboratoire et des analyses approfondies. La maîtrise des paramètres de synthèse tels que le pH, la température et le ratio des précurseurs a conduit à l'obtention de nanoparticules de haute qualité, adaptées aux applications dans les fluides de forage intelligents. Ce travail ouvre également la voie à une exploration prometteuse des utilisations de ces nanoparticules dans d'autres secteurs industriels.

Chapitre 5

Formulation et Caractérisation des Fluides de Forage

5.1 Introduction

Les fluides de forage, aussi connus sous le nom de boues de forage, jouent un rôle très important dans l'industrie pétrolière et gazière. Ils sont utilisés pour faciliter le processus de forage des puits en terre ou en mer. Dans le contexte de l'exploration et de l'extraction des hydrocarbures, les fluides de forage doivent être soigneusement formulés et contrôlés pour répondre aux conditions spécifiques de chaque projet de forage. Les propriétés physiques et chimiques des fluides de forage, telles que la viscosité, la densité, et la capacité de transport des solides et filtration doivent être ajustées pour optimiser l'efficacité du forage et minimiser les risques environnementaux. L'importance des fluides de forage ne se limite pas seulement à l'amélioration de la performance du forage. Ils jouent également un rôle essentiel dans la protection de l'environnement. Les formulations modernes de fluides de forage cherchent à réduire l'impact écologique en utilisant des composants moins toxiques et en mettant en œuvre des pratiques de gestion des déchets plus efficaces. Leur conception et leur gestion requièrent une expertise technique approfondie pour répondre aux défis complexes de cette industrie dynamique.

5.2 Formulation des fluides de forage

5.2.1 Composition des Boues à Base d'Eau

Les boues de forage à base d'eau (WBM : Water-Based Mud) sont largement utilisées en raison de leur faible impact environnemental et de leur coût relativement faible. Leur composition peut varier en fonction des conditions spécifiques de chaque forage, mais elles incluent généralement plusieurs composants essentiels. La phase de base de ces boues est constituée d'eau douce, qui forme le fluide aqueux principal. À cette base, on ajoute des agents viscosifiants, des polymères synthétiques, des agents de contrôle de la filtration, des inhibiteurs de corrosion, et des alourdisants, entre autres. La formulation des boues à base d'eau est soigneusement élaborée pour répondre aux exigences techniques et environnementales du forage, garantissant ainsi une opération efficace et sécurisée.

TABLE 5.1 – Principaux constituants de fluide de forage à base d'eau

Nom	Fonction	Description
WATER	Fluide de base	Constitue la phase liquide principale de la boue de forage, fournissant un milieu pour les autres composants.
SODA ASH	Régulateur de pH	Augmente le pH de la boue de forage. Précipite le calcium.
CAUSTIC SODA	Régulateur d'alcalinité et de pH	Maintenir un pH élevé dans la boue de forage. Neutraliser les gaz acides comme le sulfure d'hydrogène.
KCL	Stabilisateur de schiste	Stabilise les argiles en empêchant l'entrée d'eau dans les argiles. Forme saumure claire.
ES STRATCH HT	Agent de suspension	Maintenir les particules solides en suspension dans la boue de forage, Améliore la stabilité.
PAC L	Réducteur de filtrat	Contrôle la perte de liquide vers la formation géologique Réduire les pertes de boue de forage.
GLO BIO VIS 3000	Viscosifiant	Améliore les propriétés rhéologiques de la boue de forage, augmentant sa viscosité.
GLO POLY-AMINE 2000	Inhibiteur de schiste	Stabilise les formations argileuses Contrôle le gonflement des argiles et des schistes.
BARYTE	Alourdissant	Augmente et ajuste la densité globale de la boue de forage.

5.2.2 Composition des fluides de forage à base d'huile

Les boues de forage à base d'huile (OBM : Oil-Based Mud) sont employées dans des conditions de forage plus exigeantes, car elles offrent une meilleure stabilité thermique et une compatibilité chimique accrue avec certaines formations géologiques.

TABLE 5.2 – Principaux constituants de fluide de forage à base d’huile

Nom	Fonction	Description
Diesel	Phase huileuse	Fournir la phase continue dans OBM
Water	Phase aqueuse	Assurer la phase interne en OBM
ES-PEMUL	Emulsifiant primaire	Le mélange de tallöl oxydé et d’acide gras polyaminé est l’ingrédient de base des fluides de forage en émulsion eau dans huile.
ES-EMUL	Emulsifiant secondaire	L’acide gras polyaminé peut être utilisé pour émulsionner l’eau en huile dans les fluides de forage à base de pétrole.
BARABLOC	Réducteur de filtrat	Réduire la perte de fluide en formant un gâteau de filtration fin et à faible perméabilité sur les parois du puits de forage, empêchant ainsi l’invasion du fluide de forage dans la formation et maintenant la stabilité du puits de forage.
GELTONE V	Viscosifiant	L’argile organophile confère des propriétés de viscosité et de suspension aux fluides de forage à base de pétrole.
Lime	Agent d’alcalinité	Améliorateur de pH par dissociation des ions OH-, source d’ions Ca pour activer l’émulsifiant OBM.
Salt NaCl	Stabilisateur de schiste	Modificateur d’activité de l’eau dans OBM
BARITE	Alourdissant	Augmenter la densité, fournir une pression hydrostatique pour éviter les éruptions et soutenir la stabilité du puits de forage.

5.2.3 Intégration des Nanoparticules d’oxyde de Fer dans les fluides

Des nanoparticules d’oxyde de fer ont été synthétisées, puis incorporées dans diverses formulations de boues de forage, tant à base d’huile qu’à base d’eau. Cette démarche vise à évaluer en profondeur leur potentiel pour caractériser les propriétés et les performances clés des fluides de forage, tant dans des conditions standards que dans celles des réservoirs de pétrole et de gaz. Ces nanoparticules contribuent à améliorer les propriétés rhéologiques, les capacités de filtration, ainsi que la stabilité électrique des boues de forage. Le choix des nanoparticules d’oxyde de fer comme additif pour les fluides de forage est justifié par leur potentiel prometteur, grâce à leurs propriétés supérieures, notamment leur rapport surface/volume extrêmement élevé. Leur comportement distinct en matière d’adsorption et de transport dans différents milieux poreux les rend particulièrement efficaces. Ces nanoparticules ont le potentiel de résoudre ou d’améliorer divers problèmes rencontrés lors du forage des puits.

5.2.4 Protocoles de préparation

Les protocoles de préparation des fluides de forage, tant à base d'eau qu'à base d'huile, jouent un rôle déterminant dans leur performance sur le terrain. Cette partie détaille les procédures standardisées utilisées pour formuler et préparer ces fluides, en mettant l'accent sur la reproductibilité, la sécurité et l'efficacité des opérations de forage.

5.3 Mesures et caractérisations des fluides de forage

5.3.1 Propriétés Rhéologiques (Viscosité, Thixotropie)

L'objectif principal des études rhéologiques est de caractériser et de quantifier les effets des interactions entre particules sur les propriétés macroscopiques de suspensions [37]. En général, la viscosité diminue avec l'augmentation de la température et augmente sous l'effet de la pression. Cependant, les effets quantitatifs varient considérablement en fonction du type de fluide, qu'il soit à base d'huile ou d'eau, ainsi que des additifs utilisés dans sa composition (polymères, argiles, agents alourdissants, nanoparticules, etc.).

5.3.1.1 Signification et variation des paramètres rhéologiques

La viscosité apparente (VA) : La viscosité apparente décrit la résistance d'un fluide à l'écoulement en fonction des conditions de flux spécifiques, telles que la vitesse de cisaillement. Elle est influencée par la composition du fluide, y compris la concentration et la taille des particules solides, ainsi que par la présence d'additifs ou de viscosifiants. La viscosité apparente augmente lorsque la concentration en particules solides ou les conditions de cisaillement sont élevées, et elle peut varier pour des fluides non-newtoniens qui montrent des comportements de viscosité non linéaires. Elle peut être ajustée par la dilution ou l'utilisation d'agents modificateurs [38].

La viscosité plastique (PV) : Elle est liée à la viscosité du fluide de base (la phase liquide), ainsi qu'à la concentration, la taille et la forme des particules solides. Elle augmente avec l'accroissement de la teneur et de la surface spécifique de ces particules. Elle peut être diminuée par la réduction des solides (centrifugation, dessablage...) ou par dilution [38].

La contrainte seuil (YP yield point) : Elle est due aux interactions physiques ou chimiques entre les particules en suspension, causées par les charges électriques surfaciques ou présentes au voisinage. L'amplitude de ces interactions dépend du type, de la quantité et de la charge surfacique du solide, ainsi que de la concentration de la phase fluide en ions. En fait, la contrainte seuil (YP) est un indice de l'équilibre de la boue. Ainsi lors du forage, une contrainte seuil trop élevée, peut être causée par le broyage des solides par l'outil, l'augmentation de la teneur en solide, une contamination par le sel, le gypse ou le ciment, ou par un manque en fluidifiants [39].

Caractère thixotropique (gel 0 gel 10) : Le caractère thixotrope d'une boue est évalué en mesurant le "gel 0" et le "gel 10". Le gel 0 représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Ils sont mesurés à l'aide du viscosimètre Fann 35 à une vitesse de 3 trs/min et exprimés en lb/100ft². Le gel 10 représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes. Le gel 0 varie pratiquement comme la viscosité plastique et le gel 10 comme

la contrainte seuil avec cependant, pour ce dernier, une sensibilité particulière au traitement chimique. En réalité, les caractéristiques d'écoulement du fluide dépendent de la viscosité du fluide de base, de la teneur de la phase continue, en huile, en eau, en gaz et en solides, de la phase discontinue et des différentes interactions entre ces constituants [39].

5.3.1.2 Mesures et instruments

La figure 5.1 présente un schéma d'un rhéomètre à cylindres rotatifs, un dispositif utilisé pour mesurer les propriétés rhéologiques des fluides, notamment leur viscosité. Le rhéomètre est constitué de deux cylindres concentriques : un cylindre interne mobile et un cylindre externe fixe. Lors de la mesure, le cylindre interne tourne à une vitesse angulaire Ω , tandis que le cylindre externe reste immobile. Le fluide à tester est placé dans l'espace annulaire entre les deux cylindres. Ce dispositif permet d'appliquer un cisaillement contrôlé au fluide et d'étudier sa réponse en termes de déformation et de contrainte, fournissant ainsi des informations précieuses sur ses caractéristiques rhéologiques.[39]

Rhéomètres à cylindres rotatifs

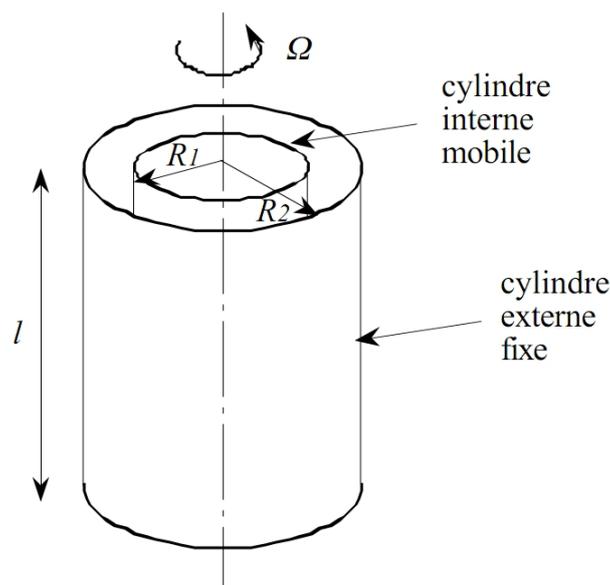


FIGURE 5.1 – Schéma d'un rhéomètres à cylindres rotatifs [10]

L'appareil utilisé est le Fann 35SA de Fann instruments; il présente les caractéristiques suivantes (figure 5.2) :

- Moteur Synchrone (115V, 50Hz) à deux vitesses (high, low);
- Gamme de vitesses de rotation N : 3, 6, 100, 200, 300 et 600 trs/min qui (respectivement : 5.1, 10.2, 170, 340, 510, 1020 s⁻¹).
Elles sont variées par le biais de l'interrupteur et du bouton moleté de changement de vitesse au-dessus de l'appareil.
- Gamme de viscosité : 1-30.000 cP
- Température maximale 93°C

Cylindre extérieur (rotor) :

- Diamètre intérieur 36.83 mm
- Longueur 87 mm - Trait (repère) d'immersion 58.4 mm à partir du bas du cylindre

Cylindre intérieur (Bob) :

- Diamètre 34.49 mm
- Longueur 38 mm Constante de torsion du ressort (spring) : 386 dyne.cm°

Lors de tests, la boue est mise dans un récipient thermostaté (Thermocup), muni d'un thermomètre (en °F).



FIGURE 5.2 – Rhéomètres à cylindres rotatifs modèle FANN

5.3.1.3 Protocole des mesures

Dans notre travail on a utilisé des boues à base d'eau et l'autre à base d'huile avec différentes formulations. Après identification des propriétés de chaque formulation des essais spécifiques de comportement nous ont permis de tracer les rhéogrammes et on a identifié la loi de comportement approprié à chaque formulation, le modèle rhéologique ainsi que les caractéristiques rhéologiques propres à chacun. Selon les normes API, la boue est assimilée à un fluide thixotrope obéissant au modèle de Bingham. Son comportement rhéologique est essentiellement caractérisé par la viscosité apparente (AV), la viscosité plastique (PV), la contrainte seuil (Yield Point), ainsi que la résistance du gel et son évolution dans le temps.

Les tests se font comme suit : On met la boue récemment agitée dans le thermocup, et on immerge les cylindres coaxiaux exactement jusqu'à la ligne de repère du rotor. On agite doucement jusqu'à atteindre la température désirée. On fait tourner le moteur à 600 trs/min, on attend que l'aiguille se stabilise et on prend la lecture à 600 trs/min. Ensuite la même démarche d'une manière descendante pour les autres vitesses 300, 200, 100, 6, 3 trs/min. Les constantes de l'appareil sont prévues de telle façon que les lectures sur cadran correspondent aux contraintes de cisaillement exprimées en livre/100 pieds carrés (lbs/100 ft²) et que la viscosité apparente (AV)

et la viscosité plastique (PV) en (cP) et la Yield Point (YP) en (lbs/100 ft²) soient déterminées directement à partir des lectures à 600 trs/min et 300 trs/min.

Ainsi, selon ces normes on a :

$$AV(cP) = L_{(600trs/min)}/2 \quad (5.1)$$

$$PV(cP) = L_{(600trs/min)} - L_{(300trs/min)} \quad (5.2)$$

$$YP(lbs/100ft^2) = L_{(300trs/min)} - PV \quad (5.3)$$

Par ces mêmes normes, le caractère thixotrope de la boue est évalué par la mesure de la force de gel après 10s et 10 min au repos. (Gel 0 et Gel 10 respectivement).

Pour les déterminer on agite la boue à 600 trs/min pendant 15s, on laisse reposer pendant 10s puis on fait tourner à 3 trs/min. La déviation maximale relevée sur le cadran constitue le Gel 0 en (lbs/100 ft²). On agite à nouveau, on laisse reposer pendant 10 min, et on refait tourner à 3 trs/min. La déviation maximale relevée sur le cadran constitue le Gel 10 en (lbs/100 ft²). Les paramètres du modèle de Bingham (PV, YP) ainsi déterminés, ne constituent pas les caractéristiques réelles du fluide étudié. En fait, ce sont des indices pratiques adoptés par les normes API, qui permettent d'avoir certaines informations sur le comportement rhéologique du fluide et surtout de juger de sa qualité, d'où leur grande importance, surtout sur chantier.

5.3.1.4 Exploitation des résultats

Formulations à base d'huile

Le tableau 5.3, montre la formulation de base ainsi que les différentes formualtions en jouent sur la concentration des nanoparticules. Ce tableau montre que l'ajout de nanoparticules dans les boues de forage à base d'huile améliore les propriétés rhéologiques, telles que la viscosité apparente et la capacité de gélification. Les formulations avec nanoparticules présentent une augmentation de la viscosité et du "Yield Point", suggérant une meilleure stabilité sous cisaillement. Toutefois, ces effets varient selon la concentration des nanoparticules, mettant en évidence l'importance d'un dosage optimal pour des performances maximales.

TABLE 5.3 – Résultats des propriétés rhéologiques des formulations OBM

Paramètres Rhéologiques	Unité	Formulation de base		Formulation + % NP		
		MI	MI+0.5%	MI+1%	MI+1.5%	MI+2%
L600	tr/min	31	31	33	34	33
L300	tr/min	19	19	21	20	19
L200	tr/min	14	14	15	14	14
L100	tr/min	9	9	9	9	9
L6	tr/min	4	4	4	4	4
L3	tr/min	3	3	3	3	3
Viscosité Apparente (AV)	cP	15,5	15,5	16	17	16,5
Viscosité Plastique (PV)	cP	12	12	12	14	14
Yield Point (YP)	lb/100ft ²	7	7	9	6	5
Gel 10 sec	lb/100ft ²	4	4	4	4	3
Gel 10 min	lb/100ft ²	5	5	10	6	6

La figure 5.3 graphique présenté illustre la courbe de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour différentes formulations de boues de forage à base d'huile, incluant une formulation de base (MI) et plusieurs formulations enrichies en nanoparticules (NP) à des concentrations de 0,5 %, 1 %, 1,5 % et 2 %. Il est évident que l'ajout de nanoparticules modifie significativement le comportement rhéologique des boues de forage. Les courbes montrent une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement, caractéristique des fluides Bingham plastiques, où une augmentation de la vitesse de cisaillement entraîne une augmentation proportionnelle de la contrainte de cisaillement [40].

Les formulations enrichies en nanoparticules, notamment celles avec 1 % et 1,5 % de NP, présentent des courbes légèrement au-dessus de la formulation de base, indiquant une augmentation de la contrainte de cisaillement pour une même vitesse de cisaillement [41]. Cela suggère que les nanoparticules renforcent la structure du fluide, augmentant ainsi sa résistance au cisaillement [42].

Notamment, la courbe de la formulation avec 2 % de NP se distingue par une contrainte de cisaillement légèrement inférieure à celle des formulations avec 1 % et 1,5 % de NP à des vitesses de cisaillement plus élevées. Cela pourrait indiquer une saturation de l'effet des nanoparticules à cette concentration, où l'augmentation de la concentration n'améliore plus la résistance du fluide au cisaillement de manière aussi efficace.

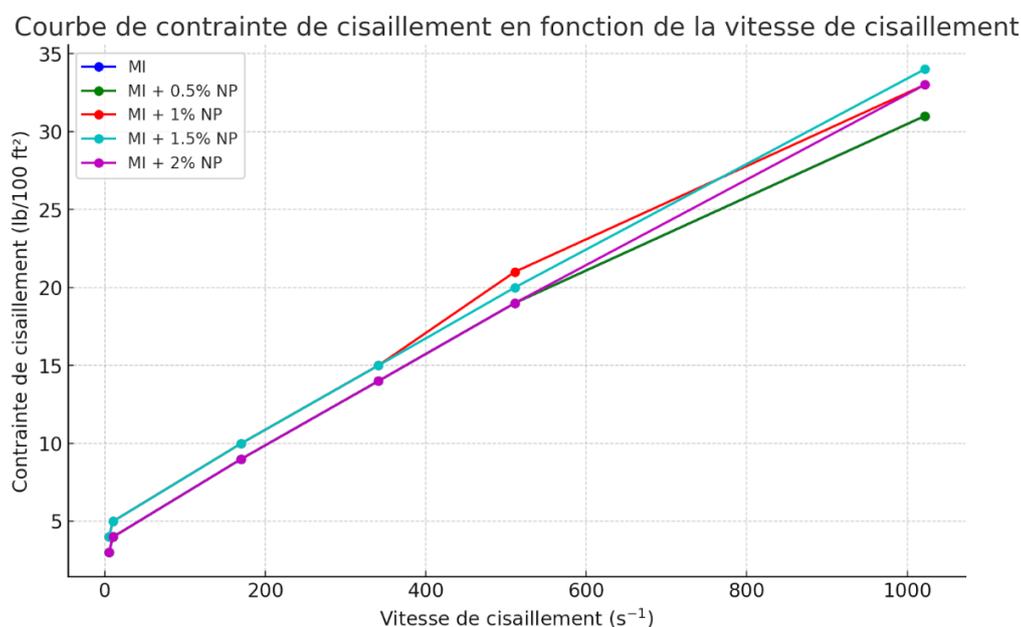


FIGURE 5.3 – Courbes rhéologiques des fluides de forage à base d'huile avec l'ajout de NP d'oxyde de fer

Interprétation des résultats :

Formulation MI

- **Comportement** : La contrainte de cisaillement diminue de manière assez régulière avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement. À des vitesses élevées, la contrainte de cisaillement est relativement stable.
- **Observation** : Cela indique que la formulation MI a une viscosité relativement constante à des vitesses élevées et une diminution modérée de la viscosité à des vitesses plus faibles.

Formulation MI + 0.5% NP

- **Comportement** : Les courbes pour cette formulation sont très proches de celles de MI, avec une légère augmentation de la contrainte de cisaillement à faible vitesse.
- **Observation** : L'ajout de 0.5% de NP semble avoir un effet marginal sur les propriétés rhéologiques, avec une légère augmentation de la viscosité à faible vitesse mais une courbe globalement similaire à celle de MI.

Formulation MI + 1% NP

- **Comportement** : Cette formulation montre une augmentation notable de la contrainte de cisaillement à toutes les vitesses, en particulier à faible vitesse.
- **Observation** : L'ajout de 1% de NP semble améliorer la viscosité à faible vitesse et peut améliorer la résistance au cisaillement de la boue. La courbe est plus haute et plus raide, ce qui indique une augmentation de la viscosité.

Formulation MI + 1.5% NP

- **Comportement** : La contrainte de cisaillement est encore plus élevée à faible vitesse par rapport à la formulation avec 1% de NP, et la courbe montre une tendance à se stabiliser à des vitesses plus élevées.
- **Observation** : L'ajout de 1.5% de NP augmente encore la viscosité et la résistance au cisaillement. La formulation présente une viscosité accrue à faible vitesse et une meilleure stabilité à haute vitesse.

Formulation MI + 2% NP

- **Comportement** : La courbe pour cette formulation est similaire à celle de MI + 1.5% NP, mais avec des valeurs légèrement réduites à faible vitesse et une tendance similaire à haute vitesse.
- **Observation** : Bien que l'ajout de 2% de NP améliore la viscosité à faible vitesse, l'augmentation n'est pas aussi marquée qu'avec 1.5% de NP. Cela pourrait indiquer un seuil au-delà duquel l'ajout de plus de NP n'apporte pas de bénéfices significatifs supplémentaires.

Synthèse

- **Augmentation de la contrainte de cisaillement** : L'ajout de NP augmente la contrainte de cisaillement à toutes les vitesses, particulièrement à faible vitesse. Cela indique que les NP augmentent la viscosité et la résistance au cisaillement.
- **Effet Marginal au-delà de 1.5% NP** : La différence entre 1.5% et 2% de NP est relativement faible, suggérant que l'effet de l'ajout de NP atteint un plateau ou que l'augmentation de la concentration ne produit pas de bénéfices proportionnels supplémentaires.

Formulations à base d'eau

Le tableau 5.4 présente les paramètres rhéologiques d'une formulation de fluide de forage à base d'eau (WBM) comparée à une formulation enrichie avec un mélange de xanthane (XG) et de nanoparticules (NP). Les résultats montrent que l'ajout de nanoparticules et de xanthane améliore de manière significative les propriétés rhéologiques du fluide.

