

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère De L'enseignement Supérieur

Et De La Recherche Scientifique

Université El Chahid Hamma Lakhdar, El Oued

Faculté De La Technologie

Département De Génie Des Procèdes Et Pétrochimie

Mémoire De Fin D'étude Présenté Pour L'obtention

Du Diplôme De :

Master Académique

Domaine : Science et technologie

Secteur : Méthodes et ingénierie
pétrochimique

Spécialité : Génie chimique

Thème

Évaluation des impacts des nanoparticules sur les propriétés des fluides de forage des boues à base d'eau

Présenté par :

- Benzaoui Nousseiba
- Slimani Manar
- Messaoudi Chifa

Président	Université d'El Oued	Soroti Abd Al Ghani
Examineur	Université d'El Oued	Bouafai Abd Rahman
Encadreur	Université d'El Oued	Khaled bilel

Année :2023 /2024

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu tout-puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté d'entreprendre cette recherche, puis nous exprimons notre gratitude et nos remerciements à notre professeur" Khaled Bilal " pour son encadrement, ses encouragements et ses précieux conseils.

Nous tenons également à remercier les membres du comité de discussion pour leur écoute, et enfin nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les membres de notre famille, à nos amis et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

إهداء

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها ان تكون، لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق مخفوا بالتسهيلات لكني فعلتها
ونلتها.

ها انا اليوم انظر الى حلما طال انتظاره وقد أصبح واقع افتخر به.

الى نفسي العظيمة القوية التي تحملت كل التعثرات واكملت رغم الصعوبات

الى ذلك الرجل العظيم الى من كان عمودي الفقري الذي ساندني بكل بحب في ضعفي الى اول من انتظر هذه
اللحظات ليفتخر بي الى من اعطاني ولم يزل يعطيني بلا حدود الى سندي (والذي عبد الكريم) ادامك الله ظلا لنا.
الى التي تعجز كل الكلمات عن وصفها الى التي كانت النور في عمتي الى التي كان دعائها سر نجاحي الى من
كانت سندي وضلعي الثابت الذي لا يميل (امي لطيفة).

الى من قيل فيهم "سنشد عضدك بأخيك" الى اخوتي الذين امنوا بقدراتي ودعموها وقدروها اخوتي (اسماء) و
(يمنى)، الى من غاب عني ولم يغيب عن ذاكرتي الى من تمنيت وجوده معي لألبسه لباس التخرج معي الى من
شاءت الاقدار ان يكون طيرا من طيور الجنة الى اخي وحببي الوحيد (اسلام) رحمه الله.

الى امي الثانية (عمتي منى) من كانت السند وقت المحنة الى من ابدلت عبارات ان العمات عقارب الى من
احتوتنا.

لمن تشاركنا عناء الوصول الى لحظة النجاح لمن تعبنا سهرنا ودرسنا معا الى من اصفنا لعائلتنا لقب المهندسات
الكيميائيات الى ابناء عمتي اللواتي تشاركنا معا المذكرة (نسيبة وشفاء).

منار

إهداء

أهدي عملي هذا وثمار جهدي إلى من هم أعز وأغلى على قلبي دائما وأبدا

أمي الغالية حبيبة قلبي المرأة الشجاعة الصبورة المجاهدة والتي لا تكفيها الكلمات لوصفها ونور دربي ومصدر قوتي في جميع مراحل مشواري الدراسي وسبيل وصولي إلى أعلى الدرجات بعد الله سبحانه وتعالى لمن كانت دعواتها سبب في شق طريق النجاح لي

وأبي الحنون الغالي الذي كان يحارب ويسعى من أجلي وقدم لي كل شي وعمل وتعب من أجلي وقدم لي كل حياته وأشعل لي قناديل تضيء عتمة حياتي والذي لا أوفيه ولو القليل من تعبته وكفاحه عليا وأرجو من الله تعالى أن يجازيهم كل خير عني ويرفعهم درجات عنده ويطيل في عمرهما

وأهدي كذلك هذا العمل إلى أخوتي الغاليين على قلبي وروحي دعاء وآمنة وأخي العزيز الصادق الأمين الذين أسأل الله ان يوفقهم جميعا ويحفظهم لي ولكل أهلي وأقاربي كل باسمه لمن كانوا سنداً لي وبجانبني وإلى أصدقائي الذين كانوا خير صحبة لي

لمن تشاركنا عناء الوصول الى لحظة النجاح لمن تعبنا سهرنا ودرسنا معا الى من اصفنا لعائلتنا لقب المهندسات الكيميائيات الى ابنة خالي {منار} وابنت خالتي {نسيبة} تشاركنا معا المذكرة. لرفقاء السنين واصحاب الشدائد والازمات بهم اتشفى وأنسى الطريق وبهم اكتملت لذة الوصول(صديقاتي).