TABLE 5.4 – Résultats des propriétés rhéologiques des formulations WBM

Paramètres Rhéologiques	Unité	Formulation de base	Formulation + NP
		WBM	WBM+(XG+NP)
L600	tr/min	57	76
L300	tr/min	36	50
L200	tr/min	28	39
L100	tr/min	17	26
L6	tr/min	4	8
L3	tr/min	3	4
Viscosité Apparente (AV)	cP	28,5	38
Viscosité Plastique (PV)	cP	21	26
Yield Point (YP)	lb/100ft ²	15	24
Gel 10 sec	lb/100ft ²	4	6
Gel 10 min	lb/100ft ²	4	4

La courbe 5.4 illustre les courbes rhéologiques de deux formulations de fluides de forage à base d'eau (WBM). La courbe bleue représente la formulation WBM¹ de base, tandis que la courbe verte correspond à la formulation enrichie avec du xanthane (XG)² et des nanoparticules d'oxyde de fer (NP)³. Les résultats montrent clairement que l'ajout de nanoparticules et de xanthane améliore significativement la contrainte de cisaillement du fluide pour une même vitesse de cisaillement [43]. Les courbes révèlent que la formulation enrichie (WBM+(XG+NP)) présente une contrainte de cisaillement plus élevée par rapport à la formulation de base, ce qui indique une meilleure résistance du fluide à l'écoulement sous contrainte. Cette augmentation de la contrainte de cisaillement avec l'ajout de NP est particulièrement notable aux vitesses de cisaillement plus élevées, ce qui suggère que la formulation enrichie offre une meilleure stabilité et une capacité de transport des débris accrue dans des conditions de cisaillement intense [44]. L'amélioration observée dans la formulation enrichie peut être attribuée à l'effet synergique des nanoparticules d'oxyde de fer et du xanthane, qui agissent ensemble pour augmenter la viscosité et stabiliser le fluide sous des conditions de cisaillement élevé. Cette synergie permet non seulement de maintenir la stabilité du puits, mais aussi de réduire les problèmes liés à la perte de circulation et au transport inefficace des déblais de forage.

1. WBM : Water based mud.

2. XG : Xanthane.

3. NP :nanoparticules d'oxyde de fer.

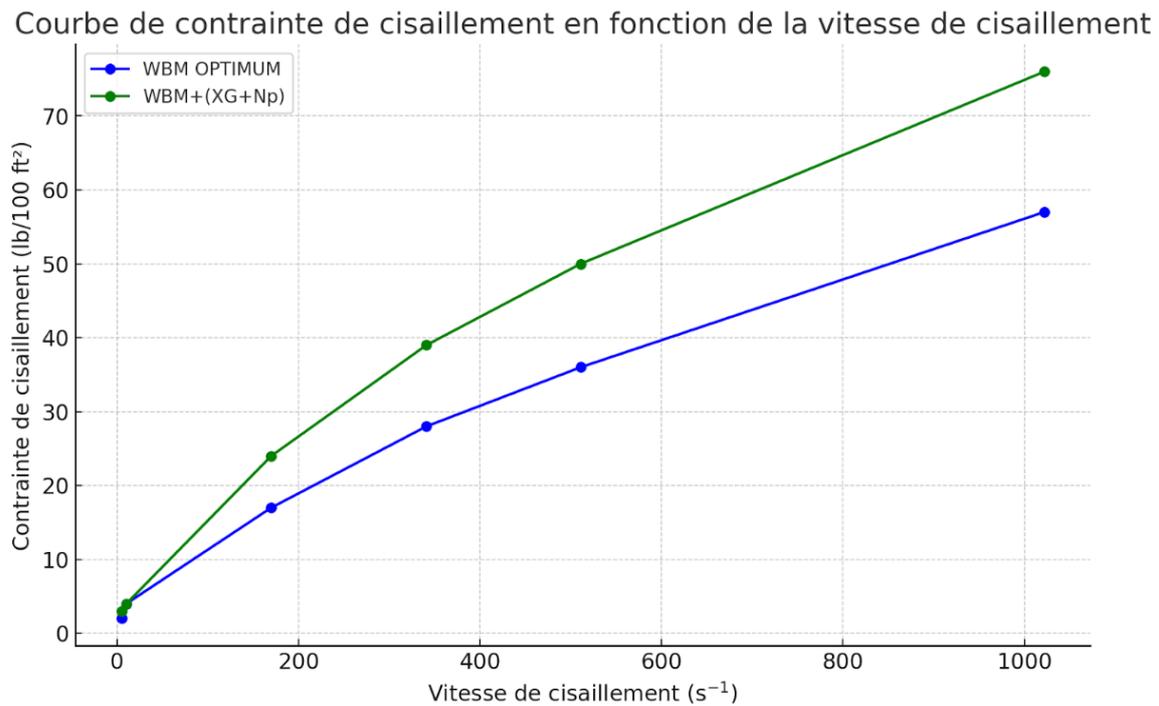


FIGURE 5.4 – Courbes rhéologiques des fluides de forage à base d'eau avec l'ajout de NP d'oxyde de fer

Interprétation des résultats :

1. Formulation d'un fluide de forage à base d'eau optimal :

- Contrainte de cisaillement :

- Les valeurs de la contrainte de cisaillement varient de 57 à 2 (lb/100 ft²) en fonction de la vitesse de cisaillement (de 1022 à 5,1 s⁻¹).
La courbe montre une diminution régulière de la contrainte de cisaillement à mesure que la vitesse de cisaillement diminue.

- Comportement rhéologique :

- WBM OPTIMUM présente un comportement pseudo-plastique, ce qui est typique des boues de forage à base d'eau.
Cette formulation a un point de consistance (Yield Point, Yp) de 15 lb/100 ft² et une viscosité plastique (Plastic Viscosity, Pv) de 21 cp.

2. Formulation d'un fluide de forage WBM⁴ + (XG+NP)^{5 6} :

- Contrainte de cisaillement :

- Les valeurs de la contrainte de cisaillement varient de 76 à 3 (lb/100 ft²) en fonction de la vitesse de cisaillement. Cette formulation montre des valeurs de contrainte de cisaillement plus élevées que WBM OPTIMUM, surtout à des vitesses de cisaillement élevées.

4. WBM : Water based mud.

5. XG : Xanthan Gum.

6. NP : Nanoparticules.

- Comportement rhéologique :

- L'ajout de Xanthan Gum (XG) et de NP d'oxyde de fer renforce la résistance au cisaillement, augmentant la stabilité de la boue sous des vitesses de cisaillement élevées. Cette formulation a un point de consistance (Yield Point, Y_p) de 24 lb/100 ft² et une viscosité plastique (Plastic Viscosity, P_v) de 26 cp.

Synthèse

L'ajout de Xanthan Gum et de NP d'oxyde fer à la formulation WBM augmente significativement la contrainte de cisaillement, particulièrement à des vitesses de cisaillement élevées, ce qui suggère une meilleure stabilité de la boue de forage.

5.3.2 Propriétés de Filtration

L'objectif principal des études de filtration est de caractériser et de quantifier la capacité des fluides de forage à contrôler la perte de fluide et la formation d'un gâteau de filtration lors du processus de forage. Les propriétés de filtration sont primordiales pour garantir la stabilité du puits et prévenir les problèmes de perte de circulation.

5.3.2.1 Filtration des Fluides de Forage

Les fluides de forage, qu'ils soient à base d'eau (WBM) ou à base d'huile (OBM), doivent être formulés pour minimiser la perte de fluide à travers la formation et pour former un gâteau de filtration de faible perméabilité et faible épaisseur. La performance de filtration est influencée par les additifs, tels que les tensioactifs, les réducteurs de filtrat et les nanoparticules, qui sont ajoutés pour améliorer les propriétés de filtration du fluide.

5.3.2.2 Appareils de Mesure**Filter Press HPHT (pour OBM)****Description de l'Appareil**

La figure 5.6 monte un Filter Press Model Fann HT 4700 est utilisé pour évaluer les propriétés de filtration des fluides de forage sous des conditions de haute température et haute pression HTHP⁷. Cet appareil permet de simuler les conditions rencontrées dans les puits de forage profonds et d'obtenir des mesures précises de la perte de fluide et de l'épaisseur du gâteau de filtration.

Caractéristiques de l'appareil :

- Température maximale : 260 °C
- Pression maximale : 12 410 kPa
- Surface de filtration : 7.1 cm² (1.1 pouces²)
- Volume de la cellule de test : 500 mL

7. HPHT : Haute Pression Haute Température

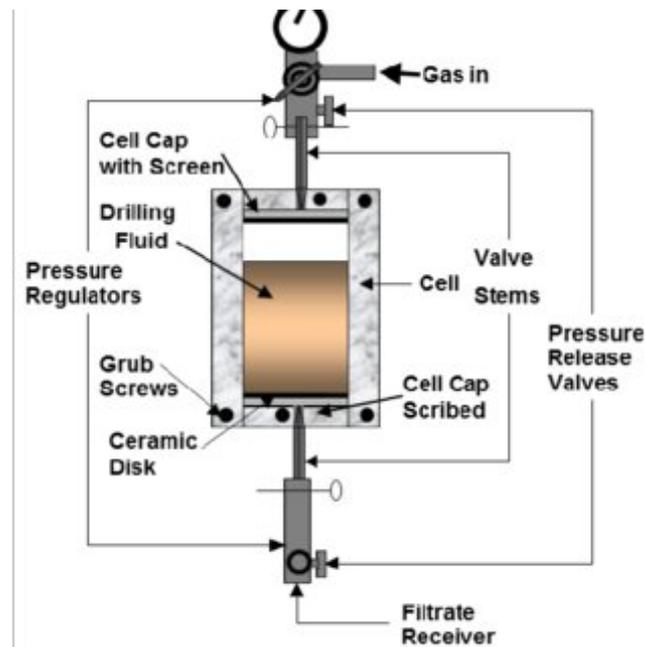


FIGURE 5.5 – Schéma de Fonctionnement du Filtre-Pressé HPHT [11].

Le filtre-presse est composé d'une enveloppe chauffante, d'une cellule de sécurité, d'une sonde thermocouple de type J, d'ensembles de pressurisation et de deux câbles d'alimentation (voir figure 5.6). La cellule d'essai peut être chauffée à une température maximale de 260 °C avec un échantillon de 100 mL ou de 177 °C avec un échantillon de 130 mL en trente minutes. La pression de service maximale est de 12 410 kPa.

Les dispositifs de sécurité comprennent un mécanisme de verrouillage et de déverrouillage qui maintient la cellule en place et maximise le transfert de chaleur. L'extérieur de la gaine est sûr au toucher, à moins de 54.44 °C. Le HT4700 est doté d'un contrôleur de température numérique pour une meilleure précision et un meilleur contrôle. La sonde thermocouple permet des mesures de température précises. L'enregistrement des données de test s'effectue à l'aide d'un port de données sur la gaine chauffante.



FIGURE 5.6 – Appareil de filtration sous haute pression et haute température (HPHT) de type FANN

Protocole de Mesure

- **Préparation de l'échantillon** : La boue de forage est préparée selon la formulation et agitée pour assurer une distribution homogène des particules.
- **Chargement de l'échantillon** : L'échantillon de boue est placé dans la cellule de test, et la température est ajustée à la valeur désirée(250 °F pour OBM).
- **Application de la pression** : Une pression de 500 psi est appliquée à l'échantillon à travers un filtre, simulant les conditions de haute pression dans le puits.
- **Mesure de la perte de fluide** : Le volume de fluide filtré est mesuré après un intervalle de temps spécifié de 30 minutes.
- **Évaluation du gâteau de filtration** : Après la mesure de la perte de fluide, le gâteau de filtration formé sur le filtre est récupéré et son épaisseur est mesurée.

Filter Press API⁸ (pour WBM)

Le filtre-presse se compose essentiellement d'un étrier muni d'une vis de serrage permettant le blocage des trois parties du corps du filtre. Ce corps se compose :

- D'une embase percée d'un trou et dotée d'un ajutage par lequel s'écoule le filtrat. Cette embase supporte un tamis métallique de 60 à 80 mesh sur lequel est placé le papier filtre de 90 mm de diamètre (surface de filtration de 7,1 pouces carrés) du type Whatman °50 dont l'équivalent est le type 42.
- D'un cylindre de diamètre intérieur 3 pouces (76,2 mm) et de hauteur 9 pouces (228,6 mm). L'API recommande au moins 3,5 pouces de hauteur (88,9 mm).
- D'un couvercle muni d'une arrivée de gaz comprimé dont l'étanchéité avec le cylindre est assurée à l'aide d'un joint plat du même type que ceux placés sur l'embase.

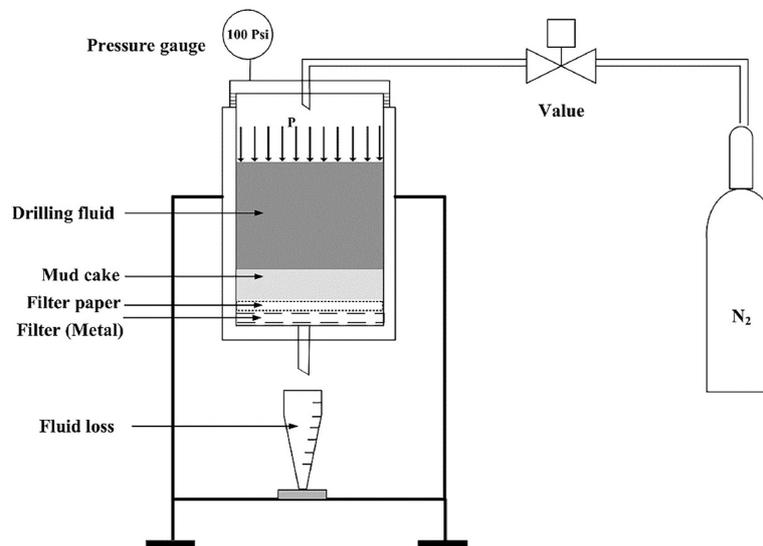


FIGURE 5.7 – Schéma du dispositif de presse-filtre API pour l'évaluation de la filtration des boues de forage [12]

Principe de mesure :

On soumet la boue à une pression de 100 psi (7 bars) dans un cylindre normalisé doté d'une surface perméable de section et perméabilité normalisées. On note la quantité de liquide qui filtre en 30 minutes, à température ambiante, c'est le filtrat API. Les solides déposés pendant la filtration constituent ce que l'on appelle le cake. L'épaisseur du cake est mesurée et notée.

8. API : American Petroleum Institut



FIGURE 5.8 – Filter Press API model FANN

La filtration s'effectue donc en statique, à température ambiante, ce qui ne reflète qu'imparfaitement les conditions de filtration dans le sondage.

Pour utiliser le filtre-presse :

1. Poser le joint sur l'embase.
2. Poser le tamis sur le joint.
3. Poser le second joint sur le papier filtre.
4. Emboîter le cylindre sur l'embase et verrouiller le système à baïonnette.
5. Remplir la boue (jusqu'à environ 2 cm du haut du cylindre).
6. Poser le couvercle sur le cylindre en intercalant un joint.
7. Placer l'ensemble dans l'étrier et bloquer à l'aide de la vis de serrage.
8. Disposer une éprouvette graduée sous l'ajutage.
9. Appliquer (assez progressivement pour ne pas rompre le papier filtre) une pression de 7 bars (100 psi) et simultanément déclencher le chronomètre.
10. Après 30 minutes, lire le volume de fluide recueilli dans l'éprouvette, exprimé en cm^3 ; c'est la valeur du filtrat API.
11. Fermer et purger le circuit de gaz comprimé, démonter l'appareil et recueillir le cake.

5.3.2.3 Interprétation des résultats

Les résultats de filtration pour les formulations de boue OBM et WBM sont résumés dans les tableaux suivants. Les valeurs de filtrat et d'épaisseur du gâteau de filtration permettent de comparer l'efficacité des différentes formulations.

Formulations à base d'huile

Le tableau 5.5 présente les résultats de filtration et l'épaisseur du cake pour différentes formulations de boues de forage à base d'huile, comparant une formulation de base (MI) avec plusieurs formulations enrichies en nanoparticules (NP) à des concentrations croissantes (0,5%, 1 %, 1,5 % et 2 %).

TABLE 5.5 – Les résultats de filtration et l'épaisseur de cake des différentes formulations à base d'huile

Paramètres de Filtration	Unité	Formulation de base	Formulation MI + %NP			
		MI	0,5%	1%	1,5%	2%
Filtrat	cc	5	5	3	2,8	4,4
Cake	inch	02/32	02/32	<01/32	01/32	02/32

Les figures 5.10 et 5.9 démontrent l'influence des nanoparticules sur le volume de filtrat HPHT des formulations de boues à base d'huile (OBM). L'ajout de nanoparticules a permis de réduire significativement le volume de filtrat, avec une efficacité maximale atteinte à une concentration de 1,5% de nanoparticules, où le volume de filtrat est descendu à environ 2,8 cc. En revanche, l'ajout de 2% de nanoparticules a entraîné une légère augmentation du filtrat à environ 4 cc, suggérant un effet de saturation où une concentration trop élevée pourrait entraîner une agglomération des nanoparticules, réduisant ainsi leur efficacité.

Les résultats indiquent que l'ajout de nanoparticules est bénéfique jusqu'à une concentration optimale, au-delà de laquelle leur performance diminue. Ces observations soulignent l'importance de calibrer précisément la concentration des nanoparticules pour maximiser l'efficacité des boues sous conditions HPHT, optimisant ainsi la performance des boues dans des environnements extrêmes.



FIGURE 5.9 – Le résultat de volume de filtrat

La figure 5.12 et la figure 5.11 présentent l'épaisseur du gâteau de filtration (cake) pour différentes formulations de boues à base d'huile (OBM) avec l'ajout de nanoparticules (NP). La formulation de base MI montre une épaisseur relativement élevée du gâteau, autour de 0,065 inch, qui est légèrement réduite avec l'ajout de 0,5% de NP. Cependant, l'épaisseur diminue de manière significative pour les formulations contenant 1% et 1,5% de NP, atteignant des valeurs d'environ 0,025 inch et 0,035 inch respectivement, indiquant une meilleure efficacité de filtration et une réduction de la formation du gâteau. Notamment, l'épaisseur augmente à nouveau avec l'ajout de 2% de NP, revenant à une valeur proche de celle de la formulation de base, suggérant que l'excès de NP peut entraîner une agglomération ou une structure de cake moins compacte. Ces résultats montrent que l'ajout contrôlé de NP peut optimiser l'épaisseur du gâteau de filtration, mais qu'il existe une concentration optimale à ne pas dépasser pour éviter une diminution de l'efficacité de la filtration.

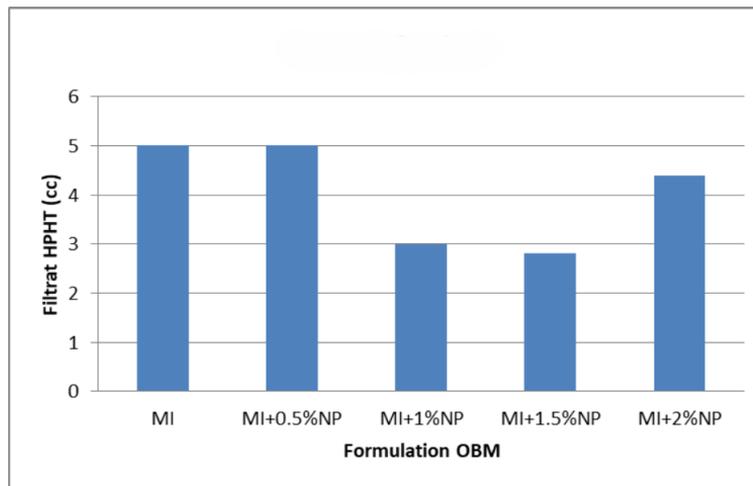


FIGURE 5.10 – Le graphe qui représente le volume de filtrat HPHT des différentes formulations OBM

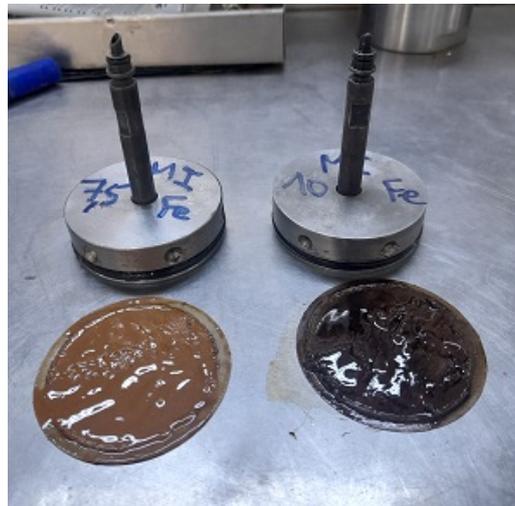


FIGURE 5.11 – Le résultat de cake

Interprétation des résultats

- **MI** : La formulation de base MI montre une perte de filtrat de 5 cc et une épaisseur de gâteau de 02/32 inch, indiquant une performance de filtration standard.
- **MI+0.5% NP** : L'ajout de 0.5% de nanoparticules n'améliore pas significativement la performance de filtration par rapport à la formulation MI.
- **MI+1% NP** : L'ajout de 1% de nanoparticules réduit notablement la perte de filtrat à 3 cc et l'épaisseur du gâteau à moins de 01/32 inch, indiquant une amélioration significative des propriétés de filtration.
- **MI+1.5% NP** : La performance de filtration continue de s'améliorer avec 1.5% de nanoparticules, montrant une perte de filtrat de 2.8 cc et une épaisseur de gâteau de 01/32 inch.
- **MI+2% NP** : À 2% de nanoparticules, la performance de filtration se stabilise avec une perte de filtrat de 4.4 cc et une épaisseur de gâteau de 02/32 inch, suggérant un seuil au-delà duquel l'ajout de nanoparticules n'apporte pas de bénéfices.

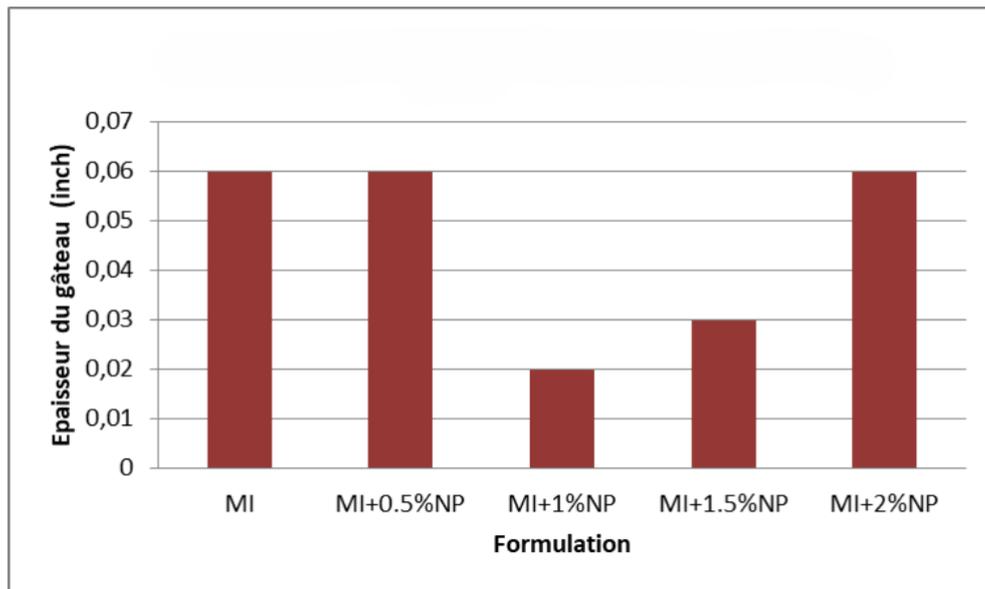


FIGURE 5.12 – Le graphe qui représente l’épaisseur du gâteau (cake) de filtration des différentes formulations OBM

Formulations à base d’eau

Le tableau 5.6 présente les résultats de filtration et l’épaisseur du cake pour deux formulations de boues de forage à base d’eau : une formulation de base (WBM) et une formulation enrichie avec un mélange de xanthane (XG) et de nanoparticules (NP).

TABLE 5.6 – Les résultats de filtration et l’épaisseur de cake des différentes formulations à base d’eau

Paramètres de Filtration	Unité	Formulation de base	Formulation + NP
		WBM	WBM +(XG+NP)
Filtrat	cc	5	4,4
Cake	inch	02/32	01/32

La figure 5.13 présente un graphique comparant le volume de filtrat des boues de forage à base d’eau (WBM) pour une formulation de base et une formulation enrichie en xanthane (XG) et nanoparticules (NP). Il est clair que l’ajout de nanoparticules et de xanthane réduit significativement le volume de filtrat, passant de 5 cc pour la formulation de base à 4,4 cc pour la formulation enrichie. Cette diminution du volume de filtrat indique une meilleure rétention des fluides, ce qui est crucial pour minimiser les pertes de circulation lors du forage. L’amélioration de la performance de filtration avec l’ajout de NP et de xanthane suggère une optimisation des propriétés de barrière du fluide, renforçant ainsi la stabilité du puits et la qualité du cake formé. Ce résultat démontre l’efficacité des additifs utilisés dans l’amélioration des caractéristiques de filtration des boues WBM, confirmant leur potentiel dans des applications de forage exigeantes.

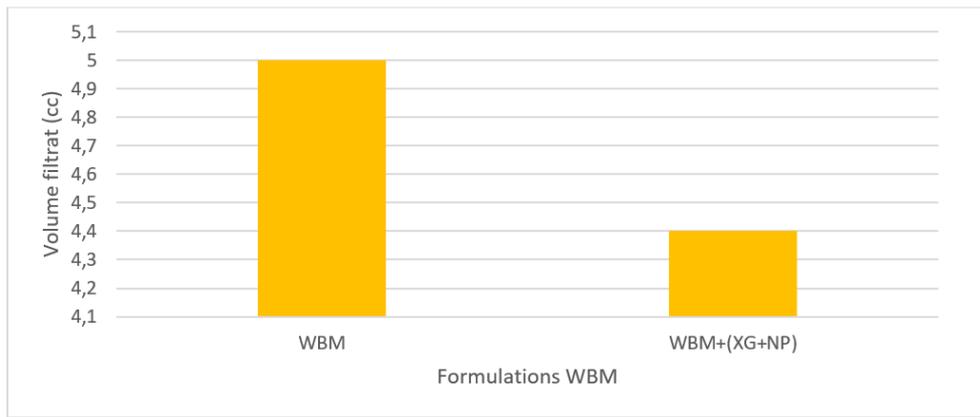


FIGURE 5.13 – Le graphe qui représente le volume de filtrat API des différentes formulations WBM

La figure 5.14 compare l'épaisseur du cake de filtration pour deux formulations de boues de forage à base d'eau (WBM) : une formulation de base et une formulation enrichie en xanthane (XG) et nanoparticules (NP). On observe que l'épaisseur du cake est significativement réduite dans la formulation enrichie, passant de 0,06 inch pour la formulation de base à environ 0,03 inch pour celle contenant XG et NP. Cette diminution de l'épaisseur du cake indique une meilleure efficacité de filtration, avec une formation de cake plus mince et plus compact, ce qui est bénéfique pour minimiser les risques de colmatage et améliorer la stabilité du puits. L'ajout de nanoparticules et de xanthane semble donc renforcer la capacité du fluide à créer une barrière efficace tout en réduisant l'accumulation excessive de matériaux sur les parois du puits. Ces résultats confirment l'avantage des additifs dans l'amélioration des performances des boues de forage, notamment dans des conditions de forage difficiles.

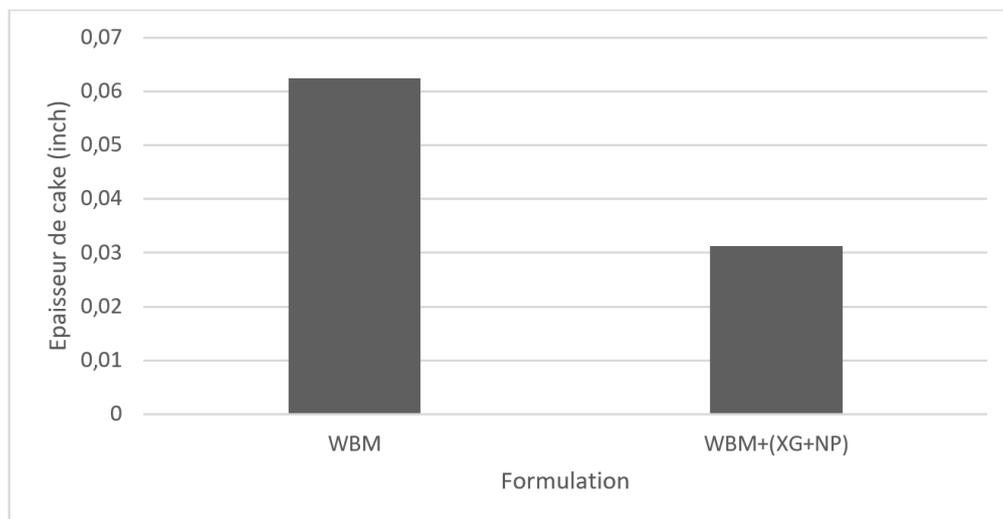


FIGURE 5.14 – Le graphe qui représente l'épaisseur du gateau (cake) de filtration des différentes formulations WBM

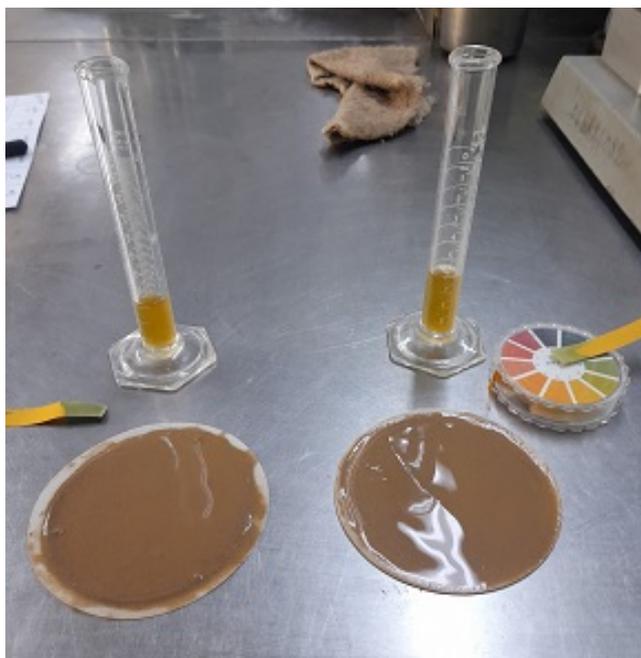


FIGURE 5.15 – Le résultat de filtrat et le cake de formulations WBM

Interprétation des résultats

- **WBM** : La formulation de base WBM présente une perte de filtrat de 5 cc et une épaisseur de gâteau de 02/32 inch.
- **WBM + (XG+NP)** : L'ajout de Xanthan Gum et de nanoparticules réduit la perte de filtrat à 4.4 cc et l'épaisseur du gâteau à 01/32 inch, indiquant une amélioration notable des propriétés de filtration.

Synthèse

Les résultats montrent que l'ajout de nanoparticules améliore les propriétés de filtration des boues de forage, tant pour les formulations OBM que WBM. L'effet bénéfique des nanoparticules est particulièrement marqué à des concentrations allant jusqu'à 1.5%, au-delà desquelles les gains supplémentaires deviennent marginaux. Les formulations avec Xanthan Gum et nanoparticules dans les boues à base d'eau démontrent également une performance améliorée en termes de contrôle de la perte de fluide et de formation d'un gâteau de filtration de faible épaisseur.

5.3.3 La densité

La densité est un paramètre important des boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour contrebalancer la pression exercée par les venues d'eau, d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions. Cependant elle ne doit pas dépasser la limite de résistance des parois du puits (formations traversées) pour ne pas les fracturer, ce qui provoquerait une perte de boue au cours de la circulation.

5.3.3.1 Appareil de Mesure

Description de l'appareil :

La balance Fann de pesage de boue est un appareil précis pour mesurer et déterminer la densité d'une boue de forage. Il a une gamme de 7 à 24 livres/gallon ou densité spécifique de 0,84 à 2,88 g/cm³. La balance de boue se compose d'une tasse et d'un couvercle témoin du volume constant reliés à un bras d'équilibre qui a quatre échelles de graduation.



FIGURE 5.16 – Densimètre model FANN

Étapes de mesure de la densité :

- Placer l'embase de la balance sur une surface approximativement plane.
- Remplir la tasse de la balance d'un échantillon à contrôler. Taper sur le côté de la tasse plusieurs fois afin de bien chasser vers le haut toutes les bulles ou gaz. Mettre le couvercle sur la tasse en la poussant vers le bas avec un mouvement tournant lent jusqu'à ce qu'il soit fermement posé sur celle-ci. S'assurer qu'une partie de la boue est expulsée par le trou central de passage situé dans le couvercle. Cette action aidera également à évacuer les gaz contenus dans l'échantillon.
- Nettoyer les débordements éventuels à l'extérieur de la tasse et du couvercle
- Insérer le bord du couteau du bras de balance dans le point d'appui de l'embase, puis chercher à équilibrer la balance en déplaçant le cavalier le long du bras.
- Prendre la valeur de lecture du côté du cavalier situé vers la tasse (la flèche sur la cavalier indique le côté de mesure).

5.3.3.2 Exploitation des résultats

Les résultats de la densité pour les formulations de boue OBM et WBM sont résumés dans les tableaux suivants.

Formulations à base d'huile

Le tableau 5.7 présente les résultats de densité pour différentes formulations de boues de forage à base d'huile, comparant une formulation de base (MI) avec plusieurs formulations enrichies en nanoparticules (NP) à différentes concentrations (0,5 %, 1%, 1,5% et 2%).

TABLE 5.7 – Les résultats de la densité pour les formulations à base d'huile

Paramètres de Densité	Unité	Formulation de base				Formulation MI + %NP			
		MI	0,5%	1%	1,5%	2%			
Densité	sg	1,39	1,38	1,38	1,38	1,38			

La figure 5.17 montre les mesures de densité pour différentes formulations de boues à base d'huile (OBM) avec l'ajout de nanoparticules (NP). La formulation de base MI, sans ajout de nanoparticules, présente la densité la plus élevée à environ 1,39 g/cm³. L'ajout de nanoparticules, quel que soit le pourcentage (de 0,5% à 2%), entraîne une diminution progressive de la densité, avec la formulation MI + 2% NP affichant la densité la plus basse à environ 1,38 g/cm³. Cette réduction de densité peut être attribuée à l'effet des nanoparticules qui, en se dispersant dans la boue, modifient la structure et la distribution des particules, réduisant ainsi la densité globale du système. Cela suggère que l'incorporation de nanoparticules influence non seulement la performance de la boue en termes de filtrat et de gâteau de filtration, mais également sa densité, ce qui peut avoir des implications sur la stabilité et l'efficacité des boues dans des conditions opérationnelles. Il est donc essentiel de prendre en compte cet effet lors de l'optimisation des formulations pour des applications spécifiques.

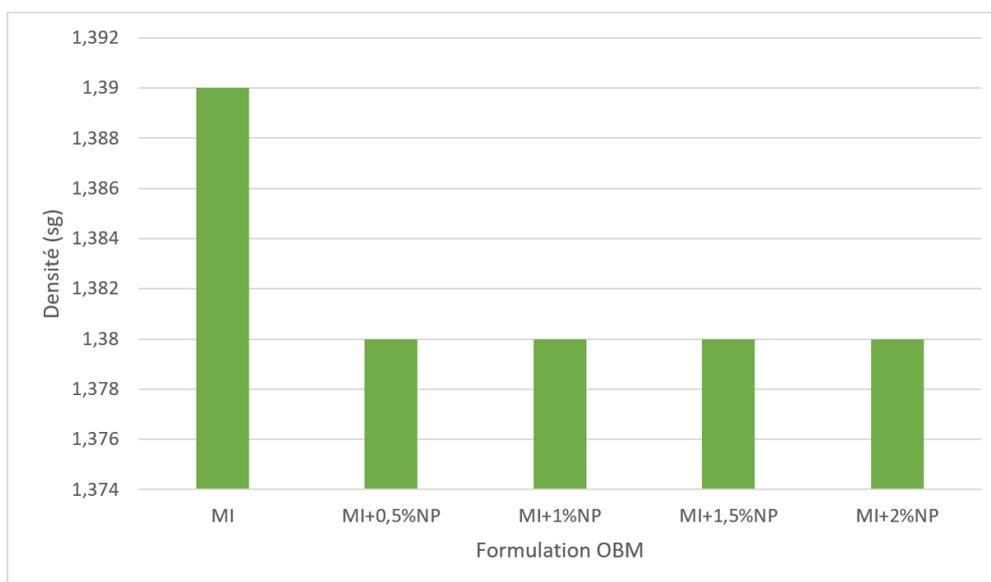


FIGURE 5.17 – Valeurs de densité pour les différentes formulations de boues à base d'huile (OBM)

Formulations à base d'eau

Le tableau 5.3.3.2 présenté compare les résultats de la densité pour deux formulations de boue à base d'eau (Water-Based Mud, WBM). La première formulation est la boue de base sans ajout d'additifs spéciaux, tandis que la deuxième formulation inclut des nanoparticules (NP) en combinaison avec de la gomme xanthane (XG), désignée par "WBM + (XG+NP)".

La figure 5.18 présente les valeurs de densité pour deux formulations de boues à base d'eau (WBM). Le graphique compare la densité de la formulation de base (WBM) avec celle d'une formulation modifiée contenant à la fois des nanoparticules (NP) et de la gomme xanthane (XG), désignée par "WBM + (XG+NP)". Les deux formulations montrent des valeurs de densité identiques, approximativement égales à 1,26 g/cm². Ce résultat indique que l'ajout de nanoparticules et de gomme xanthane n'affecte pas la densité de la boue de base. Cette stabilité de la densité est un aspect crucial pour les applications de forage, car elle assure que la pression hydrostatique et les caractéristiques de flottabilité de la boue restent constantes, même avec des modifications dans la composition chimique. En d'autres termes, l'ajout de ces additifs permet d'améliorer potentiellement d'autres propriétés de la boue, comme la viscosité ou la capacité de filtration, sans compromettre la densité, un paramètre critique pour le contrôle de la pression dans le puits. Ce résultat suggère que les formulations peuvent être optimisées pour des performances spécifiques sans nécessiter d'ajustements supplémentaires pour maintenir la densité.

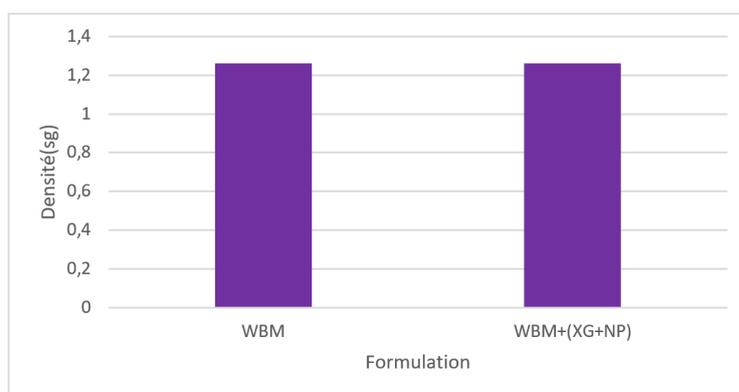


FIGURE 5.18 – Le graphe de densité des différentes formulations de boues à base d'eau (WBM) et WBM + (XG+NP)

Interprétation des résultats

Les résultats ont montré que l'ajout des nanoparticules d'oxyde de fer synthétisées n'a presque aucun effet sur la densité de la boue de forage, qu'elle soit à base d'huile (OBM) ou à base d'eau (WBM). Comme le montrent les courbes 5.17 et 5.18, la densité reste stable et proche de celle des formulations sans nanoparticules.

Synthèse

Cet effet de stabilité de densité représente un avantage significatif pour les nanoparticules ajoutées, car elles aident à maintenir une meilleure densité de circulation équivalente (ECD) lors du forage de puits. C'est également un atout lorsqu'on traite des remontées de boue car le maintien d'une densité stable est essentiel pour le contrôle de la pression et la gestion des remontées de boue. De plus, dans des puits ayant une fenêtre étroite entre le gradient de fracture et le gradient de pression des pores, car aucune augmentation de la densité de la boue n'est observée lors de l'ajout des nanoparticules d'oxyde de fer.

5.3.4 Mesures de distillation

Ces mesures sont effectuées pour déterminer les volumes en huile, en eau et en solides contenus dans la boue de forage. Un volume de 10cc de la boue est chauffé, les vapeurs d'eau et d'huile se condensent et sont récupérées dans une éprouvette graduée. La teneur en solide est obtenue par différence.

5.3.4.1 Appareil de Mesure

Description de l'appareil :

Un distillateur de type Fann est utilisé, et une éprouvette graduée est placée pour recueillir le condensat. La procédure consiste à remplir le distillateur avec un échantillon de boue et à chauffer celui-ci jusqu'à ce que le liquide commence à se condenser et à s'écouler dans l'éprouvette graduée. Une fois le test terminé, le volume de condensat recueilli est mesuré, ce qui permet de déterminer la quantité d'eau et d'huile présente dans l'échantillon de boue (voir figure 5.19)..



FIGURE 5.19 – Distillateur de type Fann pour la collecte du condensat.

5.3.4.2 Exploitation des résultats :

Les formules et les calculs sont les suivants :

1. Volume de filtrat (huile + eau) :

$$V_{filtrat} = V_{huile} + V_{eau} \quad (5.4)$$

2. Teneur en solides :

$$Solides(\%) = 100\% - (Huile(\%) + Eau(\%)) \quad (5.5)$$

3. Rapport huile/eau/solides (O/W/S) :

$$O/W/S(\%) = TotalHuile(\%)/TotalEau(\%)/TotalSolide(\%) \quad (5.6)$$

4. Rapport huile/eau (OWR) :

$$OWR(\%) = Huile(\%)/Eau(\%) \quad (5.7)$$

Exemple de calculs avec une formulation MI + 1,5% NP

Le tableau 5.9 résume les résultats des mesures de distillation, en se concentrant principalement sur les volumes de filtrat et les pourcentages des différentes phases présentes dans l'échantillon. Le volume total de filtrat recueilli est de 63 cc. Les pourcentages des différentes composantes sont détaillés comme suit : la phase organique (O%) représente 56%, la phase aqueuse (W%) 7%, et la phase solide (S%) 37%. Ce tableau montre également le ratio combiné des phases organique, aqueuse et solide (O/W/S%) qui est de 56/7/37, ainsi que le rapport OWR (Oil-Water Ratio), indiquant un ratio de 89% d'huile pour 11% d'eau. Ce tableau permet de visualiser rapidement la composition de l'échantillon après distillation, offrant ainsi un aperçu des proportions relatives des différentes phases présentes.

TABLE 5.9 – Tableau de résultat de mesures de distillation

FILTRAT (cc)	63
O%	56
W%	7
S%	37
O/W/S%	56/7/37
OWR%	89/11

Volumes mesurés :

Filtrat : 63 cc

Huile (O%) : 56 %

Eau (W%) : 7 %

Solides (S%) : $100\% - 63\% = 37\%$

Interprétation des résultats :

Les mesures montrent que la boue de forage contient majoritairement de l'huile, suivie d'une proportion moindre d'eau et de solides. Le rapport huile/eau de 89/11 est très proche du rapport théorique de 90/10, ce qui indique que la formulation est bien équilibrée et conforme aux attentes. Cela signifie que la boue de forage possède une forte teneur en huile, ce qui améliore ses propriétés de lubrification et de stabilisation. Les solides, représentant 37 %, contribuent à la densité et à la viscosité de la boue, affectant son comportement lors du forage.

5.3.5 Mesures de la stabilité électrique

La stabilité électrique (ES) d'un fluide de forage à base d'huile est la propriété du matériau liée à la stabilité de son émulsion et à sa capacité de mouillage par l'huile.

Principe de mesure

La stabilité électrique est déterminée en appliquant une tension alternative sinusoïdale croissante de manière continue à travers une paire d'électrodes plates parallèles immergées dans le fluide de forage à base d'huile. Le courant résultant reste très faible jusqu'à ce qu'une tension seuil soit atteinte (voir figure 5.20). À cette tension, une conduction entre les deux électrodes se produit, entraînant une augmentation rapide du courant. Lorsque ce courant atteint 61 microampères, la valeur de la tension de crête à ce point est mesurée et est rapportée comme la valeur (ES) pour le fluide de forage ou autre matériau.



FIGURE 5.20 – Testeur de stabilité électrique model FANN

5.3.5.1 Exploitation des résultats

Le tableau 5.10 présente les résultats mesurés de la stabilité électrique (ES) pour différentes formulations de boue, comparant une formulation de base (MI) à plusieurs formulations enrichies en nanoparticules (NP) avec des concentrations croissantes de 0,5% à 2%. La stabilité électrique est exprimée en volts (Volt), et les valeurs mesurées montrent une tendance à l'augmentation de la stabilité électrique avec l'ajout de nanoparticules.

TABLE 5.10 – Les résultats mesurés de la stabilité électrique

Paramètres de Stabilité Électrique	Unité	Formulation de base Formulation MI + % NP				
		MI	0,5%	1%	1,5	2%
ES	Volt	1300,67	1318,67	1370	1389	1410

La figure 5.21 présente la courbe de la stabilité électrique en fonction des différentes formulations de boue à base d'huile (OBM). Le graphique montre une relation clairement positive entre l'augmentation de la concentration en nanoparticules dans les formulations et l'élévation de la stabilité électrique, mesurée en volts. La stabilité électrique démarre à un niveau relativement bas pour la formulation de base (sans nanoparticules) et augmente de manière significative

avec l'ajout progressif de nanoparticules, atteignant un pic avec la formulation contenant 2% de nanoparticules. Cette tendance indique que l'incorporation de nanoparticules renforce les propriétés électrostatiques de la boue, améliorant sa capacité à résister aux décharges électriques potentielles dans des environnements de forage exigeants [45]. L'augmentation de la stabilité électrique pourrait être attribuée à la capacité des nanoparticules à modifier la structure de la boue, favorisant une meilleure dispersion des charges électriques et réduisant les risques de court-circuit ou de décharge incontrôlée. Ces résultats suggèrent que l'ajout de nanoparticules est une stratégie efficace pour améliorer la performance des boues à base d'huile dans des conditions de forage où une haute stabilité électrique est requise [46].

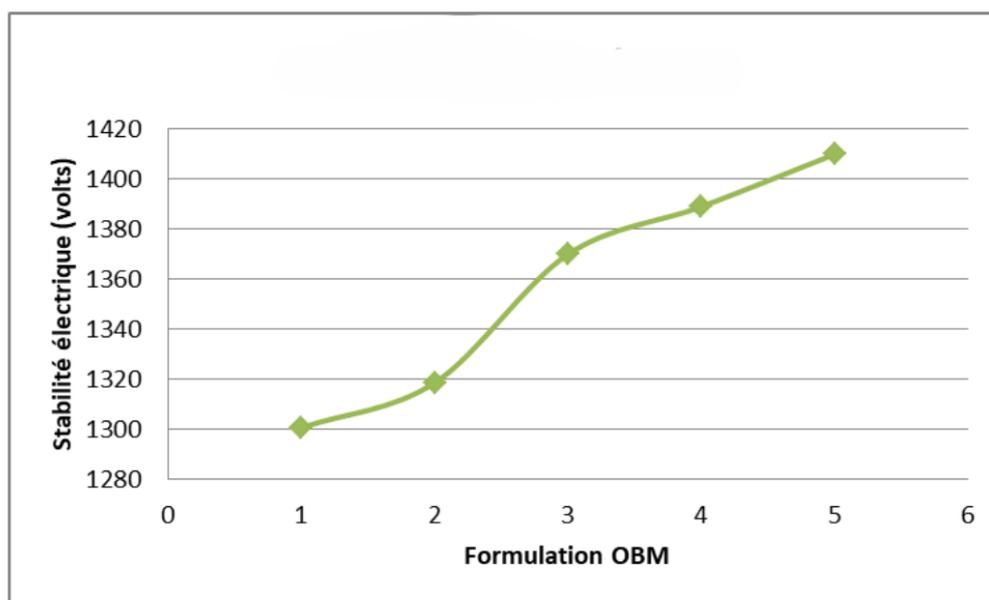


FIGURE 5.21 – La courbe de la stabilité électrique des différentes formulations pour une boue à base d'huile (OBM).

Interprétation des résultats

Formulation MI :

La stabilité électrique (ES) est de 1300,67 volts, ce qui représente la valeur de base pour cette formulation.

Ajout de Nanoparticules (NP) :

L'ajout de 0,5% de NP augmente l'ES à 1318,67 volts. Une augmentation de 1% de NP porte l'ES à 1370 volts. Avec 1,5% de NP, l'ES atteint 1389 volts. Enfin, avec 2% de NP, l'ES monte à 1410 volts.

Synthèse :

La stabilité électrique (ES) augmente régulièrement avec l'ajout de Nanoparticules (NP) à la formulation MI.

L'ajout de NP améliore significativement la stabilité électrique, ce qui pourrait indiquer une meilleure dispersion des particules et une meilleure intégrité structurale de la boue.