شفاء

إهداء

نلتها وعانقت اليوم مجدداً عظيماً، فعلتها بعد إن كانت مستحيلة كانت دروبا قاسيه وطرقا خسرت بها الكثير ولكني وصلت "الحمد لله حبا وشكراً وامتناناً، الحمد لله الذي بفضلله أدركت أسمى الغيات انظر لنفسي ونجاحي كالذي ينظر الى معجزته الى الحلم الذي طال انتظاره وتحقق بفضل الله وأصبح واقعا افتخر به"

الى العزيز الذي حملت اسمه فخراً، يردد اسمي عالياً في عنان السماء حاملاً شرف لقبك، وبكل اعتزاز انا لهذا الرجل العظيم ابنة الى من كله الله بالهيبه والوقار، ومن دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل الى من علمني أن الدنيا كفاح وصبر سلاحها العلم والمعرفة الى من غرس في روحي مكارم الأخلاق داعمي الأول في مسيرتي وسندي وقوتي وملاذي بعد الله فخري واعتزازي ابي

{عبد اللطيف} حفظه الله.

من أضاءت لي في ليالي العتمة طريقي، الى من أفنت عمرها في سبيل أن أحقق طموح اعلو به في اعلى المراتب الى من سهرت وساندت وكافحت وتفانت دوما الى نبراس ايامي وهج حياتي، الى من ظلت دعوتها تحاوطني، الى من مهدت لي طريق العلم من كانت ملجئ في حياتي قبل دراستي الى اختي وصديقتي ومعلمتي ودكتورتي الأولى أمي {كلثوم} حفظها الله.

من قيل فيهم {سنشد عضدك بأخيك}

إلى ملهمي نجاحي صناع قوتي صفوة ايامي وسلوة اوقاتي التفات الى الشموع التي تنير لي الطريق إلى قرة عيني من اخواني {صابر، الياس، هاني}

لمن تشاركنا عناء الوصول الى لحظة النجاح لمن تعبنا سهرنا ودرسنا معا الى من اصفنا لعائلتنا لقب المهندسات الكيميائيات الى ابنة خالي {منار} وابنت خالتي {شفاء} تشاركنا معا المدكرة.

لرفقاء السنين واصحاب الشدائد والازمات بهم اتشفى وأنسى الطريق وبهم اكتملت لذة الوصول (صديقاتي).

نسبية

Résumé :

Cette étude vise à évaluer l'application de nanoparticules de différents types dans le domaine du pétrole, en particulier leurs applications aux fluides de forage pour trouver des solutions prometteuses afin d'améliorer les performances du processus de forage et de donner une grande efficacité à la production de pétrole. Notre recherche s'est donc limitée à étudier l'effet de certaines nanoparticules sur les propriétés des fluides de forage à base d'eau en citant des études antérieures après leur présentation, leur explication et leurs résultats afin de prouver et de démontrer le succès de l'application de ces particules.

Mots clés : Bentonite, Fluide, Nanoparticules, Effect, Forage Pétrolier...etc.

Abstract:

This study aims to evaluate the application of nanoparticles of different types in the petroleum field, in particular their applications to drilling fluids to find promising solutions to improve the performance of the drilling process and give high efficiency to oil production. Our research has therefore been limited to investigating the effect of certain nanoparticles on the properties of water-based drilling fluids, citing previous studies after their presentation, explanation and results in order to prove and demonstrate the successful application of these particles.

Keywords : Bentonite, Liquide, Nanoparticules, Effect, Forage Pétrolier...etc.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تثمين عملية تطبيق الجسيمات النانو متريّة بمختلف أنواعها في مجال النفط وبالأخص تطبيقاتها على سوائل الحفر إلى إيجاد حلولاً واعدة في تحسين أداء عملية الحفر ومنح كفاءة عالية في إنتاج النفط، فاقترص بحثنا عن دراسة تأثير بعض الجسيمات النانو متريّة على خصائص سوائل الحفر ذات الأساس المائي من خلال الاستشهاد بدراسات سابقة بعد عرضها وشرحها وذكر نتائجها للبرهان والإدلال على نجاح تطبيق هذه الجسيمات.

الكلمات المفتاحية: بنتونايت، سائل، الجسيمات النانوية، التأثير، التنقيب عن النفط... الخ.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale.....	16
.....	18
Partie01	18
Théorique	18
Chapiter I :	19
Généralités sur le forage pétrolier	19
1.Historique :	4
2.La Définition de forage :	4
3.Les types de tours de forage :	4
4.Principe de base du procédé de forage :	6
5.Forage rotary :	6
6.Pièces et composants de la tour de forage :	7
7.Définition de fluide du forage :	11
8.Rôle du fluide de forage :	11
9.Différents types de fluides de forage et leur composition :	14
10.Composition de boues de forage :	18
11 .Système de circulation :	19
Chapitre II :	21
La nanotechnologie	21
1.Histoire de la nanotechnologie :	20
2.définition de la technologie nano :	20
3.dimensions nanométriques	21
4.Les formes des nanostructures.	22
6. Principes et caractéristiques des nanotechnologies	28

7.Méthodes de préparation des nanomatériaux :.....	28
8 .Les propriétés importantes des nanomatériaux :	30
9.Les raisons des différentes propriétés des nanoparticules :.....	31
10.Les objectifs futurs de la nanotechnologie :	32
.....	27
Partie02	27
Bibliographique	27
Chapitre III :	28
Application des nanoparticules dans la boue de forage	28
1.Matériel et méthode :	36
2.Résultats :	41
Conclusion Générale	61
Conclusion Générale :	91
Références bibliographique	91