Une ES plus élevée indique une meilleure capacité de la boue à maintenir ses propriétés sous les conditions de forage, ce qui est crucial pour éviter les problèmes comme la sédimentation des particules, la perte de fluidité ou l'instabilité des propriétés rhéologiques.

5.3.6 Évaluation de l'Efficacité des Nanoparticules

L'évaluation de l'efficacité des nanoparticules de fer intégrées dans les fluides de forage se focalise sur plusieurs aspects : l'amélioration des propriétés rhéologiques, la réduction des pertes de filtrat, et la stabilité des fluides de forage.

Des tests spécifiques ont été conduits pour quantifier les améliorations apportées par les nanoparticules de fer. Les tests de viscosité et de thixotropie, utilisant des viscosimètres, ont mesuré les variations de ces propriétés avec et sans nanoparticules.

Les tests de filtration ont évalué les pertes de filtrat à travers des tests de filtration dynamique et statique.

Enfin, des tests de stabilité thermique et chimique ont exposé les fluides à des conditions extrêmes pour évaluer leur stabilité et performance.

Les résultats de ces tests montrent une amélioration significative des performances des fluides de forage avec l'intégration des nanoparticules de fer, confirmant leur efficacité pour les applications envisagées.

Les nanoparticules d'oxyde de fer, grâce à leur haute surface spécifique et leurs interactions avec les autres composants du fluide, augmentent la viscosité du fluide, facilitant ainsi le transport des débris. De plus, elles stabilisent la thixotropie, c'est-à-dire la capacité d'un fluide à réduire sa viscosité sous l'effet de cisaillement et à la retrouver au repos, assurant une meilleure suspension des débris lorsque le forage est interrompu.

Les nanoparticules de fer, par leur petite taille et leur capacité à combler les pores de la formation, aident à créer un cake de boue plus dense et moins perméable, réduisant ainsi les pertes de filtrat. Cela permet de minimiser les invasions de filtrat dans la formation, réduisant les dommages à celle-ci et améliorant l'intégrité du puits.

Elles préviennent la dégradation thermique des fluides de forage, offrant une meilleure résistance à la chaleur, ce qui est particulièrement utile dans les forages à haute température.

5.4 Résultats et discussion

5.4.1 Performances des boues à base d'eau

Les boues à base d'eau (WBM) étudiées ont montré des améliorations significatives après l'ajout de nanoparticules d'oxyde de fer. Les tests de viscosité ont révélé une augmentation notable de la viscosité des boues avec des concentrations croissantes de nanoparticules. À 1% et 1,5% de nanoparticules, les formulations ont montré une meilleure résistance au cisaillement à faible vitesse, indiquant une capacité accrue à suspendre les débris lors du forage. En ce qui concerne la filtration, l'ajout de nanoparticules a permis de réduire les pertes de filtrat, avec les formulations contenant 1% et 1,5% de nanoparticules montrant les meilleures performances. La densité des boues est restée stable malgré l'ajout des nanoparticules, ce qui est un avantage pour le contrôle de la pression de forage et la gestion des remontées de boue.

5.4.2 Performances des fluides à base d'huile

Pour les fluides à base d'huile (OBM), l'intégration des nanoparticules d'oxyde de fer a également conduit à des améliorations notables. Les tests ont montré que les formulations contenant des nanoparticules avaient une meilleure stabilité thermique et chimique. Les propriétés rhéologiques se sont améliorées, avec une viscosité accrue et une meilleure capacité de suspension des solides. Les pertes de filtrat ont été réduites grâce à la formation d'un cake de boue moins perméable, ce qui diminue les invasions de filtrat dans la formation. Comme pour les boues à base d'eau, la densité des fluides à base d'huile est restée stable, ce qui est crucial pour maintenir la pression et la stabilité du puits de forage.

5.4.3 Comparaison entre fluides avec et sans Nanoparticules

La comparaison entre les fluides avec et sans nanoparticules a révélé des améliorations significatives dans les propriétés des fluides contenant des nanoparticules. Pour les boues à base d'eau, l'ajout de nanoparticules a entraîné une augmentation de la viscosité et une réduction des pertes de filtrat, tandis que les fluides à base d'huile ont bénéficié d'une meilleure stabilité thermique et chimique, ainsi qu'une réduction des pertes de filtrat. Les tests ont montré que les nanoparticules d'oxyde de fer apportent des bénéfices importants pour les deux types de fluides, bien que les effets soient plus marqués dans les formulations à base d'eau à des concentrations plus élevées. Les améliorations apportées par les nanoparticules confirment leur efficacité pour optimiser les performances des fluides de forage dans des conditions variées.

5.4.4 Analyse des résultats et interprétations

Les résultats obtenus démontrent clairement les avantages des nanoparticules d'oxyde de fer dans les fluides de forage. L'amélioration des propriétés rhéologiques, telles que la viscosité et la résistance au cisaillement, indique que les nanoparticules renforcent la capacité des fluides à transporter les débris et à maintenir une suspension stable. La réduction des pertes de filtrat montre que les nanoparticules contribuent à la formation d'un cake de boue plus dense, ce qui limite les invasions de filtrat et protège la formation géologique. La stabilité thermique et chimique accrue des fluides contenant des nanoparticules est également un avantage significatif, surtout dans des environnements de forage extrêmes.

L'analyse des données révèle que les effets bénéfiques des nanoparticules se stabilisent à des concentrations d'environ 1,5%, au-delà desquelles les améliorations supplémentaires sont marginales. Les résultats soulignent l'importance d'optimiser la concentration de nanoparticules pour maximiser les performances des fluides de forage tout en maintenant un coût opérationnel efficace.

En somme, les nanoparticules d'oxyde de fer se révèlent être un ajout précieux aux formulations de fluides de forage, apportant des améliorations tangibles dans les propriétés et les performances des fluides.

5.5 Conclusion

Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent que l'intégration de nanoparticules d'oxyde de fer dans les fluides de forage apporte des améliorations significatives dans plusieurs domaines clés. Pour les boues à base d'eau (WBM), l'ajout de nanoparticules a conduit à une augmentation notable de la viscosité et de la résistance au cisaillement, offrant ainsi une meilleure suspension des débris et une réduction des pertes de filtrat. De plus, la stabilité thermique et chimique des fluides a été renforcée, ce qui est crucial pour des conditions de forage extrêmes. Pour les fluides à base d'huile (OBM), les nanoparticules ont amélioré la stabilité thermique et chimique, ainsi que la réduction des pertes de filtrat, ce qui permet une gestion plus efficace des fluides en environnement complexe.

L'intégration des nanoparticules d'oxyde de fer dans les fluides de forage présente des avantages considérables pour l'industrie pétrolière et gazière. Les améliorations des propriétés rhéologiques et de filtration contribuent à une meilleure performance des opérations de forage, en réduisant les risques de défaillance des fluides et en optimisant les conditions de forage. La capacité des nanoparticules à maintenir une densité stable et à améliorer la résistance à la chaleur et aux produits chimiques est particulièrement bénéfique pour les forages dans des environnements de haute température et haute pression. Ces améliorations peuvent entraîner des réductions significatives des coûts d'exploitation et une diminution des impacts environnementaux associés aux fluides de forage.

Les travaux futurs pourraient se concentrer sur plusieurs axes pour approfondir les connaissances et maximiser les avantages des nanoparticules d'oxyde de fer dans les fluides de forage. Il serait pertinent d'explorer davantage l'optimisation des concentrations de nanoparticules et de tester leur effet dans une gamme plus large de conditions de forage. De plus, l'étude de la durabilité à long terme des fluides de forage contenant des nanoparticules, ainsi que leur impact environnemental, devrait être une priorité. Enfin, des recherches sur la fonctionnalisation des nanoparticules pour répondre à des besoins spécifiques de l'industrie pourraient ouvrir de nouvelles perspectives pour l'amélioration des fluides de forage et la gestion des ressources pétrolières et gazières.

Chapitre 6

Plan Financier : Analyse des Coûts

6.1 Introduction

L'analyse des coûts est une étape nécessaire pour toute entreprise cherchant à assurer la viabilité économique de son projet. Dans le cadre de la production de nanoparticules d'oxyde de fer, cette analyse permet non seulement de comprendre les dépenses liées à chaque étape du processus de fabrication, mais aussi de projeter la rentabilité potentielle de l'activité. Ce chapitre vise à détailler les coûts initiaux et récurrents, tout en identifiant les leviers d'optimisation qui permettront à terme de maximiser les marges bénéficiaires. L'objectif est d'offrir une vision claire et précise des dépenses à prévoir, de la rentabilité à court et à long terme, ainsi que des investissements nécessaires pour assurer une production continue et compétitive.

6.2 Analyse des Coûts

Cette étape est essentielle pour évaluer la viabilité économique de la production de nanoparticules d'oxyde de fer, destinées à des applications dans le secteur pétrolier, notamment dans les fluides de forage. Cette section décrira en détail les différents coûts liés à cette production, tels que les coûts des matériaux et réactifs, les coûts de la main-d'œuvre et de l'énergie, ainsi que les coûts d'amortissement des équipements (voir le tableau 6.1).

1. **Coûts des Matériaux et Réactifs** : Les coûts des matériaux et réactifs représentent une part significative des dépenses totales dans la production des nanoparticules de fer. Ces coûts incluent les matières premières nécessaires pour la fabrication ainsi que les réactifs chimiques utilisés dans le processus de synthèse.
2. **Coûts de la main-d'œuvre et de l'énergie** : Les coûts de la main-d'œuvre et de l'énergie couvrent les salaires des employés, les charges sociales, ainsi que les dépenses énergétiques liées à l'utilisation des équipements de production. Ces coûts sont essentiels pour le bon fonctionnement des installations de production et la maintenance des processus opérationnels (tableau 6.1).

TABLE 6.1 – Les coûts et les charges de la startup au cours de la première année.

Rubrique	Coût (DA)
Frais d'établissement	500 000,00
Equipements de production	345 185,00
Frais d'installation	150 000,00
Frais de transport	150 000,00
Aménagements et maintenance	100 000,00
Matière première (100kg)	12 520 000,00
Emballage	115 000,00
Personnel	3 600 000,00
Assurances	30 000,00
Matériel et mobilier de bureau	200 000,00
Matériels informatiques	300 000,00
Logiciel, Licences, . . .	40 000,00
Immobilisations Incorporelles	30 000,00
Site web	100 000,00
TOTAL	18 180 185,00

3. **Coûts d'Amortissement des Équipements** : Les coûts d'amortissement des équipements comprennent la dépréciation des machines et des outils employés dans la production des nanoparticules d'oxyde de fer. Cet amortissement est calculé sur la durée de vie utile estimée des équipements, permettant ainsi de répartir leur coût d'acquisition sur plusieurs années d'exploitation. Cette méthode reflète plus fidèlement la valeur économique des équipements au fil du temps et permet une allocation plus précise des coûts sur la période durant laquelle ces actifs contribuent à la production.

Le tableau 6.2 présente une ventilation détaillée des dépenses associées à l'implantation et à l'exploitation d'une unité de production de nanoparticules de fer. Cette analyse financière offre un aperçu précis des investissements initiaux et des coûts opérationnels récurrents essentiels à la mise en place et au fonctionnement optimal de l'unité de production. Cette répartition permet une compréhension approfondie de la structure des coûts, facilitant ainsi la planification budgétaire et l'évaluation de la viabilité économique du projet à long terme.

TABLE 6.2 – Les investissements amortissables de la startup sur une période de cinq ans.

Désignation	Dotation		
	Année 1 (DZD)	Durée (année)	Montant (DZD)
Equipements de production	345 185,00	5	69 037,00
Matériel et mobilier de bureau	200 000,00	5	40 000,00
Matériels informatiques	300 000,00	4	75 000,00
TOTAL	845 100,00		184 037,00

Justification des coûts fixes :

Les coûts fixes de l'unité de production constituent un élément fondamental pour établir une assise solide, essentielle au lancement et à la pérennité opérationnelle de la startup. Ces investissements englobent un large éventail de dépenses nécessaires à la mise en place de l'infrastructure, à l'acquisition des ressources indispensables, ainsi qu'à la protection des droits et des activités de l'entreprise (voir tableau 6.3). Cette base financière permet non seulement d'assurer le démarrage optimal des opérations, mais aussi de garantir une stabilité à long terme, facilitant ainsi la croissance et le développement de l'entreprise dans un environnement compétitif.

Les immobilisations incorporelles : comprennent l'acquisition de brevets, licences, et droits d'exploitation, garantissant une protection juridique et un usage exclusif des technologies développées.

Les frais d'établissement : couvrent les coûts initiaux liés à la création de l'entreprise, incluant les frais juridiques, comptables, et administratifs indispensables pour lancer légalement les activités.

Le poste logiciel et licences : inclut l'achat de logiciels de gestion, comptabilité, et traitement des données, essentiels pour le bon fonctionnement de l'unité. Les équipements de production correspondent à l'achat de machines, réacteurs, et autres dispositifs nécessaires pour la fabrication des nanoparticules d'oxyde de fer, tandis que **les frais d'installation** couvrent l'installation et l'optimisation de ces équipements.

Les frais de transport : concernent la logistique, l'assurance, et le transport des équipements et matières premières, tandis que **les aménagements** comprennent l'adaptation des locaux pour répondre aux besoins de production.

Le matériel et mobilier de bureau et les matériels informatiques : sont nécessaires pour créer un environnement de travail fonctionnel, avec des équipements de bureau et informatiques adaptés.

Les assurances : protègent l'entreprise contre divers risques. Enfin, **le site web** offre une vitrine en ligne pour l'entreprise, essentielle pour attirer clients et partenaires.

TABLE 6.3 – Coût des équipements de production de nanoparticules

N°	Désignation	Unité	Qtte	Prix unitaire(DZD)	Montant (DZD)
01	Verrerie			TOTAL	72900
02	Agitateur magnétique	Un	1	20250	20250
03	Distillateur	Un	1	54000	54000
04	Balance	Un	1	20250	20250
05	pH mètre	Un	1	13500	13500
06	Centrifugeuse	Un	1	81000	81000
07	Etuve	Un	1	81000	81000
08	Aimants	Un	4	200	800
09	Spatules	Un	3	270	810
10	Cuillères	Un	3	225	675
				TOTAL	345 185,00

Justification des coûts variables :

Selon le tableau 6.4, le montant total représente l'investissement dans les matières premières essentielles à la production des nanoparticules d'oxyde de fer. Il englobe l'acquisition de composés chimiques spécifiques, de solvants de haute pureté, et d'autres matériaux indispensables au processus de synthèse des nanoparticules. Le coût substantiel des matières premières s'explique par la nature hautement spécialisée et la qualité exigée des produits chimiques nécessaires à la synthèse des nanoparticules d'oxyde de fer. Ces composants doivent répondre à des critères de pureté et de réactivité stricts pour garantir la qualité et les propriétés désirées des nanoparticules produites.

Le coût des matières premières est en corrélation directe avec la quantité de nanoparticules produites. Les prix élevés des produits chimiques tels que l'ammoniaque, l'eau distillée et les sels de fer s'expliquent par leur haut degré de pureté et les volumes importants requis pour la synthèse. La production de 100 kg de nanoparticules nécessite un investissement total de 12520000,00 DZD en matières premières. Ce coût substantiel se justifie par les quantités significatives et la nature spécifique des réactifs chimiques indispensables pour garantir la qualité optimale du produit final. Cette exigence en termes de qualité et de quantité des intrants est essentielle pour assurer la conformité et les propriétés désirées des nanoparticules d'oxyde de fer produites, répondant ainsi aux standards élevés de l'industrie et aux applications visées.

TABLE 6.4 – Coût de production de 100g des nanoparticules

N°	Désignation	Unité	Qté	Prix unitaire(DZD)	Montant (DZD)
MATIERE PREMIERE					
01	Ammoniaque 30% (NH3)liquide	L	2	2160	4320
02	Eau distillée	L	15	30	450
03	Chlorure de fer hexahydraté	g	250	3950	3950
04	Sulfate ferreux ammoniacal	g	250	3800	3800
TOTAL					12 520,00

6.3 Analyse de la Rentabilité

L'analyse de la rentabilité est essentielle pour évaluer l'efficacité économique et la viabilité financière de la production des nanoparticules d'oxyde de fer. Cette section présentera une étude approfondie englobant les projections détaillées du chiffre d'affaires basées sur des analyses de marché rigoureuses, les estimations de ventes segmentées par marchés cibles en tenant compte des tendances sectorielles et des potentiels de croissance, une analyse des marges bénéficiaires intégrant tous les coûts, ainsi que le calcul du retour sur investissement (ROI : retour sur investissement).. Cette évaluation exhaustive offrira un tableau complet de la rentabilité potentielle du projet, fournissant ainsi une base solide pour la prise de décisions stratégiques concernant la production et la commercialisation des nanoparticules d'oxyde de fer.

6.3.1 Chiffre d'Affaires Prévisionnel

Le tableau 6.5 présente les prévisions financières pour la première année, étant donné que, la production annuelle est estimée à 100 kg, correspondant également à la quantité d'unités vendues. Le prix unitaire est fixé à 200 000 DA par kilogramme, ce qui génère un chiffre d'affaires annuel prévisionnel de 20 000 000 DA. Ces données reflètent un scénario où la totalité de la production est écoulee sur le marché, permettant d'estimer la performance financière de l'entreprise pour sa première année d'activité.

TABLE 6.5 – Prévision du chiffre d'affaires de la startup pour la première année.

Production annuelle des NP (Kg)	100
Unités annuelles vendues (Kg)	100
Prix unitaire (DA/Kg)	200 000,00
Chiffre d'affaires annuel (DA)	20 000 000,00

6.3.1.1 Estimation des Ventes sur le Marché Pétrolier et Gazier

L'industrie pétrolière et gazière représente un marché potentiel pour les nanoparticules d'oxyde de fer, utilisées principalement pour améliorer les propriétés des fluides de forage. L'estimation des ventes dans ce secteur se base sur la demande croissante de solutions innovantes et efficaces.

6.3.1.2 Estimation des Ventes sur les autres marchés

Les nanoparticules d'oxyde de fer trouvent également des applications diversifiées dans des secteurs de pointe tels que les technologies de l'information, la médecine, l'industrie chimique, les matériaux avancés et l'électronique. Dans ces domaines, elles sont utilisées pour développer des revêtements innovants, des capteurs haute performance et d'autres technologies de pointe. L'estimation des ventes sur ces marchés s'appuie sur la tendance croissante à l'intégration de nanomatériaux dans la conception de produits et de matériaux aux propriétés exceptionnelles. Cette adoption grandissante des nanoparticules d'oxyde de fer dans une multitude de produits et de technologies innovantes laisse présager une expansion significative des marchés. Cette diversification offre des perspectives de croissance considérables au-delà du secteur pétrolier et gazier, ouvrant ainsi de nouvelles opportunités commerciales et stimulant l'innovation dans de nombreux domaines industriels. L'adaptabilité et les propriétés uniques de ces nanoparticules en font un matériau clé pour le développement de solutions technologiques futures, promettant un potentiel de marché en constante évolution et expansion.

6.3.2 Analyse des Marges Bénéficiaires

6.3.2.1 Calcul de la Marge Brute

La marge brute constitue un indicateur financier essentiel pour évaluer la rentabilité d'une entreprise avant la prise en compte des frais généraux, des charges financières et des impôts. Elle reflète la capacité de l'entreprise à générer des bénéfices à partir de ses ventes, en ne considérant que les coûts directement liés à la production ou à l'achat des biens vendus. Cette mesure permet d'apprécier l'efficacité opérationnelle de base et la compétitivité des prix de l'entreprise sur son marché. Une marge brute solide indique généralement une bonne maîtrise des coûts de production et une stratégie de tarification efficace, offrant ainsi une base financière robuste pour couvrir les autres dépenses opérationnelles et générer un bénéfice net.

Elle se calcule comme suit :

$$\text{Marge brute (DA)} = \text{Chiffre d'affaires annuel (DA)} - \text{Coûts de production (DA)} \quad (6.1)$$

6.3.2.2 Calcul de la Marge Nette

La marge nette prend en compte tous les coûts d'exploitation, les taxes et les frais financiers. Elle donne une indication claire de la rentabilité après toutes les dépenses. La marge nette se calcule selon la formule suivante :

$$\text{Marge nette (DA)} = \text{Chiffre d'affaires} - (\text{Coût de production} + \text{Coûts d'exploitation} + \text{Impôts}) \quad (6.2)$$

Le tableau 6.6 présente l'évolution des principaux indicateurs financiers sur trois ans. Il permet d'évaluer la rentabilité du projet en calculant la marge brute et la marge nette sur les trois premières années. La marge brute reflète la capacité de l'entreprise à générer un bénéfice avant les charges fixes. Quant à la marge nette, elle indique le pourcentage de bénéfice réalisé après toutes les charges et impôts. Ces indicateurs montrent une rentabilité croissante de l'entreprise.

TABLE 6.6 – Analyse de la rentabilité de la startup au cours des trois premières années.

Chiffres En DZD	Année 1	Année 2	Année 3
Chiffre d'affaires (DA)	20 000 000,00	22 000 000,00	24 200 000,00
Coût de production	12 520 000,00	13 772 000,00	15 149 200,00
Marge brute	7 480 000,00	8 228 000,00	9 050 800,00
Personnel	3 600 000,00	3 600 000,00	3 600 000,00
Loyer	500 000,00	500 000,00	500 000,00
Charges électricité, gaz, eau	90 000,00	99 000,00	109 000,00
Maintenance	60 000,00	60 000,00	60 000,00
Frais de transport	150 000,00	150 000,00	150 000,00
Frais d'installation	150 000,00	/	/
Frais administratifs	100 000,00	100 000,00	100 000,00
Site web	100 000,00	/	/
Excédent brut d'exploitation (EBE)	2 730 000,00	3 719 000,00	4 531 800,00
Dotation aux amortissements	184 037,00	184 037,00	184 037,00
Résultats avant impôt (RAI)	2 545 963,00	3 534 963,00	4 347 763,00
Impôt sur le bénéfice des sociétés (IBS-19%)	483 733,97	671 642,97	826 074,97
Résultat net	2 062 229,03	2 863 320,03	3 521 688,03

6.3.3 Retour sur Investissement (ROI)

Le retour sur investissement est un indicateur essentiel pour mesurer l'efficacité de l'investissement initial par rapport aux bénéfices générés.

6.3.3.1 Méthodologie de Calcul du ROI

Le ROI se calcule en comparant le gain net de l'investissement au coût de l'investissement. La formule est la suivante :

$$ROI(\%) = \frac{\text{Chiffre d'affaires} - \text{Total des coûts}}{\text{Total des coûts}} * 100 \quad (6.3)$$

6.3.3.2 Résultats et Interprétation

L'analyse du retour sur investissement (ROI) de la startup pour sa première année d'activité, présentée dans le tableau 6.7, révèle des résultats financiers encourageants. Avec un chiffre d'affaires de 20 000 000,00 et des coûts totaux de 18 180 185,00, l'entreprise a dégagé un bénéfice brut de 1 819 815,00.

Les résultats indiquent un ROI (Retour sur Investissement) de 10,01% pour la première année. Ce chiffre signifie que pour chaque dinar algérien investi dans la production de nanoparticules d'oxyde de fer, la startup génère un retour net de 10,01% (voir le tableau 6.7). Ce ROI démontre que le projet est capable de générer un profit dès la première année d'exploitation, ce qui est particulièrement encourageant pour un projet dans le secteur émergent des nanotechnologies en Algérie. Un ROI de 10% reflète une bonne maîtrise des coûts et une marge bénéficiaire satisfaisante. Cette performance financière suggère que la startup est sur la bonne voie pour atteindre ses objectifs de rentabilité et de croissance à long terme, dans un marché où l'innovation et l'efficacité sont des facteurs clés de succès.

TABLE 6.7 – Analyse du retour sur investissement de la startup pour la première année.

Chiffre d'affaires	20 000 000,00
Total des coûts	18 180 185,00
CA-CT	1 819 815,00
ROI	10,01%

6.3.4 Potentiel de Croissance

Le potentiel de croissance est une estimation de l'augmentation future du chiffre d'affaires basée sur des prévisions de marché :

TABLE 6.8 – Prévisions financières de la startup pour les quatre premières années.

Rubriques	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4
Chiffre d'affaires (DA)	20 000 000,00	22 000 000,00	24 200 000,00	27 830 000,00
Évolution	/	10%	10%	15%

Selon le tableau 6.8, le bilan prévisionnel montre une croissance progressive du chiffre d'affaires sur quatre ans, avec des taux d'évolution anticipés de 10% pour les années 2 et 3, puis une accélération à 15% en année 4. Ces projections témoignent d'une augmentation constante de la demande pour les nanoparticules d'oxyde de fer, en lien avec une expansion prévue sur de nouveaux marchés et une consolidation de la présence de l'entreprise dans le secteur. L'analyse des taux d'évolution révèle une stratégie de croissance prudente au départ, avec une augmentation modérée du chiffre d'affaires dans les premières années pour garantir une gestion efficace des ressources et une adaptation aux conditions du marché. Cette stratégie évolue ensuite vers une croissance plus rapide à partir de la quatrième année, reflétant la montée en puissance des opérations de l'entreprise, l'acquisition de nouvelles parts de marché, et l'intégration potentielle de nouveaux clients ou segments de marché. Ces prévisions de croissance, basées sur une augmentation progressive et soutenue du chiffre d'affaires, illustrent un potentiel de développement significatif pour l'entreprise.

6.4 Analyse Financière

6.4.1 Plan de Financement

6.4.1.1 Sources de Financement

Le plan de financement de notre projet repose sur plusieurs sources :

1. **Investisseurs Privés** : Nous prévoyons de solliciter des investisseurs privés intéressés par les technologies innovantes et les solutions durables pour le secteur pétrolier et gazier.
2. **Prêts Bancaires** : Des prêts à taux préférentiels peuvent être obtenus auprès des institutions financières locales pour couvrir les coûts initiaux d'installation et de production.
3. **Subventions gouvernementales** : Nous envisageons de demander des subventions disponibles pour les projets innovants et écologiques, notamment ceux offerts par le gouvernement algérien et les organismes internationaux.

6.4.1.2 Besoins de Financement à Court et Long Terme

Pour couvrir les besoins de financement à court terme, nous nous concentrons sur les coûts immédiats tels que les matières premières, les salaires, et les frais d'installation. À long terme, les investissements seront nécessaires pour l'expansion de la production, la recherche et développement (R&D), et l'amélioration des processus.

À court terme :

- Frais d'établissement : 500 000,00 DA
- Équipements de production : 345 185,00 DA
- Frais de transport : 150 000,00 DA
- Matière première : 12 520 000,00 DA

À long terme :

- Développement de nouvelles technologies
- Expansion de la capacité de production
- Partenariats internationaux

6.4.2 Prévisions Financières**6.4.2.1 Prévisions de Trésorerie**

Les prévisions de trésorerie permettent de gérer les flux financiers et de s'assurer que l'entreprise dispose de liquidités suffisantes pour ses opérations quotidiennes. Ces prévisions prennent en compte les recettes et les dépenses au cours de chaque trimestre afin de maintenir un solde de trésorerie positif (voir tableau 6.9).

TABLE 6.9 – Prévisions de flux de trésorerie de la startup pour la première année.

Période	Recettes (DA)	Dépenses (DA)	Solde de Trésorerie (DA)
1er trimestre	5 000 000,00	3 757 407,50	1 242 592,50
2ème trimestre	5 000 000,00	3 757 407,50	1 242 592,50
3ème trimestre	5 000 000,00	3 757 407,50	1 242 592,50
4ème trimestre	5 000 000,00	3 757 407,50	1 242 592,50

6.4.2.2 Prévisions des bénéfices

Les prévisions des résultats montrent les bénéfices attendus sur une période donnée, en prenant en compte les recettes et les dépenses. Elles permettent d'estimer la rentabilité future de l'entreprise.

Le solde de trésorerie reste positif chaque trimestre, garantissant ainsi que l'entreprise dispose de suffisamment de liquidités pour couvrir ses dépenses opérationnelles. Par ailleurs, le bénéfice net augmente également de manière soutenue, passant de 4 970 370,00 DA la première année à 6 916 269,825 DA la quatrième année, reflétant une amélioration progressive de la rentabilité de l'entreprise. Cette progression indique que l'entreprise est bien positionnée pour atteindre une rentabilité accrue au fil du temps, renforçant ainsi sa stabilité financière.

TABLE 6.10 – Préviation du chiffre d'affaires, des coûts et des bénéfices de la startup au cours des quatre premières années.

Année	Chiffre d'affaires (DA)	Coûts (DA)	Bénéfice net (DA)
Année 1	20 000 000,00	15 029 630,00	4 970 370,00
Année 2	22 000 000,00	16 532 593,00	5 467 407,00
Année 3	24 200 000,00	18 185 852,30	6 014 147,70
Année 4	27 830 000,00	20 913 730,145	6 916 269,825

6.4.3 Analyse de Sensibilité

6.4.3.1 Impact des variables clés sur la rentabilité

L'analyse de sensibilité permet d'évaluer l'impact des différentes variables sur la rentabilité du projet. Ces variables clés incluent :

- **Prix des matières premières** : Une augmentation des prix peut réduire les marges bénéficiaires.
- **Demande du marché** : Une baisse de la demande peut affecter les ventes et le chiffre d'affaires.
- **Coûts de production** : Des coûts de production élevés peuvent réduire les bénéfices.

6.4.3.2 Scénarios Optimistes, Pessimistes et Réalistes

Pour anticiper les différents résultats possibles, nous avons élaboré trois scénarios financiers basés sur les fluctuations du marché et les variations des coûts de production (voir tableau 6.11) :

- **Scénario Optimiste** : Le marché connaît une forte demande, et les coûts de production diminuent grâce à des avancées technologiques, augmentant ainsi la rentabilité.
- **Scénario Réaliste** : Le marché évolue conformément aux prévisions avec une croissance modérée, des coûts stables, et une rentabilité satisfaisante.
- **Scénario pessimiste** : La demande est plus faible que prévu, et les coûts de production augmentent en raison de la hausse des prix des matières premières, ce qui réduit la rentabilité.

Ces analyses permettent de mieux comprendre les risques et les opportunités. Le scénario optimiste montre une forte rentabilité avec un bénéfice net élevé, tandis que le scénario réaliste reflète une rentabilité stable conforme aux attentes. Le scénario pessimiste met en lumière les défis potentiels liés à une demande plus faible et à une augmentation des coûts, ce qui souligne l'importance d'une gestion rigoureuse des coûts et d'une adaptation rapide aux conditions du marché.

TABLE 6.11 – Scénarios envisageables pour la startup.

Scénario	Chiffre d'affaires (DA)	Coûts (DA)	Bénéfice net (DA)
Optimiste	27 830 000,00	15 000 000,00	12 830 000,00
Réaliste	24 200 000,00	15 149 200,00	9 050 800,00
Pessimiste	20 000 000,00	15 300 000,00	4 700 000,00

6.5 Étude de Marché

6.5.1 Analyse de la Demande

6.5.1.1 Segmentation du Marché

La segmentation du marché pour les nanoparticules de fer permet de cibler les différents secteurs d'application et de comprendre les besoins spécifiques de chaque segment. Les principaux segments incluent :

1. **Secteur pétrolier et gazier** : Utilisation des nanoparticules de fer dans les fluides de forage pour améliorer les propriétés rhéologiques et la réduction des pertes de fluides. Ce segment représente la part la plus significative de la demande en raison des avantages opérationnels et économiques apportés par ces nanoparticules.
2. **Matériaux et Électronique** : Application des nanoparticules dans les revêtements, capteurs, et autres technologies avancées. La demande est en croissance en raison de l'intégration croissante de nanomatériaux dans les produits électroniques et les matériaux de haute performance.
3. **Technologies de l'information** : Utilisation des nanoparticules de fer dans le stockage de données et les dispositifs de mémoire avancés. Ce segment est en expansion avec les progrès technologiques.
4. **Médecine** : Applications dans l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et la thérapie ciblée. Ce segment est en développement, offrant des perspectives de croissance à moyen et long terme.
5. **Industrie chimique** : Utilisation des nanoparticules de fer pour leurs propriétés catalytiques dans divers procédés chimiques.

6.5.1.2 Tendances et Perspectives de Croissance

Les tendances actuelles montrent une demande croissante pour les nanoparticules d'oxyde de fer, stimulées par les avantages technologiques et économiques qu'elles offrent. Les perspectives de croissance sont favorables grâce à :

1. **L'innovation technologique** : Les avancées continues dans le domaine des nanotechnologies ouvrent de nouvelles possibilités d'applications et d'amélioration des produits existants.

2. **L'augmentation de la demande dans le secteur énergétique** : Les besoins en fluides de forage plus efficaces et durables dans l'industrie pétrolière et gazière.
3. **La montée en puissance des applications médicales** : L'acceptation et l'adoption croissantes des nanoparticules dans le domaine médical pour des diagnostics et des traitements plus précis.
4. **L'expansion dans les marchés émergents** : Les économies émergentes adoptent de plus en plus les technologies avancées, y compris les nanotechnologies, ce qui offre de nouvelles opportunités de marché.

6.5.2 Analyse de la Concurrence

6.5.2.1 Principaux Acteurs du Marché

L'analyse de la concurrence identifie les principaux acteurs internationaux du marché des nanoparticules d'oxyde de fer :

- **Nanoiron** : Une entreprise leader dans la production de nanoparticules d'oxyde de fer pour des applications environnementales et industrielles.
- **Strem Chemicals** : Spécialisée dans les produits chimiques de haute pureté, y compris les nanoparticules d'oxyde de fer, pour divers secteurs industriels.
- **American Elements** : Fournisseur mondial de nanoparticules et de matériaux avancés pour les industries technologiques et scientifiques.
- **SkySpring Nanomaterials** : Fabricant et distributeur de nanoparticules pour les secteurs de l'énergie, de la médecine, et des matériaux.

6.5.2.2 Forces et Faiblesses des Concurrents

L'évaluation des forces et faiblesses des concurrents permet de mieux comprendre leur positionnement sur le marché et d'identifier les opportunités pour se différencier. **Nanoiron** se distingue par son expertise en applications environnementales et sa forte présence sur le marché européen, mais sa faiblesse réside dans une moindre diversification des applications industrielles et médicales. **Strem Chemicals** bénéficie de la haute pureté de ses produits et d'un large portefeuille de clients industriels, mais ses prix relativement élevés et sa dépendance à certains segments de marché représentent des faiblesses. **American Elements** possède un réseau de distribution mondial et une vaste gamme de nanoparticules et de matériaux avancés, cependant, elle fait face à une forte concurrence sur les prix et à des défis logistiques dans certaines régions. **SkySpring Nanomaterials** est reconnu pour ses innovations constantes et son service client réactif, mais sa capacité de production limitée et sa présence restreinte dans certains marchés émergents constituent des points faibles.

6.5.2.3 Concurrence Locale en Algérie

En Algérie, plusieurs entreprises et laboratoires de recherche se concentrent sur la production et la valorisation des nanoparticules de fer :

- **Université d'El Oued** : a publié un article sur la "Mise en œuvre et valorisation de nanoparticules d'oxyde de fer". Cette recherche suggère que l'université est active dans le domaine des nanoparticules de fer, explorant leur mise en œuvre et leur valorisation.

- **Université de Blida** : a publié un article intitulé "Élaboration et caractérisation des nanoparticules d'oxyde Bi-Fe par la méthode de Co-précipitation". Cette recherche indique que le laboratoire est impliqué dans la synthèse de nanoparticules composites à base de fer, ce qui démontre un potentiel concurrent local dans le domaine des nanoparticules.

L'analyse de ces acteurs locaux montre que la recherche en Algérie est dynamique, avec un potentiel d'innovation et de développement significatif dans le domaine des nanoparticules de fer. Cependant, cela représente également une opportunité pour collaborer et tirer parti des avancées locales pour renforcer la position sur le marché national.

En comprenant ces dynamiques concurrentielles, notre stratégie peut être affinée pour exploiter les faiblesses des concurrents et capitaliser sur nos propres forces, telles que l'utilisation de ressources locales, la réduction de l'impact environnemental et l'innovation technologique.

6.6 Conclusion

En conclusion, l'analyse des coûts réalisée dans ce chapitre a permis d'identifier et de détailler les principaux postes de dépenses associés à la production des nanoparticules d'oxyde de fer. Cette étude approfondie des coûts des matériaux, de la main-d'œuvre, de l'énergie et de l'amortissement des équipements met en lumière les investissements nécessaires pour assurer le succès du projet. En parallèle, l'analyse de rentabilité et les projections financières fournissent une vision claire de la performance attendue, démontrant le potentiel économique de cette production innovante.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études aborde la problématique de l'optimisation d'un fluide de forage intelligent, composé principalement de nanoparticules synthétiques de fer, avec l'ajout d'autres ingrédients dont chacun joue un rôle bien déterminé. Ce fluide de forage optimisé est le résultat d'une sélection judicieuse des conditions opératoires en laboratoire, visant à ajuster certains paramètres influençant les propriétés d'un fluide de forage, plus particulièrement la viscosité et le seuil d'écoulement (yield point) de ces fluides. Il existe un consensus généralement admis indiquant que le fluide de forage est probablement la variable la plus importante à considérer dans le processus d'optimisation, les aspects hydrauliques venant toujours en seconde position.

La sélection du fluide de forage repose sur sa capacité à forer efficacement les formations géologiques tout en assurant le nettoyage et la stabilisation du puits. Cette sélection s'appuie principalement sur les propriétés rhéologiques du fluide, notamment sa viscosité et son seuil d'écoulement.

De plus, il faut prendre en compte la complexité et la variabilité de la géologie de la zone à forer. Ces facteurs combinés déterminent l'efficacité et la performance du fluide de forage dans des conditions géologiques spécifiques.

Les nanoparticules d'oxyde de fer synthétiques jouent un rôle crucial dans l'optimisation des fluides de forage intelligents. Leur intégration permet d'améliorer significativement les propriétés rhéologiques du fluide, notamment la viscosité et le seuil d'écoulement, essentiels pour le nettoyage et la stabilisation du puits. Grâce à leur taille nanométrique, ces particules offrent une surface spécifique élevée, favorisant une meilleure interaction avec les autres composants du fluide et les formations géologiques. Cette caractéristique permet un contrôle plus précis des propriétés du fluide, adaptable aux conditions variables rencontrées lors du forage.

De plus, les nanoparticules d'oxyde de fer peuvent contribuer à réduire la friction entre le fluide et les parois du puits, améliorant ainsi l'efficacité du forage. Leur capacité à former des structures temporaires sous l'effet de champs magnétiques offre également des possibilités innovantes pour le contrôle dynamique des propriétés du fluide pendant les opérations de forage.

Notre contribution dans ce domaine a été double, se concentrant principalement sur la fabrication de nanoparticules d'oxyde de fer synthétiques. Le processus de synthèse que nous avons développé comprend plusieurs étapes cruciales : la préparation méticuleuse des réactifs, suivie de la coprécipitation et de la formation des nanoparticules, puis des procédés de centrifugation, de lavage et enfin de séchage. Cette approche méthodique nous a permis d'obtenir des nanoparticules de haute qualité.

Ces nanoparticules ont été obtenues avec des paramètres de pH compris entre 10 et 12, à température ambiante. Le rapport molaire entre le chlorure de fer hexahydraté ($\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) et le sulfate ferreux ammoniacal ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) a été maintenu à 1 :3, avec une vitesse d'agitation de 500 tr/min. Concernant les formulations des fluides de forage à base d'huile avec les nanoparticules d'oxyde de fer, il a été constaté que l'ajout de différentes concentrations de

nanoparticules (NP), à savoir 0,5%, 1%, 1,5% et 2%, avait un impact. Les concentrations entre 1% et 1,5% de NP ont permis une augmentation de la contrainte seuil, surtout pour les vitesses de cisaillement dépassant 600 s⁻¹.

Pour les fluides de forage à base d'eau, l'optimum de ces formulations a été atteint lorsqu'on a ajouté XG (xanthane) + NP, atteignant une contrainte seuil dépassant 70 lb/100 ft², comparativement à un fluide de forage optimal de la société DFSP.

Dans le cadre des essais de filtration, l'incorporation de nanoparticules dans les formulations de boues à base d'huile (OBM) a démontré une efficacité remarquable en réduisant significativement le volume de filtrat HPHT. Les résultats optimaux ont été obtenus avec une concentration de 1,5% de nanoparticules, permettant de diminuer le volume de filtrat à environ 2,8 cc. Ce volume minimal s'avère crucial pour atténuer les problèmes de filtration des fluides et limiter l'infiltration des particules fines dans les formations géologiques environnantes du puits pétrolier. Cette amélioration notable des propriétés de filtration souligne l'importance des nanoparticules dans l'optimisation des performances des fluides de forage, contribuant ainsi à une meilleure efficacité et stabilité des opérations de forage pétrolier. Il est important de noter que l'épaisseur du cake formé diminue considérablement pour les formulations OBM contenant 1% et 1,5% de nanoparticules (NP), atteignant respectivement des valeurs d'environ 0,025 et 0,035 inch. Cette réduction significative de l'épaisseur du cake de boue témoigne d'une amélioration notable de l'efficacité de filtration.

Ces résultats mettent en évidence l'impact positif des nanoparticules sur la formation et les propriétés du cake de boue, un aspect crucial dans le contexte des fluides de forage. L'optimisation de ces paramètres contribue à une meilleure performance globale du processus de forage, en minimisant les risques liés à une filtration excessive et en améliorant la stabilité du puits.

Pour les formulations à base d'eau (WBM), l'ajout de nanoparticules et de xanthane réduit significativement le volume de filtrat, passant de 5 cc pour la formulation de base à 4,4 cc pour la formulation enrichie, comparée à la formulation optimale de la société DFSP. De plus, l'épaisseur du gâteau de boue est considérablement réduite dans la formulation enrichie avec le xanthane et les nanoparticules (NP), passant de 0,06 inch pour la formulation de base de la société DFSP à environ 0,03 inch pour celle contenant du xanthane (XG) et des NP.

La densité, facteur crucial dans l'ajustement des caractéristiques des fluides de forage pour assurer la stabilité des puits pétroliers, varie significativement selon la composition du fluide. La formulation OBM (Oil-Based Mud) de base MI, sans nanoparticules, affiche la densité la plus élevée à environ 1,39 g/cm³. L'incorporation progressive de nanoparticules, de 0,5% à 2%, entraîne une diminution systématique de la densité, la formulation MI + 2% NP présentant la valeur la plus basse à environ 1,38 g/cm³. Dans le cadre de l'étude des formulations de fluides à base d'eau (WBM), une comparaison a été effectuée entre la densité de la formulation de base et celle d'une formulation modifiée incorporant à la fois des nanoparticules (NP) et de la gomme xanthane (XG), cette dernière étant désignée par "WBM + (XG+NP)". Les résultats de cette analyse révèlent que les deux formulations présentent des valeurs de densité identiques, s'établissant approximativement à 1,26 g/cm³. Cette observation met en lumière que l'ajout de nanoparticules et de gomme xanthane n'a pas d'impact significatif sur la densité du fluide de base, tout en suggérant potentiellement d'autres avantages fonctionnels qui pourraient justifier leur incorporation dans la formulation. Les mesures de distillation ont permis d'obtenir un rapport huile/eau de 89/11, très proche du rapport théorique de 90/10. Cette proximité entre le rapport mesuré et le rapport théorique démontre la précision de la formulation et suggère une bonne intégration des nanoparticules dans le mélange huile/eau, sans altération significative des proportions prévues.

En définitive, les résultats de notre travail mettent en évidence la complexité du processus d'optimisation des fluides de forage à base d'huile (OBM) et à base d'eau (WBM) intégrant des nanoparticules synthétiques. Cette complexité se manifeste à travers de nombreux paramètres influençant la stabilité du fluide de forage ainsi que le forage lui-même. Le travail élaboré permet certes de prédire les paramètres rhéologiques de viscosité et de seuil de cisaillement que les ingénieurs s'efforcent d'estimer avec précision. Cependant, les interactions entre le fluide de forage et la formation traversée restent complexes et souvent imprévisibles.

De notre point de vue, largement partagé par la communauté scientifique du forage pétrolier, c'est la formation géologique qui détermine l'issue d'un forage. Le fluide de forage, sur lequel les ingénieurs ont un certain contrôle, ne sert qu'à pallier les différents problèmes survenant d'un gisement à l'autre, d'une formation à l'autre. L'objectif est donc de mettre au service des pétroliers des modèles plus précis, capables de rendre les opérations de forage plus sûres et plus fiables.

Bibliographie

- [1] Schwertmann U. Cornell, R. M. *The iron oxides : structure, properties, reactions, occurrences and uses*. Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim, 2003.
- [2] Sonatrach and Schlumberger. Well Evaluation Conferences (WEC) - Rapport inédit. Conférence tenue en Algérie, 2007, 2007.
- [3] BEKAKRIA FARES. *Commande par mode glissant d'un système de forage pétrolier*. PhD thesis, Université guelma, 2022.
- [4] M. ASaber and A. Sebti. *Evaluation des performances des émulsifiants utilisés dans les fluides de forage*. PhD thesis, Ecole nationale polytechnique, 2004.
- [5] Mohamed Khodja, Jean Paul Canselier, Faiza Bergaya, Karim Fourar, Malika Khodja, Nathalie Cohaut, and Abdelbaki Benmounah. Shale problems and water-based drilling fluid optimisation in the hassi messaoud algerian oil field. *Applied Clay Science*, 49(4) :383–393, 2010. Fourth Mediterranean Clay Meeting.
- [6] REZKI Akkal. *Optimisation des fluides de forage et endommagement de la formation*. PhD thesis, ENP, 2014.
- [7] Ben Friha sadek ET Mekhloufi khireddin. *Etude comparative sur les fluides de forage à base d'eau et base d'huile et leurs traitements*. PhD thesis, Université KASDI-MERBAH Ouargla, 2020.
- [8] Abbas-Rahdar Mahmoud-Hashemzaei Nazanin-Taimoory, John-Trant. Importance of the inter-electrode distance for the electrochemical synthesis of magnetite nanoparticles : Synthesis, characterization, computational modelling, and cytotoxicity. *Journal-of-Surface-Science-and-Nanotechnology*, 2017.
- [9] Davoodi S.-Wood D.A.-Ameen Al-Musai Rukavishnikov V.S. Al-Shargabi, M. and K.M. Minaev. Nanoparticle applications as beneficial oil and gas drilling fluid additives. *Journal des liquides moléculaires*, 352 :36, 2022.
- [10] Mohamed Masmoudi. Rhéologie, 2020. Accédé le 24 septembre 2024.
- [11] Gianna Pietrangeli, Lirio Quintero, T.A. Jones, S. Benaissa, C.A. Menezes, E. Aubry, Hugues Poitrenaud, and J.N. Furgier. Overcoming wellbore cleanup challenges in deep-water wells in west africa. *SPE - European Formation Damage Conference, Proceedings, EFDC*, 2, 02 2014.
- [12] Udegabara Gekwu, Ndubuisi Okereke, Anthony Kerunwa, I Oguamah, Onyebuchi Nwanwe, Odo Emeka, and R Okeke. Performance evaluation of oil based drilling fluid formulated with castor oil. *Journal of Petroleum and Gas Engineering*, 12 :8–22, 05 2021.
- [13] et al. Abd el karim, GUEMMOULA. *Caractérisation et Modélisation Géologique Du Réservoir Cambro-Ordovicien d'Une Partie Du Champ de Hassi Messaoud (Zone 13)*. PhD thesis, Université ouargla, 2016.
- [14] Bertand et R. Caby. The late pan-african intracontinental linear fold belt of the eastern hoggar (central sahara, algeria) : geology, structural development, u/pb geochronology, tectonic implications for the hoggar shield. *precambrian research*,, 1978.
- [15] H.C.H. Darley Darley and George R. Gray. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Elsevier Inc, 1988.