Liste des Abréviations

MWD : Mesures pendant le forage

AVA : American Viti cultural area

PT : Point unité de volume de mesure pour Les liquides

CMC : compostage microbien contrôle

HVT : High value transits

LCM : Lymphome des cellules du manteau

WBM: Water-Based drilling

OBM: Original brand manufactures

API: American Petroleum Institute

XG: Gomme Xanthane

PAC-FV : cellulose poly anionique à faible viscosité

LR : Limite de ramollissement

PAC : cellulose poly anionique

HPHT : Haute pression Haute température

API PL : API Perte de filtration

BPBT : Basse pression Basse température

HG : Gilson ite hydrophile

PL : Perte de filtration

HGN : Nanoparticule de Gilson ite hydrophile

PV : Viscosité Plastique

Gel-0 : Force du gel après 10 s

Gel-10 : Force du gel après 10 min

AV : Viscosité Apparente

PHBS : Boue de bentonite pré hydratée

NP : Nanoparticules

MNP : α -MnO₂ Nanoparticules

Tr/min : Rotations par minute

Gel-0 : Force du gel après 10 s

Gel-10 : Force du gel après 10 min

Les unités :

1Psi : 6894.76 Pa

1tr/min : 1.7034 S⁻¹

1in: 0.0254m

lbs./100ft² Pounds per 100 square feet

Liste de figures

Figure 1:Types de tours de forage .	5
Figure 2:Schéma d'une structure de forage rotatif.....	7
Figure 3: système de levage et de rotation.	8
Figure 4: système de circulation de la boue	9
Figure 5:la composition du système de contrôle des puits.....	10
Figure 6: système de production d'électricité.....	11
Figure 7: Circuit de la boue de forage.....	20
Figure 8:A Nano flocons ou couches (unidimensionnels), B cylindres ou tubes (bidimensionnels) et C nanoparticules (tridimensionnels).	21
Figure 9: Point une quantité tridimensionnelle de cristaux.	22
Figure 10: Fullerène C60 sous forme moléculaire. Fullerène C60 sous forme cristalline. ...	23
Figure 11: Nano sphère.....	23
Figure 12: Nano billes	23
Figure 13: Nano sphères.	24
Figure 14: Différentes formes de nanoparticules.	24
Figure 15: Un ensemble de tubes de nucléotides imbriqués ayant des propriétés différentes.	25
Figure 16: Microscope à nano fils de silicium.....	25
Figure 17: Nanofibres.	26
Figure 18: Nano composite.	27
Figure 19: Cours sur la fabrication des nanomatériaux.....	29
Figure 20: méthodes de catalyse des nanomatériaux.	30
Figure 21: Viscosité en fonction du taux de cisaillement avant le laminage à chaud et après laminage à chaud.	42
Figure 22: Propriétés rhéologiques de la boue de base de 80 lb/pi3 et des échantillons (a) PV et (b)LR.....	44

Figure 23: Tendence de la viscosité plastique pour les échantillons expérimentaux avec différents nanomatériaux.	47
Figure 24: Le comportement de la propriété LR pour les nanomatériaux - WBDF à différentes fractions massiques (R, ZrO₂ et hybrides MWNT-TiO₂ référencés à l'axe Y gauche et FMWCNTs sur l'axe Y droit).	48
Figure 25: Résistance du gel de WBDF contenant différents nanomatériaux déterminée en (A) initial pour une durée de 10 s - et (B) final pour une durée de 10 min (R, ZrO₂ et hybrides MWNT-TiO₂ sur l'axe Y gauche et FMWCNT sur l'axe Y droit).	49
Figure 26: Images photographiques de 0,5 % en poids de FMWCNT, (A) gâteau de boue formé dans un environnement HPHT (B) Ajout dans de l'eau douce.	50
Figure 27: Paramètres rhéologiques des fluides de forage avant et après laminage à chaud à 100 °C pendant 16 h (AV Viscosité apparente, PV Viscosité plastique, YP Point d'écoulement, GS Force du gel, Gel-0 GS initial, Gel-10 10 min ou GS final).	51
Figure 28: Volumes de filtrat de boue des échantillons expérimentaux avec diverses nanoparticules (A) : Les environnements LPLT et (B) HPHT (hybrides MWNT-TiO₂ et ZrO₂ sur l'axe Y gauche et FMWCNT sur l'axe Y droit).	56
Figure 29: Perte de fluide HPHT des formulations de boue contenant des nanoparticules avant et après le laminage à chaud.	60
Figure 30: 10 pH et conductivité électrique des fluides de forage avant laminage à chaud (A et B) et après laminage à chaud (C et d) à 100 °C (mesurés à la température ambiante, c'est-à-dire 25 °C).	63

Liste des tableaux

Tableau 1: Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage.	15
Tableau 2: Les avantages et inconvénients de La boue à base d'eau.	16
Tableau 3: Avantages et inconvénients de la boue à base d'huile.	17
Tableau 4: types caractéristiques, compositions et domaines d'utilisation des boues à huile.	19
Tableau 5: Principes et caractéristiques des nanotechnologies.	28
Tableau 6: Échantillons de fluide de forage et titres abrégés	40
Tableau 7: Paramètres rhéologiques de divers échantillons expérimentaux	46
Tableau 8: Caractéristiques rhéologiques et de perte de filtration du WBMS 80 lb ft. (NC : Non calculé).....	54
Tableau 9: Propriétés de filtration de diverses nanoparticules dans de faibles conditions. .	55
Tableau 10: Caractéristiques de filtration des fluides de forage avec différents types de nanomatériaux Et concentrations dans des conditions HPHT (6894,75 kPa et 176,67 C). ..	59
Tableau 11: La conductivité électrique des échantillons expérimentaux conçus dans le cadre de cette recherche.	61

Introduction générale



Introduction générale :

L'utilisation de nanoparticules dans les fluides de forage à base d'eau offre des solutions prometteuses pour optimiser leurs propriétés. En fonction des conditions géologiques de la zone de forage, la composition et la concentration du fluide sont déterminées[1]. Pour comprendre le fluide et son impact sur l'industrie pétrolière, l'optimisation de la composition et de la performance du fluide de forage peut contribuer de manière significative à l'augmentation de la productivité et à l'amélioration de l'efficacité des opérations de forage[2].

Les propriétés du fluide de forage sont une variable sensible qui doit être soigneusement surveillée et contrôlée à toutes les étapes du processus de forage[3]. L'industrie pétrolière nécessite des technologies avancées pour garantir son succès, car elle comprend des processus d'exploration et d'évaluation pour identifier les sites potentiels[4].

La nanotechnologie est l'une des technologies les plus importantes qui entrent dans de multiples domaines, car ces particules ont des propriétés différentes des matériaux à partir desquels elles sont formées. L'intérêt a augmenté ces dernières années dans la production de nanomatériaux organiques sur des composés métalliques en raison de leurs utilisations dans divers domaines. La révolution de la nanotechnologie doit ses progrès au grand développement qui s'est produit dans plusieurs utilisations pour réaliser et étudier l'effet des nanoparticules sur les propriétés des liquides[5].

Après avoir recherché et parcouru de nombreuses références et compilé des informations, nous avons divisé le mémoire en trois chapitres :

Le premier chapitre : Consacré au forage pétrolier et dédié aux fluides de forage.

Chapitre II : couvrant la technologie nanométrique.

Chapitre III : L'application des nanoparticules aux boues de forage à base d'eau.



Partie01

Théorique



Chapiter I :
Généralités sur le forage
pétrolier



1. Historique:

Le pétrole et le gaz naturel sont utilisés de diverses manières depuis plus de 5 000 ans. Cependant, la plupart des historiens s'accordent à dire que l'industrie pétrolière moderne a débuté dans l'ouest de la Pennsylvanie en août 1859, lorsque le légendaire colonel Edwin Drake a découvert du pétrole dans Oil Creek. Ce que peu de gens savent, c'est qu'à la même époque, la Gaspé Bay Mining Compagnie opérait au nord de la rivière York, à quelques kilomètres du canton de Gaspé. La nouvelle de la découverte de Drake s'est largement répandue et les prospecteurs forent déjà dans le grès de Gaspé, d'où s'écha naturellement un petit pétrole de couleur ambrée. Bien que l'histoire de l'exploration pétrolière et gazière au Québec soit intéressante, beaucoup de Québécois la connaissent mal. Il est d'ailleurs surprenant de constater que l'un des premiers puits d'exploration pétrolière en Amérique du Nord a été foré au Québec. Célèbre pour ses poissons, ses rivières, ses montagnes et ses plages, la Gaspésie a été une région pionnière en matière d'exploration pétrolière et gazière en Amérique du Nord [6].

2. La Définition de forage :

Le forage est l'utilisation d'un ensemble d'équipements et de constructions nécessaires pour pénétrer dans la croûte terrestre à l'aide de systèmes de forage formant une cavité cylindrique. Le forage dépend du type de puits et du programme prévu, et les types de puits forés sont déterminés par la richesse du sous-sol, comme un puits de pétrole, un puits de gaz ou un puits d'eau [7].

3. Les types de tours de forage :

Les tours de forage sont un point de repère bien connu dans l'ingénierie pétrolière, car elles réalisent la phase la plus difficile d'un investissement pétrolier, à savoir la phase de forage. Les tours de forage varient en fonction de l'endroit où elles sont utilisées, de la profondeur du puits et de la nature de la roche dans la zone où le puits doit être foré. Les tours sont similaires dans les sections principales du puits et diffèrent dans les sections secondaires et les types de têtes de forage utilisées.

La tour de forage est la plus répandue et dispose de différentes puissances.

(Puissance) et se décline en plusieurs tailles :

1. Tours légères (light) : profondeurs de forage de 1000 à 1500 mètres.
2. Tours moyennes (medium) : profondeurs de forage de 1 200 à 3 000 mètres.