-
- [16] Landriot G. fluide de forage. 1968.
- [17] KHODJA Mohamed. *LES FLUIDES DE FORAGE : ETUDE DES PERFORMANCES ET CONSIDERATIONS ENVIRONNEMENTALES*. PhD thesis, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2008.
- [18] A. Abdelaziz and A. Benader. *Impact de l'invasion du fluide de forage bi-phasique sur l'endommagement dans la formation réservoir du champ de Hassi-Messaoud*. PhD thesis, Ecole nationale polytechnique, 2016.
- [19] Jean-Paul NGUYEN. *Techniques d'exploitation pétrolière le forage*. Edition Tehnip, 1993.
- [20] BOUGHENDJA Saad et BERRIAH Fadhila. *Effet de la contamination sur les propriétés physico-chimiques des fluides de forage*. PhD thesis, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2016.
- [21] ABDELAZIZ.Aboubaker. *Etude de la variation de l'épaisseur de cake en fonction de ses paramètres physiques lors de la circulation d'un fluide forage bi-phasique*. PhD thesis, Ecole nationale polytechnique, 2016.
- [22] Jean-Louis Grossiord et Nicolas Huang Guy Couarraze. *INITIATION À LA RHÉOLOGIE*. editions.lavoisier.fr.
- [23] Alhaitham M.Alkalbani and Girma T.Chala. A comprehensive review of nanotechnology applications in oil and gas well drilling operations. *Energies*, 17 :798, 2024.
- [24] Ehsan Kasiralvalad. The great potential of nanomaterials in drilling drilling fluid applications. *International Journal of Nano Dimension*, 5 :463–471, 2014.
- [25] D. Das, B. Dutta. Une revue des applications de la nanotechnologie dans les industries pétrolières et gazières. *Resour.Efficace. Technologie.*, 4 :119, 2019.
- [26] Magné N. Héroult J. Bonvalot S. Tourneau-C. L. Thariat J. Calugaru, V. Nanoparticules et radiothérapie. *Bulletin du Cancer*, 102 :83-91, 2015.
- [27] RIHAB LAKHAL. *NOUVEAU PROCEDE D'ELABORATION DE MICRO ET NANOPARTICULES D'OXYDE DE FER EN VOIE SECHE : CARACTERISATION, ETUDE DU PROCEDE ET PROPOSITION D'UN MECANISME REACTIONNEL*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2016.
- [28] K. Saeed I. Khan. Nanoparticles : Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 7 :908–931, 2019.
- [29] F. Iskandar H.S. Wasisto A. Sumboja A.P. Yuda, P.Y.E. Koraag. Advances of the top-down synthesis approach for high-performance silicon anodes in li-ion batteries. *Journal of Materials. Chemistry. A*, 35 :18906–18926, 2021.
- [30] Y. Du AE Kabeel SM Shalaby ME Zayed, J. Zhao. Facteurs affectant les performances thermiques du capteur solaire à plaque plate utilisant des nanofluides. *une revue, Sol. Énergie*, 182 :382–39696, 2019.
- [31] M. Koç N. Sezer, M.A. Atieh. comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids. *Powder Technol*, 344 :404–431, 2019.
- [32] J. Yu H.J. Park, D.J. Shin. ategorization of quantum dots, clusters, nanoclusters, and nanodots,. *J. Chem. Educ.*, 3 :703–709, 2021.
- [33] L. Cheraghian, G. Hendraningrat. Une revue des applications de la nanotechnologie dans la récupération assistée du pétrole, partie a : effets de nanoparticules sur la tension interfaciale. *Int. Nano Lett.*, 6 :129138, 2016.
- [34] M.; Wood D.A.; Rukavishnikov V.S.; Minaev K.M. Davoodi, S.; Al-Shargabi. Experimental and field applications of nanotechnology for enhanced oil recovery purposes. *A review. Fuel*, 324 :124669, 2022.
- [35] M.F.; Abbas A.K. Alsaba, M.T.; Al Dushaishi. A comprehensive review of nanoparticles applications in the oil and gas industry. *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, 10 :1389–1399, 2020.
-

-
- [36] Dale L. Huber. Synthesis, properties, and applications of iron nanoparticles. *Small*, 1(5) :482–501, May 2005.
- [37] Tharwat Tadros. Interparticle interactions in concentrated suspensions and their bulk (rheological) properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, 168(1) :263–277, 2011. Surface forces and thin liquid films.
- [38] Kanjirakat Anoop, Reza Sadr, Rommel Yrac, and Mahmood Amani. Rheology of a colloidal suspension of carbon nanotube particles in a water-based drilling fluid. *Powder Technology*, 342 :585–593, 2019.
- [39] Chafai BOUZEGAG. *FORMULATIONS ET LOIS D ECOMPORTEMENT DE FLUIDES DE FORAGE*. PhD thesis, ENP, 2010.
- [40] Patrice Estellé, Christophe Lanos, and Arnaud Perrot. Processing the couette viscometry data using a bingham approximation in shear rate calculation. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 154(1) :31–38, 2008.
- [41] Bao Jia, Charles Bose, Sai Wang, Dupeng Liu, Hongsheng Wang, and Cenk Temizel. Chapter five - intelligent materials in unconventional oil and gas recovery. In Cenk Temizel, Mufrettin Murat Sari, Celal Hakan Canbaz, Luigi A. Saputelli, and Ole Torsæter, editors, *Sustainable Materials for Oil and Gas Applications*, volume 1 of *Advanced Materials and Sensors for the Oil and Gas Industry*, pages 175–206. Gulf Professional Publishing, 2021.
- [42] Ahmed S. Mohammed. Effect of temperature on the rheological properties with shear stress limit of iron oxide nanoparticle modified bentonite drilling muds. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(3) :791–802, 2017.
- [43] Muhammad A. Alvi, Mesfin Belayneh, Sulalit Bandyopadhyay, and Mona W. Minde. Effect of iron oxide nanoparticles on the properties of water-based drilling fluids, 2020.
- [44] Jeffrey O. Oseh, M.N.A.M. Norddin, Issham Ismail, Afeez O. Gbadamosi, Augustine Agi, Abdul R. Ismail, Prasad Manoger, and Kumaresan Ravichandran. Enhanced cuttings transport efficiency of water-based muds using (3-aminopropyl) triethoxysilane on polypropylene-nanosilica composite. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(8) :6904–6920, 2020.
- [45] Yiwen Su, Xianzhong Yang, Qihui Zhang, Jingyu Sun, and Zhongfan Liu. Carbon nanomaterials for highly stable zn anode : Recent progress and future outlook. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 904 :115883, 2022.
- [46] Augustine D. Terna, Elias E. Elemike, Justina I. Mbonu, Omosede E. Osafire, and Rachael O. Ezeani. The future of semiconductors nanoparticles : Synthesis, properties and applications. *Materials Science and Engineering : B*, 272 :115363, 2021.

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Minier

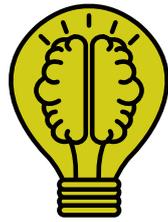
Pour l'obtention d'un diplôme Startup dans le cadre de l'arrêté ministériel 1275

Thème :

Études stratégiques et plan d'affaire de la startup SANAvation



ENP 2024



Premier axe

Présentation du projet

Présentation du projet

1. L'idée de projet

Domaine d'activité : industrie des matériaux, industrie pétrolière, nanotechnologie.

L'idée d'introduire les nanoparticules dans les fluides de forage est issue de l'impression par le domaine de la nanotechnologie et la révolution de l'industrie pétrolière et gazière. Au cours des dernières années, l'utilisation de nanomatériaux pour concevoir des fluides de forage intelligents a gagné en importance, notamment pour améliorer les propriétés rhéologiques. Cette approche se base sur le développement de fluides de forage nanométriques intelligents, rendus possibles par l'intégration de nanoparticules d'oxyde de fer.

Le projet se concentre sur les deux axes principaux :

1. Production et commercialisation de nanoparticules d'oxyde de fer synthétisées : Fabriquées en interne à partir de produits chimiques sélectionnés pour garantir une qualité et une uniformité optimales, adaptées à diverses applications industrielles.
2. Formulation du fluide de forage nanométrique (nanofluide) : Formulé avec l'intégration des nanoparticules d'oxyde de fer, ce fluide de forage vise à améliorer les propriétés rhéologiques et de filtration dans la formation géologique.

Le développement de l'idée repose sur des protocoles de production détaillés et des essais expérimentaux ajustés pour garantir l'efficacité et la qualité des produits.

Cela sera réalisé par l'installation d'une unité de production intégrant un laboratoire dédié à la fabrication des nanoparticules d'oxyde de fer. Cette unité sera équipée de machines spécialisées pour assurer la production et le contrôle qualité des nanoparticules. Notre équipe prendra en charge toutes les étapes du processus, de la réception des matières premières jusqu'à l'emballage du produit fini. Nous nous engageons à respecter scrupuleusement les normes de qualité et de conformité à chaque phase de fabrication.



Carte d'information

À propos de l'équipe d'encadrement du groupe de travail

1. Équipe d'encadrement

Équipe d'encadrement	
Encadrant Principal: Pr. AKKAL Rezki	Spécialité : Génie Minier

2. Équipe de travail



Équipe de projet	Faculté	Spécialité
Étudiante 01 : AOUNE Sara	École Nationale Polytechnique	Génie Minier
Étudiante 02 : ZIREG Nacira	École Nationale Polytechnique	Génie Minier

2. Valeurs proposées



- **Innovation technologique** : La nanotechnologie s'est révélée prometteuse pour résoudre des problèmes majeurs et améliorer l'efficacité du forage grâce à l'intégration de nanoparticules dans les fluides de forage. Ces nanoparticules ont un impact significatif sur les propriétés des fluides, ce qui améliore considérablement les performances globales des opérations de forage.
- **Qualité et sécurité** : Le respect des normes les plus strictes en matière de qualité et de sécurité à chaque étape de la production garantit des produits fiables et performants.
- **Accessibilité** : Proposition des solutions à des prix compétitifs, rendant les technologies avancées accessibles à un plus large éventail de clients dans l'industrie pétrolière ainsi d'autres secteurs industriels.

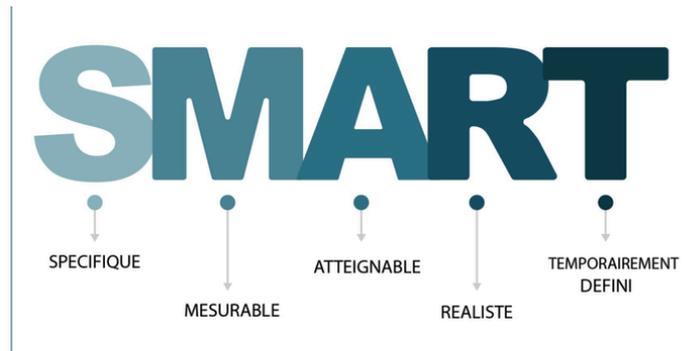
3. Équipe de projet

L'équipe du projet est composée des membres suivants :

- ✓ **AOUNE Sara** : Co-Fondateur de la startup (CEO), Ingénieur en génie minier, Responsable Marketing et communication, et ressources humaines.
- ✓ **ZIREG Nacira** : Co-Fondateur de la startup (CEO), Ingénieur en génie minier, Responsable des finances, ventes et e-commerce.
- ✓ **AKKAL Rezki** : Responsable de la recherche et développement (R&D) de la startup, Professeur ENP.

Département Génie Minier, École Nationale Polytechnique d'Alger.

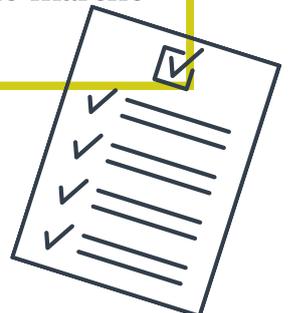
3. Objectifs du projet



À court terme, notre objectif principal est de développer un procédé efficace pour la production de nanoparticules d'oxyde de fer de haute qualité et de lancer notre unité de production. Nous visons à commercialiser ces nanoparticules auprès de clients ciblés, tout en établissant des partenariats solides avec les principaux acteurs de l'industrie pétrolière et gazière en Algérie, tels que Sonatrach, ainsi qu'avec les fournisseurs de matières premières nécessaires à notre processus de fabrication. Parallèlement, nous étudierons la viabilité de l'intégration de ces nanoparticules comme additifs dans les fluides de forage pétrolier, dans le but d'améliorer leurs propriétés physico-chimiques.

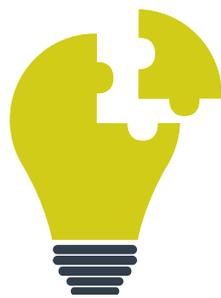
À moyen terme, nous nous concentrerons sur l'amélioration continue de la qualité de nos produits et le renforcement de notre présence sur le marché industriel algérien. Nous prévoyons également de développer des solutions personnalisées pour répondre aux besoins spécifiques de nos clients, tout en explorant de nouvelles applications dans des secteurs tels que la médecine, l'environnement et l'électronique.

À long terme, nous visons à évaluer en continu l'efficacité des nanoparticules dans diverses formulations de fluides de forage, tout en développant des solutions adaptées aux besoins spécifiques de l'industrie pétrolière. Parallèlement, nous poursuivrons nos recherches sur différents types de nanoparticules afin d'optimiser les performances des fluides de forage et d'explorer d'autres applications potentielles. Notre ambition est de contribuer significativement à l'économie locale en créant des emplois et en maintenant des normes rigoureuses de qualité et de sécurité, tout en offrant des solutions technologiques accessibles et compétitives pour renforcer notre position sur le marché industriel.



4. Calendrier de réalisation

Travaux		Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
1	 Recherche et développement sur le procédé de production											
2	 Préparation au laboratoires des NPs											
3	 Réalisation du premier prototype											
4	 Analyses et caractérisations											
5	 Stage pratique											
6	 Rédaction de brevets											
7	 Demande de label Startup											
8	 Recherche d'un local											
9	 Études préalables : choix de l'implantation de l'unité de production et préparation des documents nécessaires											
10	 Commande et installation des équipements											
11	 Recrutement du personnel											
12	 Réalisation du prototype industriel											
13	 Signer des contrats avec des clients											

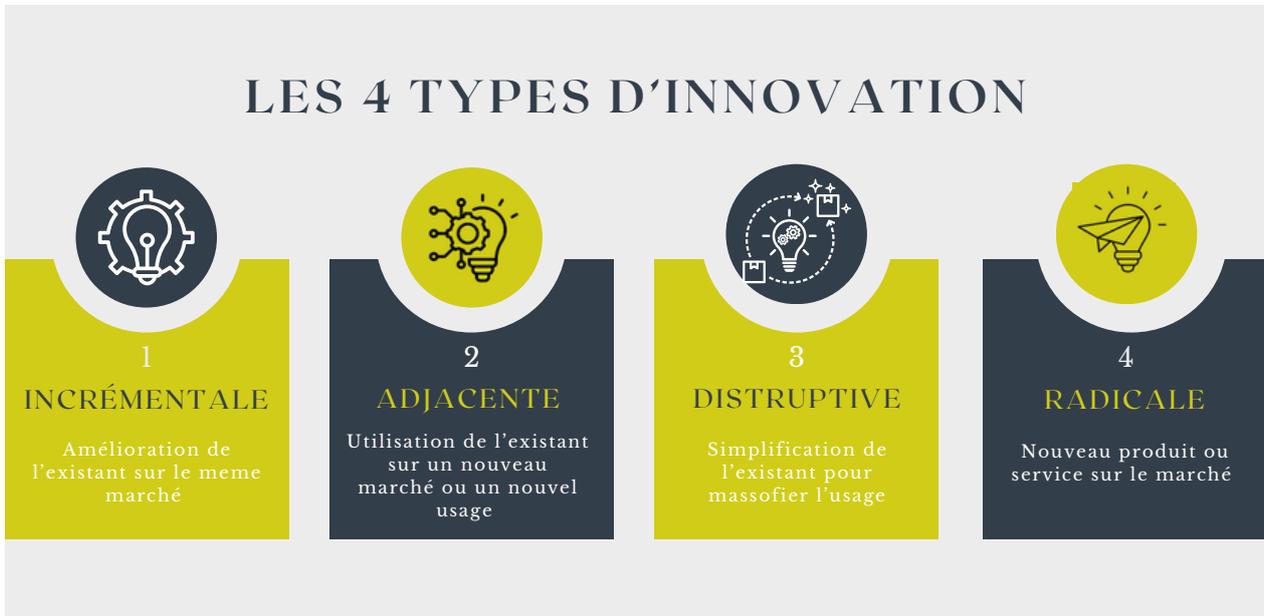


Deuxième axe

Aspects innovants

Aspects innovants

1. Nature de l'innovation



L'innovation incrémentale & disruptive : Notre innovation se situe à la croisée de l'innovation incrémentale et de l'innovation disruptive.

D'une part, nous nous engageons à améliorer continuellement notre processus de production de nanoparticules d'oxyde de fer en optimisant chaque étape, en renforçant la qualité et en répondant aux besoins évolutifs du marché. D'autre part, nous nous consacrons à la création de nouvelles formulations de nanofluides, en se basant sur les retours des clients, les avancées technologiques et des recherches continues pour garantir des fluides de forage toujours plus performants.

Par ailleurs, notre innovation se distingue par son caractère disruptif, en introduisant de nouvelles technologies et méthodologies. L'intégration de nanoparticules d'oxyde de fer dans les fluides de forage a le potentiel de transformer l'industrie du forage pétrolier en Algérie et à l'échelle internationale. Cette avancée se concentre principalement sur la production de nanoparticules de fer synthétisées à partir de produits chimiques de haute pureté, garantissant ainsi une qualité et une uniformité optimales.

En combinant ces aspects, nous visons à être à la pointe de l'innovation dans le secteur énergétique, en offrant des solutions technologiques avancées tout en restant flexibles et adaptables aux besoins changeants du marché et de nos clients.

Aspects innovants

2. Domaines d'innovation



Innovation dans le processus de production :

- **Méthodes de synthèse avancées** : Nous avons développé des techniques de synthèse chimique de pointe pour la production de nanoparticules d'oxyde de fer. Ces méthodes optimisées assurent la fabrication de nanoparticules qui répondent aux exigences les plus élevées en termes de performances et de qualité. En utilisant des produits chimiques de haute pureté, nous garantissons une uniformité optimale des nanoparticules, essentielles pour leurs applications ultérieures.
- **Formulation des nanofluides** : Nous avons élaboré des formulations innovantes pour les fluides de forage, intégrant efficacement les nanoparticules d'oxyde de fer. Ces formulations permettent d'améliorer les propriétés rhéologiques des fluides. De plus, elles minimisent les pertes de filtrat, optimisant les paramètres de filtration des fluides de forage, ainsi leur performance globale.

Innovation dans les applications des produits :

- **Fluides de forage intelligents** : L'intégration des nanoparticules d'oxyde de fer dans les fluides de forage constitue une avancée majeure. Cette technologie améliore significativement les performances des fluides, renforce la stabilité des puits, optimise le taux de production et réduit les coûts opérationnels. Nos fluides intelligents offrent des solutions efficaces pour les défis complexes de l'industrie pétrolière.
- **Applications diversifiées** : En plus de leur utilisation dans les fluides de forage, notre produits (nanoparticules) à des applications potentielles dans divers domaines industriels. Il peut être utilisé dans la dépollution des sols et des eaux, en médecine pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et la thérapie par choc magnétique, ainsi que dans l'électronique pour la fabrication de capteurs et de batteries. Cette polyvalence souligne le potentiel étendu de nos nanoparticules au-delà du secteur pétrolier.



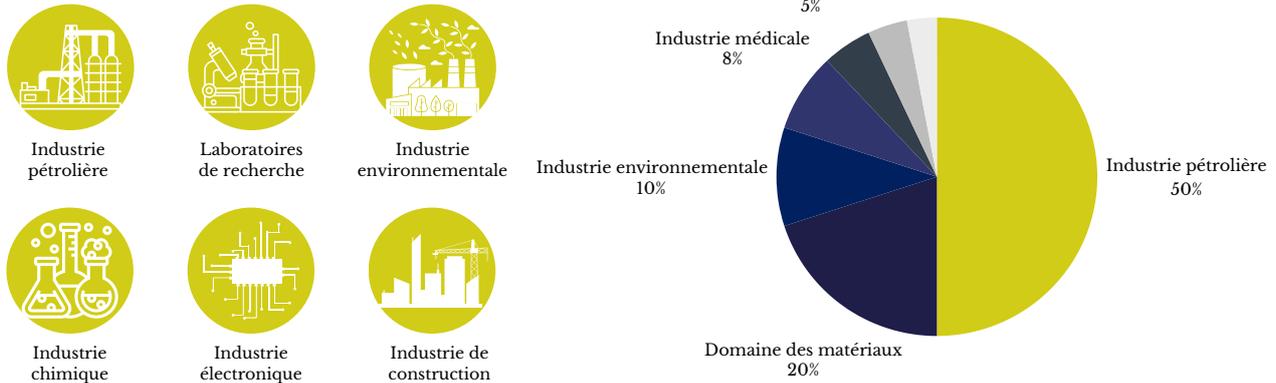
Troisième axe

Analyse stratégique du marché

Analyse stratégique du marché

1. Le segment du marché

Marché Potentiel

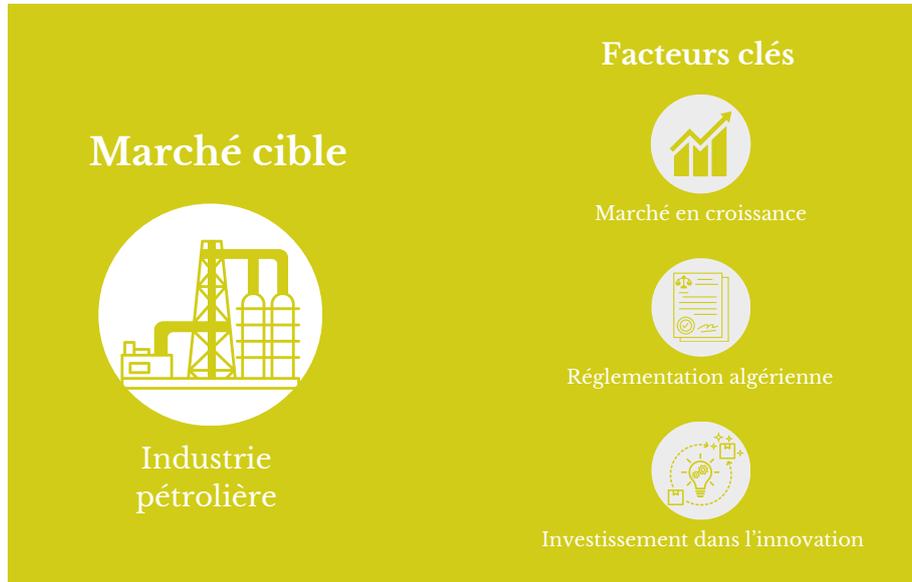


Marché Potentiel

- **Industrie pétrolière et gazière** : Les entreprises de ce secteur recherchent des technologies avancées pour améliorer l'efficacité des fluides de forage. L'intégration de nanoparticules d'oxyde de fer peut optimiser les propriétés des fluides et répondre aux exigences de performance accrues.
- **Laboratoires de recherche et développement** : Ces laboratoires, spécialisés en matériaux et nanotechnologie, bénéficient de nanoparticules de haute qualité pour leurs recherches et le développement de nouvelles applications.
- **Industries de dépollution environnementale** : Les technologies de traitement des contaminants peuvent être renforcées par l'utilisation de nanoparticules d'oxyde de fer, offrant des solutions innovantes pour la purification et le nettoyage des environnements pollués.
- **Industries médicales et électroniques** : Les nanoparticules jouent un rôle croissant dans les applications médicales et électroniques, telles que l'imagerie et les dispositifs avancés. Notre projet offre des nanoparticules adaptées à ces besoins spécifiques.
- **Industries de construction** : L'intégration des nanoparticules dans les matériaux de construction améliore leurs propriétés et durabilité, offrant des solutions innovantes pour le secteur de la construction.

Analyse stratégique du marché

1. Le segment du marché



Marché cible :

Le marché cible de notre projet se concentre principalement sur les entreprises pétrolières et gazières en Algérie, telles que Sonatrach et ses sous-traitants, ainsi que les sociétés de services de forage. Ces acteurs majeurs du secteur énergétique recherchent constamment des solutions novatrices pour améliorer l'efficacité et la performance de leurs opérations de forage. En s'adressant à ce segment spécifique, nous répondons à une demande croissante pour des technologies avancées, telles que les nanoparticules, qui permettent d'optimiser les pratiques de forage. Les laboratoires et centres de recherche spécialisés dans les nanomatériaux représentent également un marché stratégique, contribuant à explorer et développer de nouvelles applications des nanotechnologies.

Les facteurs clés pour le choix de notre marché cible incluent :

- **Marché en croissance** : La demande croissante pour des technologies avancées dans l'exploration et la production pétrolière en Algérie stimule l'adoption de solutions innovantes, offrant ainsi une opportunité pour les nanoparticules.
- **Réglementation algérienne** : les régulations favorisent l'utilisation de technologies locales et innovantes dans le secteur pétrolier, soutenant ainsi l'intégration des nanoparticules.
- **Investissements dans l'innovation** : Le gouvernement algérien et les entreprises locales investissent de plus en plus dans des technologies de pointe pour optimiser les processus d'extraction et de production, créant un terrain favorable pour les nanoparticules.