3. Tours lourdes (Heavy Duty Towers) Lourdes (Healy) : profondeurs de forage de 3500 - 5000 mb
4. Tours ultralourdes : (5500 - 7500 mb)[8].

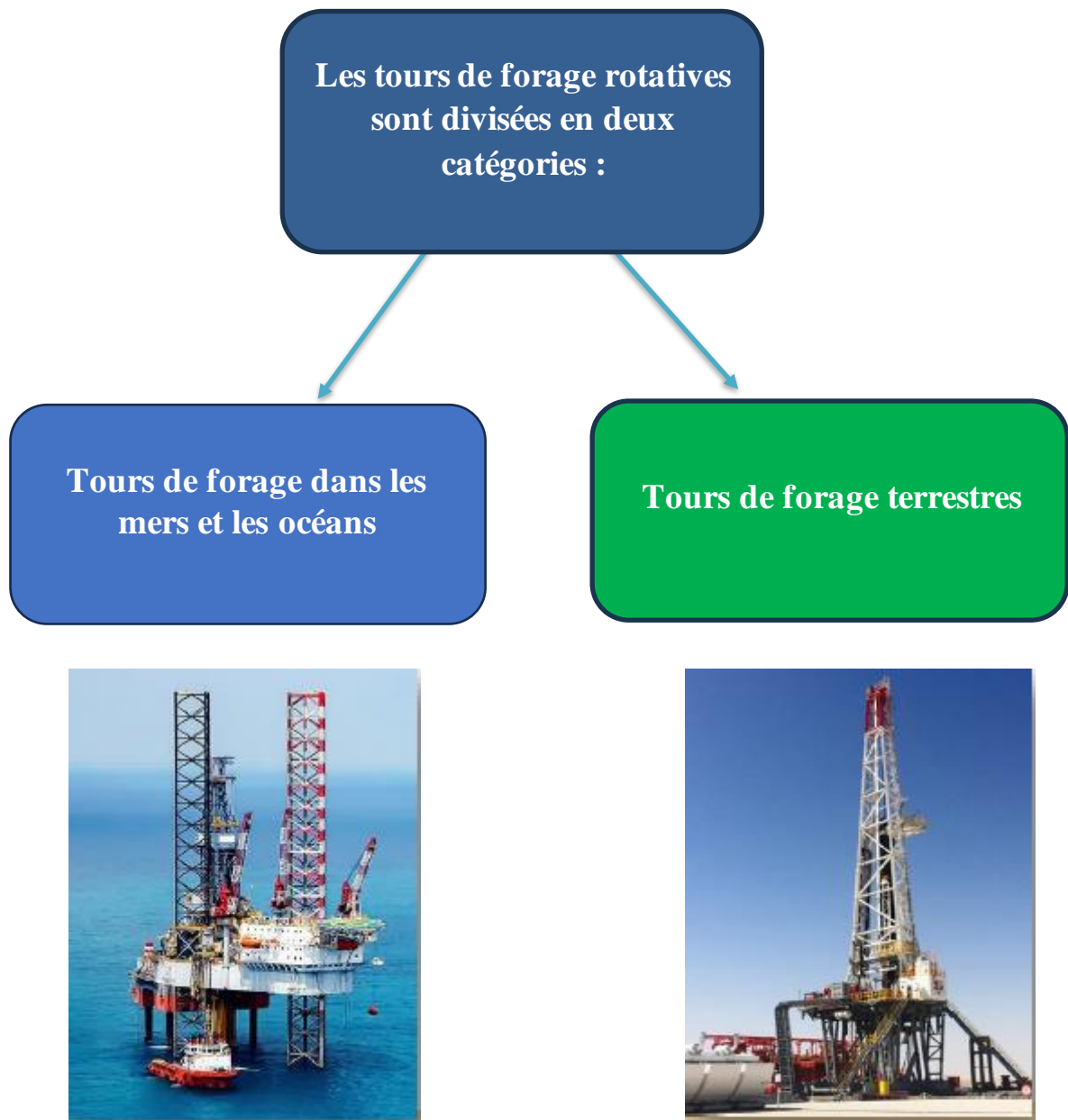


Figure 1:Types de tours de forage [8].

4.Principe de base du procédé de forage :

Le forage rotatif est une méthode couramment utilisée dans l'industrie pétrolière et gazière pour créer des puits dans le sol. Le processus implique la rotation d'une tige de forage, qui contient le trépan, ainsi que la circulation d'un fluide de forage dans la tige. Ce fluide, généralement de l'eau ou de la boue, est utilisé pour refroidir le trépan, nettoyer le puits et transporter les débris à la surface. Le trépan est conçu pour pénétrer dans le sol en utilisant la pression, la rotation et les vibrations. La tour de forage suspend la tige de forage et peut être réglée en hauteur pour permettre de contrôler la profondeur du trou. Ce processus est répété en ajoutant de nouvelles sections de tiges de forage pour atteindre des profondeurs plus importantes. Le forage rotatif est largement utilisé dans l'exploration, la production et l'injection d'hydrocarbures dans l'industrie pétrolière et gazière. C'est l'une des méthodes les plus efficaces pour extraire des ressources naturelles vitales et les convertir en sources d'énergie précieuses[9] .

5.Forage rotary :

La plupart des puits de pétrole utilisent aujourd'hui une technique de forage appelée "forage rotatif", qui est apparue pour la première fois dans les années 1930. Ce type de technologie consiste en une série de tiges reliées entre elles par des raccords filetés en forme de cône (comme le montre la figure I.2). Le mouvement de rotation est dirigé vers l'outil utilisé pour le forage (TOB) par un moteur électrique suspendu ou une table rotative suspendue, qui fournit le couple nécessaire pour surmonter la résistance de la roche. La vitesse de rotation est généralement mesurée en tours par minute (RPM).

Pour forer une formation rocheuse, un poids sur l'outil de forage (WOB) d'environ 10 tonnes doit être placé en ordre de grandeur. Comme les tiges de forage pèsent généralement 200 tonnes, les équipements de surface sont conçus pour retenir une grande partie de ce poids. Le foreur ajuste la tension de surface, contrôlant ainsi la progression de l'outil de forage. Pour ce faire, il utilise des freins reliés au moteur qui gère la rotation de l'outil de forage. L'étanchéité est confirmée par l'utilisation de baguettes d'étanchéité, qui ont un diamètre extérieur d'environ 10 cm, une épaisseur de 2 cm et une longueur typique de 10 mètres. Pour les raccords, ils ont généralement un diamètre extérieur de 15 cm, une épaisseur de 5 cm et une longueur de 50 cm. En raison de la nécessité d'appliquer un poids sur l'outil pour le faire avancer, le fond de l'accouplement est en compression. On utilise donc des barres plus lourdes et plus résistantes à la pression, qui forment un groupe connu sous le nom de "BHA". Ces barres ont généralement un diamètre extérieur de 25 cm, une épaisseur de 10 cm et une longueur de 10 mètres. Les tiges de

pression de fond ont généralement une longueur comprise entre 50 et 200 mètres. Les obturateurs verticaux sont dimensionnés de manière à ce que le point neutre entre les parties traction et compression du joint se trouve au sommet de la connexion verticale de compression et de compression. Cependant, dans les puits horizontaux, l'importance du frottement transversal minimise le transfert de poids à l'outil de forage. Dans certains cas, il est nécessaire de placer une section du tube en compression, ce qui augmente le risque de torsion. La boue de forage est injectée dans les tiges à un débit compris entre 1 000 et 4 000 litres/min, puis passe à travers les buses de l'outil de forage pour transférer les déblais de forage dans l'espace annulaire[10].

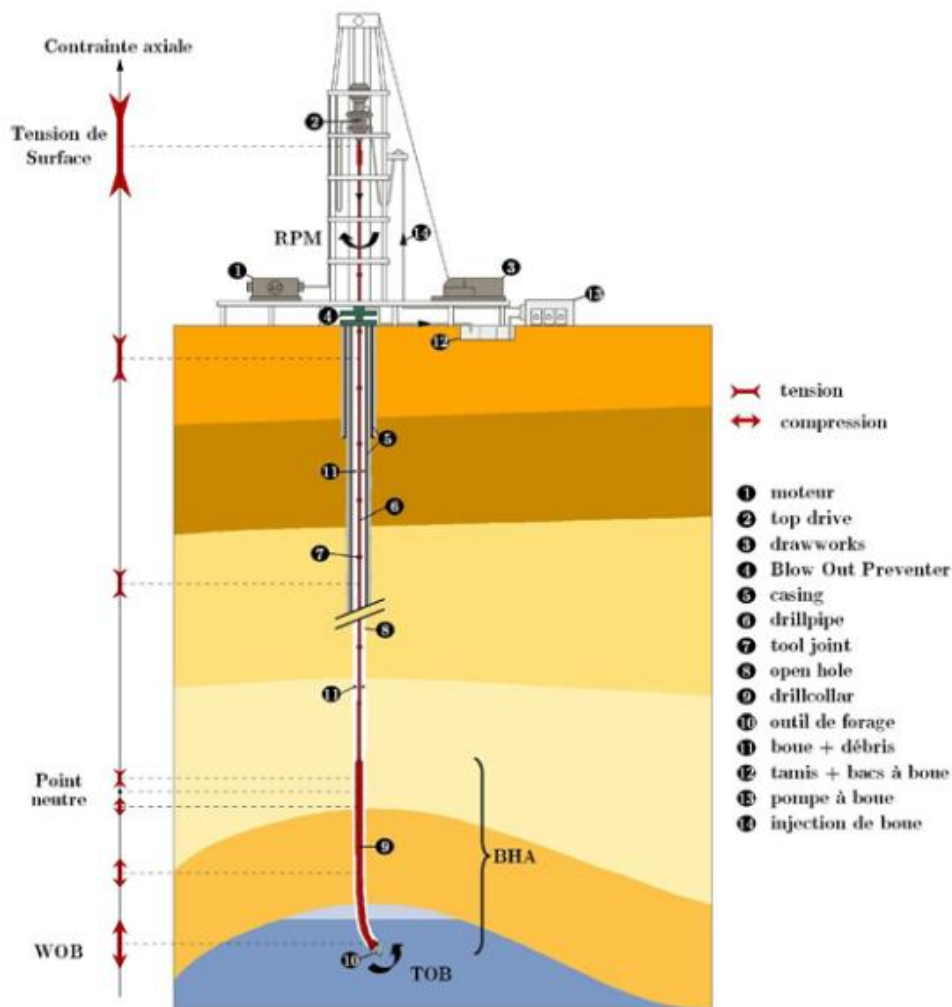


Figure 2:Schéma d'une structure de forage rotatif[10].