2. Mesure de l'intensité de la concurrence

SANAVATION	<ul style="list-style-type: none">• Développement de nanofluides personnalisés et intelligents répondant aux besoins spécifiques des clients.
CONCURRENCE LOCALE	<ul style="list-style-type: none">• Peu de concurrents directs dans la production de nanoparticules d'oxyde de fer en Algérie.• Concurrence indirecte des entreprises de services de forage utilisant des fluides de forage traditionnels.
CONCURRENCE INTERNATIONALE	<ul style="list-style-type: none">• Grandes entreprises multinationales de la nanotechnologie et nanoscience et des services pétroliers, comme: NanoIron, Sigma-Aldrich, SkySpring Nanomaterials, REINST, Nanoshel...

3. La stratégie marketing

- **Choix du nom**

SANAvation : Combinaison des initiales des fondateurs (SA et NA) avec "innovation," reflétant notre engagement envers des solutions innovantes.

- **LOGO et couleurs**



Bleu ardoise foncé : Couleur sombre représentant la sophistication et la technologie avancée.

Jaune doré : Symbolisant l'énergie, la richesse des ressources et l'optimisme.

Gris clair : Couleur claire pour la pureté, la fiabilité et la clarté de nos solutions.

- **Packaging attractif** : Conception d'un emballage moderne et informatif pour les produits de SANAvation, mettant en valeur les avantages uniques des nanoparticules.
- **Stratégies de communication** : Utilisation de stratégies marketing créatives et ciblées pour présenter nos produits et démontrer les bénéfices des fluides de forage nanométriques aux clients potentiels. Nous mettrons en avant la valeur ajoutée en termes de performance, de durabilité et de coût.

3.1. Produit

- **Nanoparticules d'oxyde de fer synthétiques**

Nous proposons des nanoparticules conditionnées dans des boites de 250 grammes et 1 kilogramme et dans des sacs en polyéthylène haute densité de 10 kilogrammes. Notre produit se distingue par sa stabilité exceptionnelle et sa pureté élevée. Il est spécialement conçu pour répondre aux besoins des secteurs de l'industrie pétrolière et gazière ainsi d'autres secteurs notamment, la médecine, de la construction, de l'industrie électronique et de la protection de l'environnement, assurant des performances optimales et une manipulation sûre et efficace.

- **Nanofluides de forage optimisés**

Nous allons offrir des formulations de fluide de forage développés avec les nanoparticules pour répondre aux exigences et besoins de l'industrie pétrolière et réussir les opérations de forage, assurant des performances optimales et rentables.

3.2. Prix

Notre prix est de **20000 DA** pour **100g** de nanoparticules de fer synthétisées, c'est un prix compétitif, abordable pour notre marché cible et inclus une marge de bénéfice équilibrée.

3.3. Plan de distribution

Circuit de distribution	<ul style="list-style-type: none">• C'est la distribution directe, où les nanoparticules sont vendues directement par notre unité de production aux clients finaux et aux distributeurs.
Canal de distribution	<ul style="list-style-type: none">• Il faut accentuer la distribution au secteur pétrolier, et l'étendre vers d'autres secteurs industriels.• Partenariats avec des distributeurs spécialisés dans les produits chimiques et les matériaux, qui peuvent élargir notre portée sur le marché.
Stratégie de distribution	<ul style="list-style-type: none">• C'est une stratégie de distribution sélective, en optant pour une telle stratégie pour garantir la qualité de nos produits et maximiser leur valeur.

3.4. Communication

Prospection :

Dans le cadre de notre stratégie de prospection, nous utiliserons une approche diversifiée pour communiquer avec les clients potentiels et promouvoir les produits innovants.

D'une part, nous organiserons **des réunions en ligne** pour présenter nos solutions, discuter des besoins spécifiques des clients et répondre à leurs questions. Ces réunions virtuelles seront réalisées via des plateformes de visioconférence.



D'autre part, nous mettrons en place **des présentations en personne** pour engager directement avec les clients clés, les partenaires potentiels et les investisseurs. Ces séances de présentation auront lieu dans des lieux stratégiques, comme les locaux des clients ou lors d'événements industriels majeurs, afin de maximiser l'impact et la portée de nos interactions.

En parallèle, nous mènerons des activités de **prospection téléphonique** et par **courriel** en contactant les grandes entreprises pétrolières et gazières en Algérie, ainsi que les sociétés de services de forage et les laboratoires de R&D. Cette approche nous permettra d'identifier de nouvelles opportunités de partenariat et de promouvoir nos solutions de manière ciblée.

Salons, forums et expositions :



La participation à des salons, forums et expositions spécialisés dans l'industrie pétrolière, l'industrie des matériaux, La médecine, la nanotechnologie et la nanoscience et les applications industrielles des nanoparticules.

Nous offriront une plateforme précieuse pour rencontrer des clients potentiels en personne, établir des relations et présenter nos produits de manière approfondie.

Création de contenu sur les réseaux sociaux :

Nous utiliserons la plateforme LinkedIn pour promouvoir nos produits et démontrer leurs avantages aux entreprises concernées. Voici quelques exemples de contenu que nous prévoyons de créer :

1. Affiches et Vidéos de Sensibilisation
2. Études de Cas et Témoignages Clients
3. Articles et Publications de Recherche
4. Webinaires et Sessions Q&R en Direct
5. Faits Scientifiques et Avancées Technologiques
6. Collaborations et Partenariats
7. Actualités et Mises à Jour de l'Industrie



Création d'un site Web :



- Pour les commandes en ligne.
- Pour les mises à jour sur nos produits et notre entreprise.
- Publication d'articles scientifiques variés sur les nanomatériaux et sur les applications des nanoparticules, les avancées scientifiques, et des études de cas pertinentes.
- Collecte de retours, d'avis et de témoignages de nos clients.
- Recrutement de nouveaux employés, attirant des talents qualifiés pour soutenir notre croissance.

En adoptant cette stratégie de communication diversifiée, nous pourrions maximiser notre visibilité, atteindre notre marché ciblé et promouvoir efficacement nos produits et nos services.

Analyse SWOT

FORCES

- Amélioration des propriétés rhéologiques et de filtration
- Innovation technologique
- Flexibilité des applications
- Réduction de l'impact environnemental

FAIBLESSES

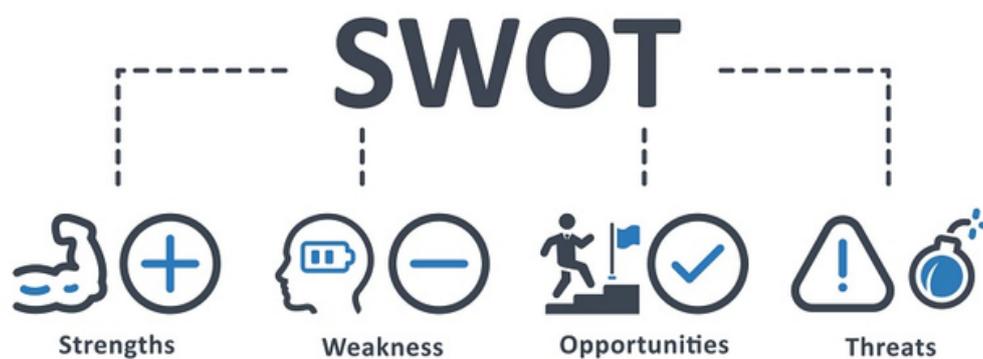
- Nouvelle entreprise sans expérience précédente
- Complexité de la production
- Stabilité des nanoparticules
- Échelle de production initiale

OPPORTUNITES

- Marché en croissance
- Collaboration et financement
- Expansion internationale
- Développement durable

MENACES

- Réglementations changeantes et strictes
- Compétition
- Volatilité des prix des matières premières et des fluctuations monétaires



Analyse PESTEL de SANAvation Products

P

POLITIQUE

Le gouvernement algérien met en place des lois pour encourager la production locale et réduire l'importation de produits à haute consommation, ce qui est favorable à notre projet. Cette politique soutient les initiatives locales et les startups innovantes en fournissant des incitations financières et réglementaires. En outre, la stabilité politique relative de l'Algérie, bien qu'elle puisse fluctuer, crée un environnement propice pour les investissements dans des projets technologiques.

E

ECONOMIQUE

L'économie algérienne, bien que diversifiée, reste fortement influencée par les prix du pétrole, ce qui peut affecter indirectement les coûts de production et les prix des matières premières. Cependant, un marché en croissance et la disponibilité de financement pour les startups technologiques offrent des opportunités significatives. De plus, les initiatives gouvernementales visant à encourager les productions locales et à réduire la dépendance aux importations peuvent renforcer la position de notre projet sur le marché.

S

SOCIAL

La montée en puissance des réseaux sociaux modifie le paysage marketing, offrant aux petites entreprises la possibilité d'atteindre un public plus large de manière économique. La sensibilisation croissante aux enjeux environnementaux parmi les consommateurs algériens favorise également l'adoption de solutions durables. La culture technologique et l'ouverture à l'innovation sont en augmentation, ce qui peut aider à surmonter les réticences initiales face à de nouvelles technologies. De plus, la main-d'œuvre jeune et éduquée peut être un atout pour le développement et la mise en œuvre des innovations de notre projet.

Analyse PESTEL de SANAvation Products

TECHNOLOGIQUE

L'Algérie encourage le développement technologique et l'innovation, offrant un environnement propice à SANAvation pour poursuivre ses avancées technologiques. Le gouvernement soutient les initiatives de recherche et développement, et il existe des opportunités de collaboration avec des universités et des instituts de recherche locaux.

Les progrès technologiques rapides exigent que SANAvation reste à la pointe de l'innovation pour maintenir sa compétitivité.

ECOLOGIQUE

La capacité de SANAvation à réduire l'impact environnemental de ses produits est alignée avec les tendances mondiales vers la durabilité. La législation algérienne encourage des pratiques durables. La situation géographique de l'Algérie, avec ses contraintes en matière d'eau, rend particulièrement pertinent le développement de technologies et de produits qui nécessitent moins d'eau et sont adaptés aux conditions locales. Cela renforce la pertinence de nos solutions durables.

LEGAL

La législation algérienne permet la commercialisation de produits innovants et écologiques, offrant un cadre favorable à SANAvation. Cependant, il faut respecter les réglementations rigoureuses en matière de sécurité et de santé pour prévenir les sanctions et assurer la sûreté des produits. La protection de la propriété intellectuelle est également un aspect essentiel, car les innovations technologiques de SANAvation doivent être protégées pour maintenir un avantage concurrentiel. Les réglementations environnementales strictes, bien qu'elles représentent un défi, peuvent également offrir une opportunité de se distinguer en tant qu'entreprise responsable et conforme.



Quatrième axe

Plan de production et d'organisation

Plan de production et d'organisation

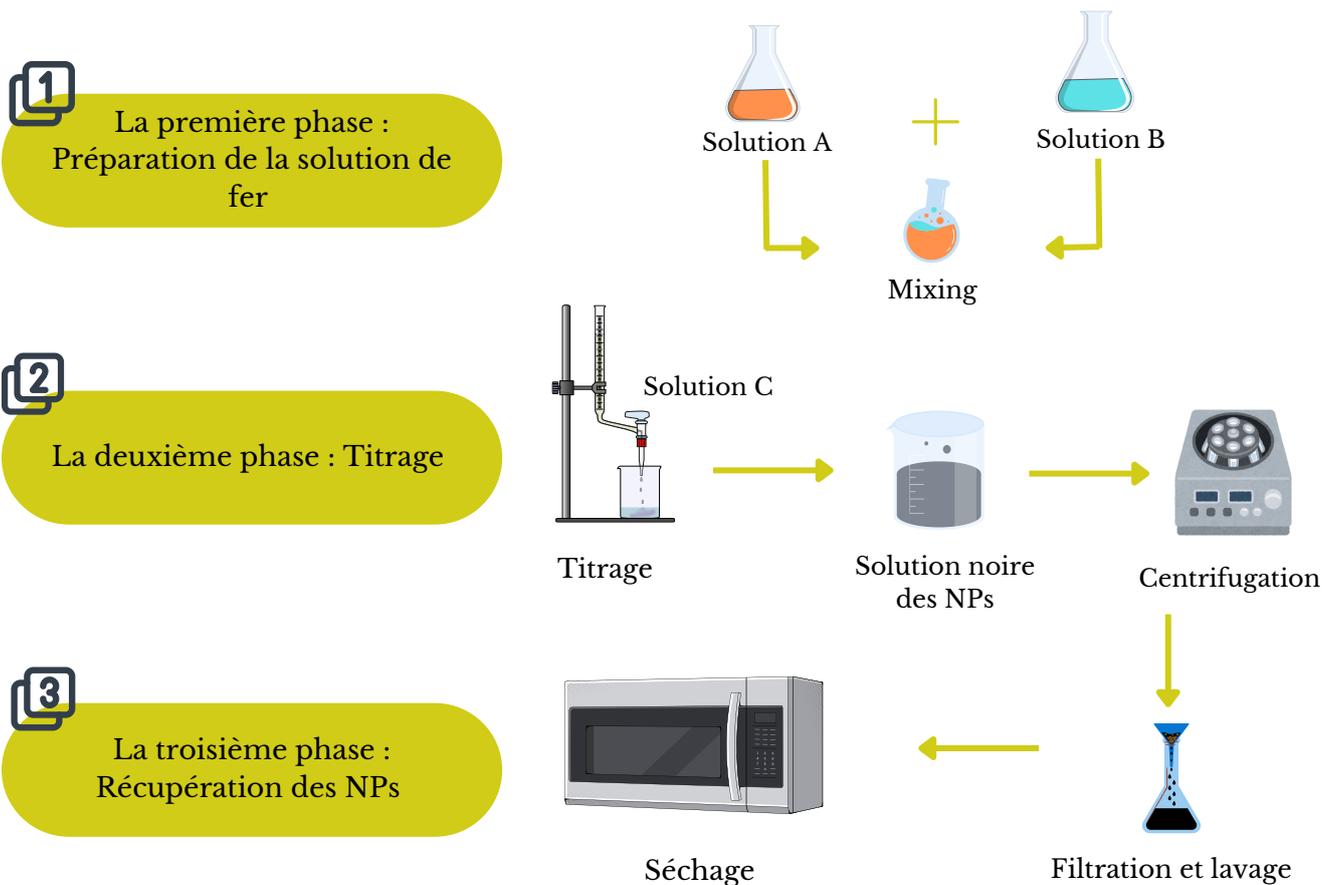
1. Le Processus de production

Le processus consiste à synthétiser des nanoparticules par une méthode de co-précipitation dans un environnement alcalin.

Tout d'abord, deux solutions distinctes, A et B, sont préparées en dissolvant les composants nécessaires dans de l'eau déionisée. La solution B est ensuite ajoutée lentement à la solution A sous agitation continue. Le pH du mélange est soigneusement contrôlé en ajoutant un agent précipitant (solution C) pour assurer une co-précipitation adéquate des composants désirés. Le précipité formé est séparé du mélange réactionnel par centrifugation.

Enfin, les nanoparticules sont stabilisées en les recouvrant d'un polymère pour éviter leur agrégation.

Ce schéma présenté explique les étapes mentionnées du processus de production :



Plan de production et d'organisation

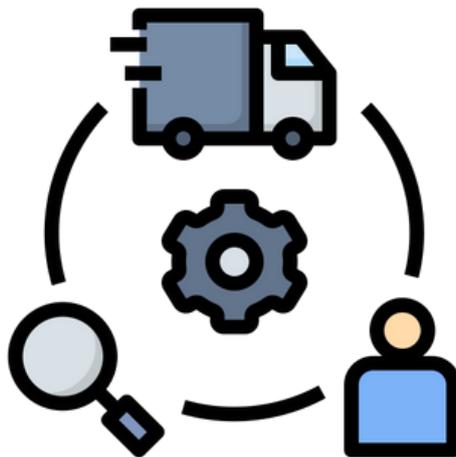
2. L'Approvisionnement

Pour garantir un approvisionnement stable et de haute qualité, on s'engage dans des collaborations avec des fournisseurs spécialisés pour obtenir les produits chimiques nécessaires à la production et la modification de surface des nanoparticules. Ces produits chimiques sont sélectionnés en fonction de leurs propriétés spécifiques et de leur compatibilité avec notre processus de production.

L'acquisition des équipements nécessaires à la production des nanoparticules est réalisée par le biais de fournisseurs d'équipements industriels reconnus pour leur fiabilité.

Nos produits finis, les nanoparticules synthétisées, subissent des tests rigoureux de contrôle de la qualité avant leur distribution. Nous collaborons étroitement avec des laboratoires de recherche et développement (R&D) pour optimiser nos processus de production et garantir que nos produits répondent aux standards industriels les plus élevés.

En établissant des contrats à long terme avec nos partenaires et en maintenant un contrôle strict de la qualité à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement, nous assurons une gestion efficace de nos stocks et une livraison ponctuelle de nos produits finis. Notre engagement envers la qualité et l'innovation nous permet de répondre aux besoins spécifiques de nos clients dans diverses industries, y compris l'industrie pétrolière et gazière, la dépollution environnementale, le secteur médical, l'électronique et la construction.



3. La main d'œuvre

Pour le lancement du projet, nous avons identifié les rôles essentiels nécessaires pour démarrer l'entreprise et assurer son fonctionnement initial.

Le personnel minimum requis :

Fondateurs polyvalents (CEO, CTO, CFO) : 3, Ces fondateurs sont responsables de la vision, de la direction stratégique et de la gestion financière de l'entreprise, combinent plusieurs fonctions :

- CEO et Responsable des Ressources Humaines : Supervise la direction globale et gère les politiques de gestion des talents.
- CTO et Responsable de la R&D : Dirige la stratégie technologique et supervise l'innovation des produits.
- CFO et Responsable des Ventes : Gère les finances et dirige les stratégies de vente pour maximiser les revenus.



Opérateurs de production : 2, Ils seront chargés de la production initiale des nanoparticules synthétiques. En parallèle, ils effectueront les premiers tests de contrôle qualité sur le produit fini pour garantir sa conformité aux normes établies.

Ce personnel minimum sera nécessaire pour lancer et commencer les opérations de base. Au fur et à mesure que l'entreprise se développe et que la demande augmente, des embauches supplémentaires pourront être envisagées pour répondre aux besoins croissants de l'entreprise.

De plus, une fois opérationnelle, SANAvation créera environ 20 emplois directs et près de 40 emplois indirects. En contribuant ainsi à la création d'emplois, on jouera un rôle positif dans l'économie locale.

4. Les Principaux partenaires

- Les partenariats les plus importants dans notre cas sont au regard de l'importance de ses prestations et de la qualité des produits chimiques qu'ils proposent pour la réussite du projet.
- L'incubateur de l'ENP aussi qui fourni une aide précieuse au projet.





Cinquième axe

Plan financier

1. Les Coûts et charges



Rubrique	Coût DA
Frais d'établissement	500 000,00
Equipements de production	345 185,00
Frais d'installation	150 000,00
Frais de transport	150 000,00
Aménagements et maintenance	100 000,00
Matière première (100kg)	12 520 000,00
Emballage	115 000,00
Personnel	3 600 000,00
Assurances	30 000,00
Matériel et mobilier de bureau	200 000,00
Matériels informatiques	300 000,00
Logiciel, Licences,....	40 000,00
Immobilisations Incorporelles	30 000,00
Site web	100 000,00
TOTAL	18 180 185,00

1.1 Salaires du personnel pour les trois prochaines années

Fonction	Salaire (DZD)	
	Mensuel	Annuel
CEO et Responsable des Ressources Humaines	70 000,00	840 000,00
CTO et Responsable de la R&D	70 000,00	840 000,00
CFO et Responsable des Ventes	60 000,00	720 000,00
Opérateur de production 1	50 000,00	600 000,00
Opérateur de production 2	50 000,00	600 000,00
TOTAL	300 000,00	3 600 000,00

1.2 Le coût de la production des nanoparticules

N°	Désignation	Unité	Qtté	Prix unitaire (DZD)	Montant (DZD)
A	MATIÈRE PREMIÈRE (100g)				
01	Ammoniaque 30% (NH ₃) Liquide	L	2	2160	4320
02	L'eau distillée	L	15	30	450
03	Chlorure de fer hexahydraté	g	250	3950	3950
04	Sulfate ferreux ammoniacal	g	250	3800	3800
		TOTAL			12 520
B	ÉQUIPEMENTS DE LABORATOIRE				
01	Verrerie	TOTAL			72900
02	Agitateur magnétique	Un	01	20250	20250
03	Distillateur	Un	01	54000	54000
04	Balance	Un	01	20250	20250
05	pH Mètre	Un	01	13500	13500
06	Centrifugeuse	Un	01	81000	81000
07	Étuve	Un	01	81000	81000
08	Aimants	Un	04	200	800
09	Spatules	Un	03	270	810
10	Cuillères	Un	03	225	675
		TOTAL			345 185,00

2. Les investissements amortissables

	Dotation		
	Année 1 (DZD)	Durée (année)	Montant (DZD)
Équipements de production	345 185,00	5	69 037,00
Matériel et mobilier de bureau	200 000,00	5	40 000,00
Matériels informatiques	300 000,00	4	75 000,00
TOTAL	845 100,00		184 037,00

3. Le Chiffre d'affaires prévisionnel

Production annuelle des NPs (Kg)	100
Unités annuelles vendues Kg	100
Prix unitaire (DZD/Kg)	200 000,00
Chiffre d'affaires annuel (DZD)	20 000 000,00

4. Potentiel de croissance

Rubriques	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4
Chiffre d'affaires (DZD)	20 000 000,00	22 000 000,00	24 200 000,00	27 830 000,00
Evolution	/	10%	10%	15%

5. Évaluation de la rentabilité

En DZD	Année 1	Année 2	Année 3
Chiffre d'affaires (DA)	20 000 000,00	22 000 000,00	24 200 000,00
Coût de production	12 520 000,00	13 772 000,00	15 149 200,00
Marge brute	7 480 000,00	8 228 000,00	9 050 800,00
Personnel	3 600 000,00	3 600 000,00	3 600 000,00
Loyer	500 000,00	500 000,00	500 000,00
Charges électricité, gaz, eau	90 000,00	99 000,00	109 000,00
Maintenance	60 000,00	60 000,00	60 000,00
Frais de transport	150 000,00	150 000,00	150 000,00
Frais administratifs	100 000,00	100 000,00	100 000,00
Frais d'installation	150 000,00	/	/
Site web	100 000,00	/	/
Excédent brut d'exploitation (EBE)	2 730 000,00	3 719 000,00	4 531 800,00
Dotation aux amortissements	184 037,00	184 037,00	184 037,00
Résultats avant impôt (RAI)	2 545 963,00	3 534 963,00	4 347 763,00
Impôt sur le bénéfice des sociétés (IBS-19%)	483 733,97	671 642,97	826 074,97
Résultat net	2 062 229,03	2 863 320,03	3 521 688,03

6. Retour sur investissement

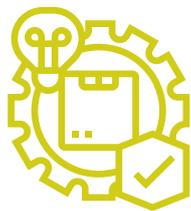
Calcul du ROI (Retour sur investissement)	
Chiffre d'affaires	20 000 000,00
Total des coûts	18 180 185,00
CA-CT	1 819 815,00
ROI	10,01%



Business Model Canva

Le Business Model Canvas est un outil stratégique de gestion utilisé pour décrire, concevoir, évaluer et développer les modèles économiques d'une entreprise et les nouveaux modèles d'affaires. Il est également un outil puissant pour structurer et analyser les modèles d'affaires, facilitant ainsi la compréhension et l'innovation au sein des entreprises.





Sixième axe

Prototype experimental

1. Objectif du prototype

Ce prototype expérimental vise à produire des nanoparticules d'oxyde de fer synthétiques, puis développer et valider leur intégration dans les fluides de forage, en servant l'industrie pétrolière et gazière. Ce projet vise à démontrer les améliorations techniques que ces nanoparticules peuvent apporter, notamment en optimisant les propriétés rhéologiques des fluides de forage et en réduisant le filtrat. En améliorant la viscosité et la stabilité des fluides, ainsi qu'en minimisant les pertes de filtrat, nous espérons offrir des solutions plus efficaces et durables pour les opérations de forage.