6.Pièces et composants de la tour de forage :

6.1. Système de levage et de rotation :

L'ensemble de levage et de rotation se compose des éléments suivants :

1. Mât
2. Base
3. Rouleaux fixes
4. Poulies mobiles
5. Moteur de rotation
6. Table rotative
7. Ensemble de levage
8. Filet de per

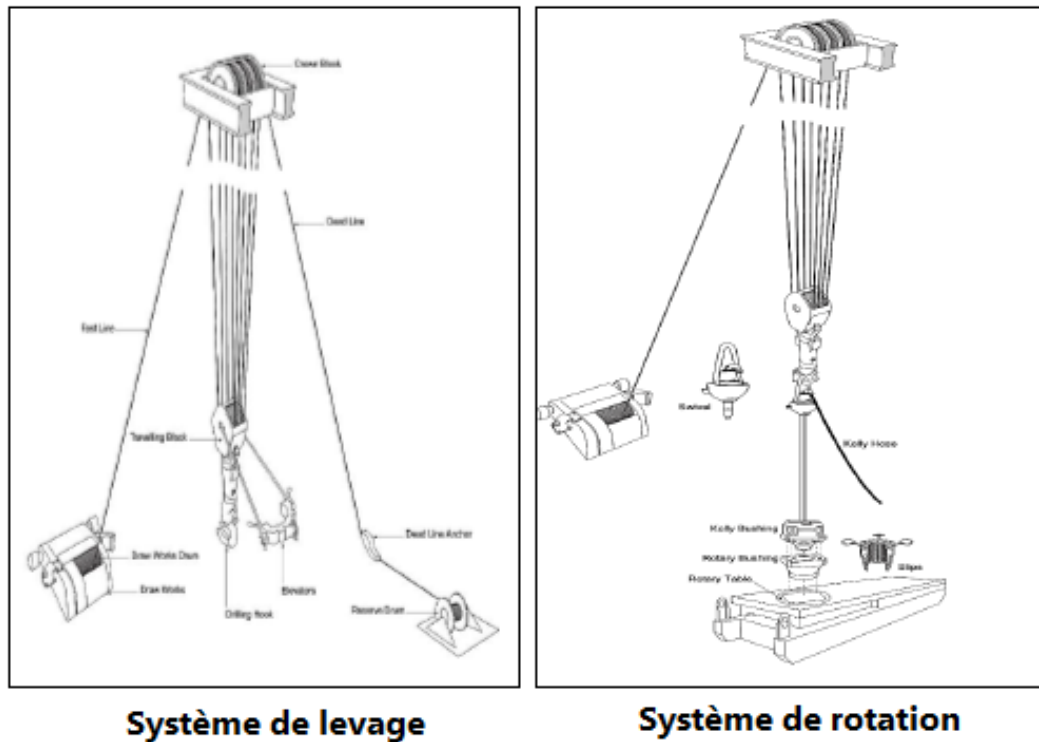


Figure 3: système de levage et de rotation [8].

6.2. Système de boue de forage:

Ce système est composé de plusieurs parties, commençant par les grilles vibrantes et se terminant par les pompes à boue. Le cycle du liquide de forage est illustré dans le schéma ci-dessous :

1. Grilles vibrantes
2. Dégazeurs
3. Débander
4. Désulteur
5. Dégauchisseuses
6. Réservoirs de boue
7. Mélangeurs de boue spéciaux
8. Pompes à boue