En outre, bien que l'objectif principal soit orienté vers l'industrie pétrolière et gazière, ce prototype servira également de base pour explorer le potentiel des nanoparticules d'oxyde de fer synthétiques dans divers autres secteurs industriels. Cette phase expérimentale permettra de recueillir des données précieuses et de mieux comprendre les applications possibles de ces nanoparticules dans différents contextes. À long terme, cela pourrait ouvrir la voie à de nouvelles utilisations innovantes et à des applications élargies dans d'autres industries.

Ainsi, ce prototype expérimental représente une étape nécessaire dans la validation de l'efficacité des nanoparticules de fer synthétiques pour améliorer les performances des fluides de forage, tout en jetant les bases pour des explorations futures dans une variété de contextes industriels.

2. Description du prototype

Les nanoparticules d'oxyde de fer obtenues par co-précipitation des ions fer dans un environnement alcalin possèdent des caractéristiques physico-chimiques remarquables. Ces particules, dont la taille varie généralement de 1 à 100 nanomètres, présentent des propriétés uniques dues à leur rapport surface/volume élevé, ce qui les distingue des particules de plus grande taille.

Ces nanoparticules affichent une taille nanométrique avec une distribution de taille homogène, offrant ainsi une uniformité exceptionnelle. En outre, elles possèdent des propriétés magnétiques distinctes, essentielles pour leur utilisation dans divers domaines. Leur conception permet une intégration efficace dans des formulations complexes, apportant des améliorations significatives aux performances et aux propriétés des systèmes dans lesquels elles sont utilisées.



Le prototype à l'étape finale des nanoparticules d'oxyde de fer

3. Processus de développement

Synthèse des nanoparticules d'oxyde de fer

Les nanoparticules d'oxyde de fer ont été synthétisées par un processus de co-précipitation des ions fer dans un environnement alcalin.

Tout d'abord, deux solutions distinctes ont été préparées en dissolvant des composés appropriés dans de l'eau déionisée. Ces solutions ont ensuite été mélangées lentement et goutte à goutte, tout en maintenant une agitation constante. Le pH de la solution a été maintenu dans une plage spécifique en utilisant un agent précipitant approprié. Cette manipulation a entraîné la co-précipitation des ions ferreux et ferriques, formant ainsi un précipité d'oxyde de fer.

Le précipité obtenu a été ensuite séparé du milieu réactionnel par centrifugation. Les nanoparticules ainsi obtenues ont été lavées plusieurs fois à l'eau déionisée pour éliminer les impuretés. Pour ce faire, un fluide presque clair a été obtenu après les premières étapes de nettoyage des particules à l'eau. Cependant, après plusieurs lavages à l'eau déionisée, la séparation des particules est devenue difficile, indiquant que le lavage devrait être arrêté pour éviter la perte de particules.

Les nanoparticules ainsi obtenues ont été stabilisées en les recouvrant d'un polymère spécifique, tel que le xanthane, afin d'empêcher leur agrégation.

Une fois le lavage terminé, le récipient contenant les nanoparticules a été séché dans une étuve à une température de 105°C.

4. Tests et expérimentations

Formulation du fluide de forage à base d'huile

Le fluide de forage a été formulé selon une recette standard compatible avec les puits pétroliers de la région de Hassi-Messaoud, avec un rapport huile/eau de 90/10. Les additifs ont été intégrés dans l'ordre suivant pour assurer une dispersion homogène et optimale de chaque composant : d'abord l'huile, suivie des émulsifiants, puis le réducteur de filtrat, le viscosifiant, le régulateur de pH, la saumure, et enfin l'agent alourdissant. Le temps de mélange pour tous les produits chimiques a été standardisé à une heure afin de garantir une homogénéité parfaite du mélange.

Les émulsifiants ont été ajoutés pour stabiliser la phase huile/eau, améliorant ainsi la stabilité globale du fluide. Le réducteur de filtrat a été intégré pour minimiser la perte de fluide dans les formations poreuses, tandis que le viscosifiant a été utilisé pour ajuster la viscosité du fluide, permettant un transport efficace des débris de forage à la surface. Le régulateur de pH a été ajouté pour maintenir un environnement alcalin. La saumure a été incorporée pour contrôler la densité et les propriétés osmotiques du fluide, et enfin, l'agent alourdissant a été ajouté pour augmenter la densité du fluide, ce qui est essentiel pour équilibrer la pression du puits et éviter les effondrements.

Pour formuler le fluide de forage à base de nanoparticules d'oxyde de fer (NP), des concentrations de 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % et 2,0 % en poids de NP ont été ajoutées lentement au fluide de base sous agitation constante pour assurer une incorporation homogène. La solution résultante, comprenant le fluide de forage de base avec les NP, a été mélangée pendant 10 à 15 minutes supplémentaires pour obtenir une répartition uniforme des NP dans tout le fluide de forage.

La dispersion uniforme des NP dans le fluide est essentielle pour maximiser leur efficacité et leur impact sur les performances globales du fluide de forage.

Enfin, les fluides de forage formulés ont été soumis à un vieillissement dans un four hot rolling à une température de 250°F pendant 16 heures.



Un fluide de forage à base d'huile OBM+NP

4. Tests et expérimentations

Formulation d'un fluide de forage à base d'eau

Le fluide de forage à base d'eau (WBM) a été élaboré selon une recette standardisée, spécialement conçue pour les conditions des puits pétroliers de la région de Hassi-Messaoud. Les additifs ont été incorporés dans un ordre précis pour assurer une dispersion uniforme et optimale : l'eau en premier, suivie des émulsifiants et des régulateurs de pH, puis des agents de suspension et des réducteurs de filtrat, et enfin des viscosifiants et des agents alourdissants. Le mélange a été agité pendant une demi-heure pour garantir une parfaite homogénéité du fluide.

Les émulsifiants ont été ajoutés pour stabiliser la phase huile/eau et améliorer la stabilité globale du fluide. Le réducteur de filtrat a été inclus pour minimiser la perte de fluide dans les formations poreuses, tandis que le viscosifiant a ajusté la viscosité pour faciliter le transport des débris de forage. Le régulateur de pH a maintenu un environnement alcalin, la saumure a régulé la densité et les propriétés osmotiques, et l'agent alourdissant a augmenté la densité du fluide pour équilibrer la pression du puits et prévenir les effondrements.

Pour intégrer les nanoparticules d'oxyde de fer (NP) dans le fluide, un mélange de Xanthan Gum et de NP à faible concentration a été ajouté progressivement sous agitation continue. La solution finale, comprenant le fluide de base et les nanoparticules, a été mélangée pendant 10 à 15 minutes supplémentaires pour assurer une distribution uniforme des NP. Une dispersion homogène est essentielle pour maximiser l'efficacité des nanoparticules et leur impact sur les performances du fluide de forage.

Enfin, les fluides de forage ont été soumis à un vieillissement dans un four hot rolling à 200°F pendant 16 heures pour simuler les conditions de forage réelles et évaluer la stabilité du mélange.



Un fluide de forage à base d'eau WBM+NP

Exploitation des résultats

Résultats du fluide de forage à base d'huile

Mesures	unité	Fluide de base OBM	Fluide de base +0,5% NP	Fluide de base +1% NP	Fluide de base +1,5% NP	Fluide de base +2% NP
L600/300	tr/min	31/19	31/19	33/21	34/20	33/19
L200/100	tr/min	14/9	14/9	15/10	15/10	14/9
L6/3	tr/min	4/3	4/3	5/4	5/4	4/3
G'/G''	lb/100ft ²	4/5	4/5	6/10	5/6	4/6
YP	lb/100ft ²	7	7	9	6	5
PV	cp	12	12	12	14	14
D	sg	1,39	1,38	1,38	1,38	1,38
ES	volts	1300,67	1318,67	1370	1389	1410
Filtrat HPHT	cc	5	5	3	2,8	4,4
Filtre cake	inch	02/32	02/32	<01/32	01/32	02/32

Discussion

- L'ajout de nanoparticules (NP) dans la formulation de boue améliore les propriétés rhéologiques, en particulier la viscosité et la résistance au cisaillement à basse vitesse. Les gains les plus significatifs sont observés jusqu'à une concentration de 1,5% de NP, après ça les améliorations deviennent marginales.
- Les résultats montrent que l'ajout de NP réduit la perte de filtrat et l'épaisseur du gâteau de filtration. La concentration optimale semble être autour de 1,5% de NP, au-delà de laquelle l'amélioration de la performance de filtration se stabilise.
- La stabilité électrique (ES) augmente de manière continue avec l'ajout de NP.
- Les nanoparticules n'ont pas d'effet significatif sur la densité de la boue. La densité reste stable, ce qui est un avantage pour maintenir une densité de circulation équivalente (ECD) constante lors du forage.

Synthèse

L'ajout de nanoparticules d'oxyde de fer jusqu'à une concentration de 1,5% dans les fluides de forage OBM montre une amélioration progressive et significative des propriétés rhéologiques, de filtration, et de stabilité électrique. Cependant, au-delà de 1,5%, les bénéfices atteignent un plateau, et des augmentations supplémentaires de NP peuvent même entraîner une légère diminution de la performance dans certains aspects. Ainsi, la concentration optimale pour maximiser les performances de la boue de forage semble être autour de 1,5% de nanoparticules. Ces améliorations permettent une meilleure gestion du fluide de forage sous des conditions exigeantes, avec une stabilité accrue et des performances optimisées.

Résultats du fluide de forage à base d'eau

Mesures	unité	WBM	WBM + (XG+Np)
L600/300	tr/min	31/19	33/21
L200/100	tr/min	14/9	15/10
L6/3	tr/min	4/3	5/4
G'/G''	lb/100ft ²	4/5	6/10
YP	lb/100ft ²	7	9
PV	cp	12	12
D	sg	1,38	1,38
Filtrat HPHT	cc	5	3
Filtre cake	inch	02/32	<01/32

Discussion

- La formulation enrichie (WBM + XG + NP) présente une contrainte de cisaillement plus élevée, en particulier à des vitesses de cisaillement élevées, ce qui indique une meilleure résistance et stabilité.
- L'ajout de XG et de NP améliore la performance de filtration, réduisant la perte de filtrat de 5 cc à 4,4 cc et l'épaisseur du gâteau de 02/32 inch à 01/32 inch, ce qui montre une meilleure capacité de la boue à contrôler les filtrations.
- La densité de la boue reste stable malgré l'ajout de NP, ce qui est avantageux pour maintenir une bonne gestion de la pression et éviter les problèmes de densité lors du forage.

Synthèse

L'enrichissement de la formulation WBM avec Xanthan Gum et des nanoparticules d'oxyde de fer améliore nettement les propriétés rhéologiques et la performance de filtration, sans altérer la densité de la boue. Ces modifications renforcent la stabilité et l'efficacité du fluide de forage, surtout dans des conditions de cisaillement élevées, ce qui peut être essentiel pour des opérations de forage plus contrôlées et efficaces.

Conclusion

- Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent que l'intégration de nanoparticules d'oxyde de fer dans les fluides de forage apporte des améliorations significatives dans le domaine de fluides de forage.
- L'intégration des nanoparticules d'oxyde de fer dans les fluides de forage présente des avantages considérables pour l'industrie pétrolière et gazière. Les améliorations des propriétés rhéologiques et de filtration contribuent à une meilleure performance des opérations de forage, en réduisant les risques de défaillance des fluides et en optimisant les conditions de forage. La capacité des nanoparticules à maintenir une densité stable et à améliorer la résistance à la chaleur et aux produits chimiques est particulièrement bénéfique pour les forages dans des environnements de haute température et haute pression. Ces améliorations peuvent entraîner des réductions significatives des coûts d'exploitation et une diminution des impacts environnementaux associés aux fluides de forage.
- Les travaux futurs pourraient se concentrer sur plusieurs axes pour approfondir les connaissances et maximiser les avantages des nanoparticules d'oxyde de fer dans les fluides de forage. Il serait pertinent d'explorer davantage l'optimisation des concentrations de nanoparticules et de tester leur effet dans une gamme plus large de conditions de forage. De plus, l'étude de la durabilité à long terme des fluides de forage contenant des nanoparticules, ainsi que leur impact environnemental, devrait être une priorité. Enfin, des recherches sur la fonctionnalisation des nanoparticules pour répondre à des besoins spécifiques de l'industrie pourraient ouvrir de nouvelles perspectives pour l'amélioration des fluides de forage et la gestion des ressources pétrolières et gazières.

Conclusion générale

En conclusion, Ce projet d'innovation de la production des nanoparticules d'oxyde de fer et les intégrer dans des formulations de fluide de forage présente des perspectives favorables. Avec un ROI estimé à environ 10,01% et un bénéfice total de 1 819 815,00 DA, il démontre une rentabilité potentielle.

En élargissant notre marché vers d'autres industries, qui peuvent bénéficier de nos produits de nanoparticules, nous visons à renforcer notre position de leader dans le secteur des nanoparticules. En ciblant des secteurs tels que l'industrie électronique, énergétique et environnementale, nous pourrions non seulement accroître notre volume de production, mais aussi améliorer notre position concurrentielle. Cette expansion stratégique nous permettra de répondre à une demande croissante et de promouvoir des innovations technologiques essentielles à ces industries.

Cependant, il est essentiel de surveiller en permanence les coûts opérationnels, la demande du marché et les tendances de consommation pour garantir la croissance continue de notre projet de nanoparticules. Des efforts marketing efficaces, soulignant les avantages uniques et les applications diverses de nos nanoparticules, ainsi que des partenariats stratégiques et des distributeurs clés, peuvent aider à stimuler les ventes et à renforcer notre position sur le marché.

Brevet classique Brevet
09:39:25 AM by HBOUALLEG
DE LA PROPRIETE INDUSTRIELLE



2024/001036 received at 24/07/2024
المعهد الوطني الجزائري للملكية الصناعية

REQUETE EN DELIVREANCE D'UN BREVET D'INVENTION
طلب منح براءة الإختراع

1	Nature de la demande de protection طبيعة الطلب	
	Brevet d'invention <input type="checkbox"/> Demande divisionnaire <input type="checkbox"/> Certificat d'addition <input type="checkbox"/> براءة الإختراع <input checked="" type="checkbox"/> طلب جزئي شهادة الإضافة	
	Extension de la demande internationale PCT الإمتداد عبر طلب دولي	
2	INFORMATION SUR LE DEPOSANT معلومات حول مقدم الطلب	71
	Dénomination: Ecole Nationale Polytechnique إسم الشركة	
	Forme juridique: EPCSCP الطبيعة القانونية	
	Secteur d'activité: service قطاع النشاط التجاري	
	Adresse: 10 rue des frères Oudek, El-Harrach 16200 العنوان	Wilaya: Alger :الولاية Commune: El-Harrach :البلدية
	Téléphone: 0551226749 رقم الهاتف	
3	CODE DU MANDATAIRE رمز الوكيل	74
	Nom du mandataire: /////////////// إسم الوكيل	
4	INFORMATIONS SUR 'INVENTEUR معلومات حول المخترع	72
	Nom et Prénom: AOUNE الإسم واللقب Sara	
	Nationalité: DZ_Algeria الجنسية	
	Adresse: 10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200 العنوان Alger	
	Fonction: Etudiant المهنة	
	E-mail: sara.aoune@g.enp.edu.dz البريد الإلكتروني	
5	DONNEES RELATIVES A LA PRIORITE بيانات الأولوية	30
	Date: /////////////// Numéro: /////////////// تاريخ رقم الأولوية	
	Pays d'origine: /////////////// البلد الأصلي	

6	TITRE DE L'INVENTION عنوان الإختراع	54
	Fluide de forage nanométrique intelligent à base d'eau introduisant les nanoparticules d'oxyde de fer	
7	DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION المجال التقني للإختراع	51
	////////////////////	
8	DONNEES RELATIVES AU DEPOT بيانات الإيداع	
	Date: 24 JUL. 2024 Heure: تاريخ الوقت	
	Numéro: 241036 رقم الإيداع	
9	DONNEES RELATIVES A LA DEMANDE INTERNATIONALE بيانات الطلب الدولي	72
	Date: Heure: تاريخ الوقت	
	Numéro: رقم	
10	DECHEANCE إبطال	
	La déchéance d'un brevet d'invention intervient en cas de non-acquittement, à la date anniversaire du dépôt, des taxes de maintien en vigueur, يسقط الحق على ملكية براءة الإختراع في حالة عدم تسديد الرسوم السنوية المستحقة	

CADRE RÉSERVÉ À L'INAPI
إطار خاص بالمعهد

AGENCE D'AGENCIEMENT D'ALGER
AGENCIEMENT DE BREVETS
Service Dépôt
DZP

SIGNATURE (CACHET)
توقيع

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المهنيين
استاذ: مختار بن عبد الوهاب

معلومات حول المخترع

Nom et Prénom: ZIREG
الإسم واللقب Nacira

Nationalité: DZ
الجنسية

Adresse: 10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200
العنوان Alger

Fonction Etudiant
المهنة

E-mail: nacira.zireg@g.enp.edu.dz
البريد الإلكتروني

280155

الجمعية الوطنية للمخترعين
والمخترعات
بمباركة
الجمعية الوطنية للمخترعين
والمخترعات

Brevet classique Brevet
12:39:59 PM BY HEOUALLEG
INSTITUT NATIONAL ALGERIEN
DE LA PROPRIETE INDUSTRIELLEBrevets d'invention 2024/001041 received at 24/07/2024
المعهد الوطني الجزائري للملكية الصناعية

REQUETE EN DELIVREANCE D'UN BREVET D'INVENTION

طلب منح براءة الاختراع

1	Nature de la demande de protection طبيعة الطلب Brevet d'invention Demande divisionnaire Certificat d'addition براءة الاختراع <input checked="" type="checkbox"/> طلب جزئي شهادة الإضافة Extension de la demande internationale PCT الإمتداد عبر طلب دولي	
2	INFORMATION SUR LE DÉPOSANT معلومات حول مقدم الطلب Dénomination: Ecole Nationale Polytechnique إسم الشركة Forme juridique: EPCSCP الطبيعة القانونية Secteur d'activité: service قطاع النشاط التجاري Adresse: 10 rue des frères Oudek, El-Harrach 16200 العنوان Wilaya: Alger الولاية Commune: El-Harrach البلدية	71
3	CODE DU MANDATAIRE رمز الوكيل Nom du mandataire: إسم الوكيل	74
4	INFORMATIONS SUR L'INVENTEUR معلومات حول المخترع Nom et Prénom: AOUNE الإسم واللقب Sara Nationalité: DZ_Algeria الجنسية Adresse: 10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200 العنوان Alger Fonction: Etudiant المهنة E-mail: sara.aoune@g.enp.edu.dz البريد الإلكتروني	72
5	DONNEES RELATIVES A LA PRIORITE بيانات الأولوية Date: تاريخ Pays d'origine: البلد الأصلي Numéro: رقم الأولوية	30
6	TITRE DE L'INVENTION عنوان الاختراع Procédé pour la fabrication des nanoparticules synthétiques d'oxyde de fer	54
7	DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION المجال التقني للاختراع	51
8	DONNEES RELATIVES AU DEPOT بيانات الإيداع Date: 24 JUL. 2024 التاريخ Heure: الوقت Numéro: 241041 رقم الإيداع	
9	DONNEES RELATIVES A LA DEMANDE INTERNATIONALE بيانات الطلب الدولي Date: التاريخ Heure: الوقت Numéro: رقم	72
10	DECHEANCE إبطال La déchéance d'un brevet d'invention intervient en cas de non-acquittement, à la date anniversaire du dépôt, des taxes de maintien en vigueur, يسقط الحق على ملكية براءة الاختراع في حالة عدم تسديد الرسوم السنوية المستحقة	

CADRE RÉSERVÉ À L'INAPI
إطار خاص بالمعهد

AGUIN Bahbia
مصلحة الإيداع
Chef de Service pô
D Z P

SIGNATURE (CACHET)
توقيع

المعهد الوطني الجزائري للملكية الصناعية
المعهد الوطني للملكية الصناعية
مختار عبد الوهاب

معلومات حول المخترع

Nom et Prénom:	ZIREG
الإسم واللقب	Nacira
Nationalité:	DZ
الجنسية	
Adresse:	10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200
العنوان	Alger
Fonction	Etudiant
المهنة	
E-mail:	nacira.zireg@g.enp.edu.dz
البريد الإلكتروني	

010101

الجمعية الوطنية للمخترعين والاختراعات
National Association of Inventors and Inventions
10 Rue Larbi BEN M'HIDI, Alger | E-mail: info-dpitt@inapi.org | Web: www.inapi.org

Nom et Prénom:	ZIREG
الإسم واللقب	Nacira
Nationalité:	DZ
الجنسية	
Adresse:	10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200
العنوان	Alger
Fonction	Etudiant
المهنة	
E-mail:	nacira.zireg@g.enp.edu.dz
البريد الإلكتروني	

Brevet classique Brevet
11:30:48 AM by kmarrir:km
INSTITUT NATIONAL ALGERIEN
DE LA PROPRIETE INDUSTRIELLE



2024/001050 received at 28/07/2024
المعهد الوطني للملكية الصناعية

REQUETE EN DELIVREANCE D'UN BREVET D'INVENTION
طلب منح براءة الاختراع

1	<u>Nature de la demande de protection</u> طبيعة الطلب	
Brevet d'invention Demande divisionnaire Certificat d'addition براءة الاختراع <input checked="" type="checkbox"/> طلب جزئي شهادة الإضافة		
Extension de la demande internationale PCT الإمتداد عبر طلب دولي		
2	<u>INFORMATION SUR LE DEPOSANT</u> معلومات حول مقدم الطلب	71
Dénomination: Ecole Nationale Polytechnique إسم الشركة		
Forme juridique: EPCSCP الطبيعة القانونية		
Secteur d'activité: service قطاع النشاط التجاري		
Adresse: 10 rue des frères Oudek, El-Harrach 16200 العنوان		Wilaya: Alger :الولاية Commune: El-Harrach :البلدية
Téléphone: 0551226749 رقم الهاتف		
3	<u>CODE DU MANDATAIRE</u> رمز الوكيل	74
Nom du mandataire: /////////////// إسم الوكيل		
4	<u>INFORMATIONS SUR L'INVENTEUR</u> معلومات حول المخترع	72
Nom et Prénom: AOUNE الإسم واللقب Sara		
Nationalité: DZ_Algeria الجنسية		
Adresse: 10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200 العنوان Alger		
Fonction: Etudiant المهنة		
E-mail: sara.aoune@g.enp.edu.dz البريد الإلكتروني		
5	<u>DONNEES RELATIVES A LA PRIORITE</u> بيانات الأولوية	30
Date: /////////////// Numéro: /////////////// تاريخ رقم الأولوية		
Pays d'origine: /////////////// البلد الأصلي		

6	<u>TITRE DE L'INVENTION</u> عنوان الاختراع	54
Fluide de forage nanométrique intelligent à base d'huile introduisant les nanoparticules d'oxyde de fer		
7	<u>DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION</u> المجال التقني للاختراع	51
////////////////////		
8	<u>DONNEES RELATIVES AU DEPOT</u> بيانات الإيداع	
Date: 28 JUL, 2024 Heure: تاريخ الوقت		
Numéro: 241050 رقم الإيداع		
9	<u>DONNEES RELATIVES A LA DEMANDE INTERNATIONAL</u> بيانات الطلب الدولي	72
Date: Heure: تاريخ الوقت		
Numéro: رقم		
10	<u>DECHEANCE</u> إبطال	
La déchéance d'un brevet d'invention intervient en cas de non-acquittement, à la date anniversaire du dépôt, des taxes de maintien en vigueur, يسقط الحق على ملكية براءة الاختراع في حالة عدم تسديد الرسوم السنوية المستحقة		

CADRE RÉSERVÉ À L'INAPI
إطار خاص بالمعهد
AGUINI Dabbia
مصلحة الإيداع
Chef de Service Dépôt
DZP

SIGNATURE (CACHET)
المعهد الوطني للملكية الصناعية
موقع / توقيع
السيد
عبد الوهاب

معلومات حول المخترع

Nom et Prénom: ZIREG
الإسم واللقب: Nacira

Nationalité: DZ
الجنسية: DZ

Adresse: 10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200
العنوان: Alger

Fonction: Etudiant
المهنة: Etudiant

E-mail: nacira.zireg@g.enp.edu.dz
البريد الإلكتروني: nacira.zireg@g.enp.edu.dz