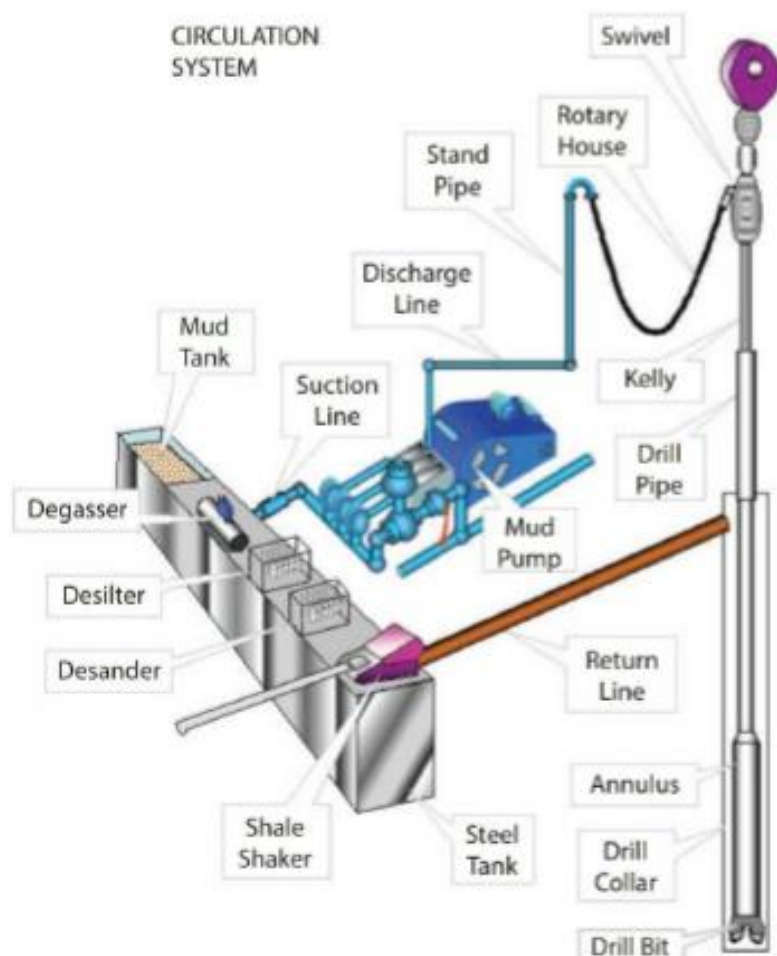


Figure 4: système de circulation de la boue [8].

6.3. Système de contrôle de puits:

Le système de contrôle des puits est composé des éléments suivants :

1. Bops (préventeurs de déversement)
 - Bops annulaires
 - Bops horizontaux

2. Système de contrôle des Bops
3. Collecteurs
4. Pompes de charge
5. Réservoirs d'eau
6. Système d'étranglement
7. Ligne d'abattage du puits

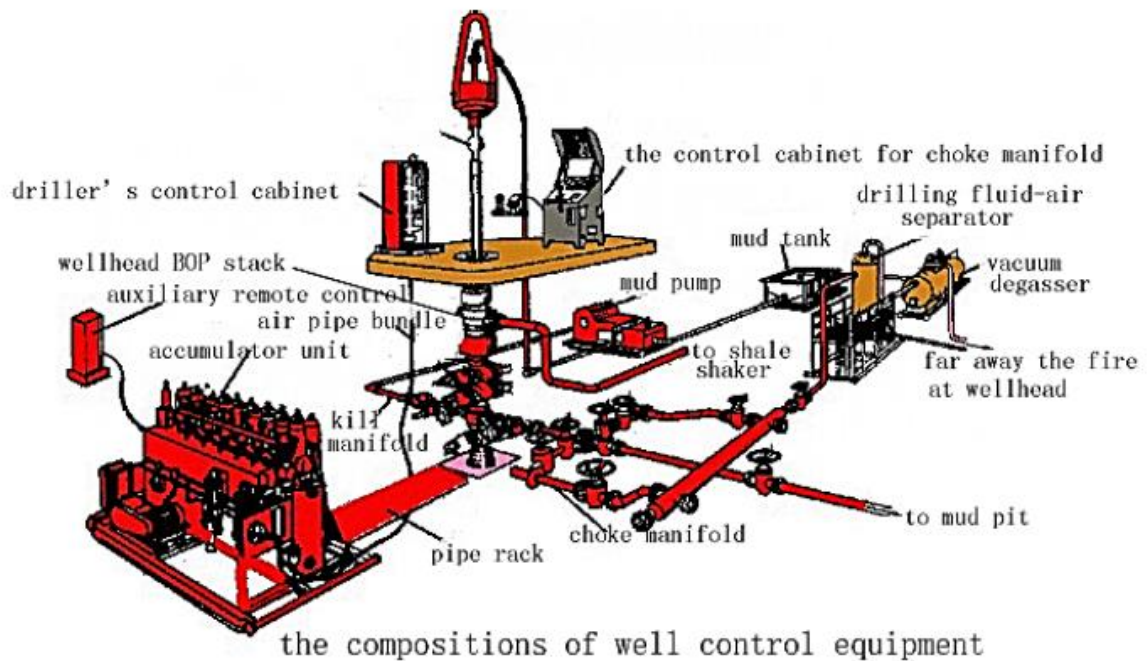


Figure 5:la composition du système de contrôle des puits [8].

6.4. Le système d'alimentation :

Le système d'alimentation électrique est crucial dans la tour de forage, où généralement de grandes génératrices sont utilisées pour générer l'électricité nécessaire pour alimenter tous les composants de la tour de forage. Il est nécessaire d'avoir plusieurs génératrices dans une seule tour pour garantir une alimentation électrique continue pendant les 24 heures de la phase de forage du puits.

Le système d'alimentation électrique dans la tour de forage se compose de six composants principaux :

1. Génératrices
2. Tableau de contrôle
3. Transmetteur
4. Moteur

5. Tableau de commande de forage
6. Moteur à commande centralisée

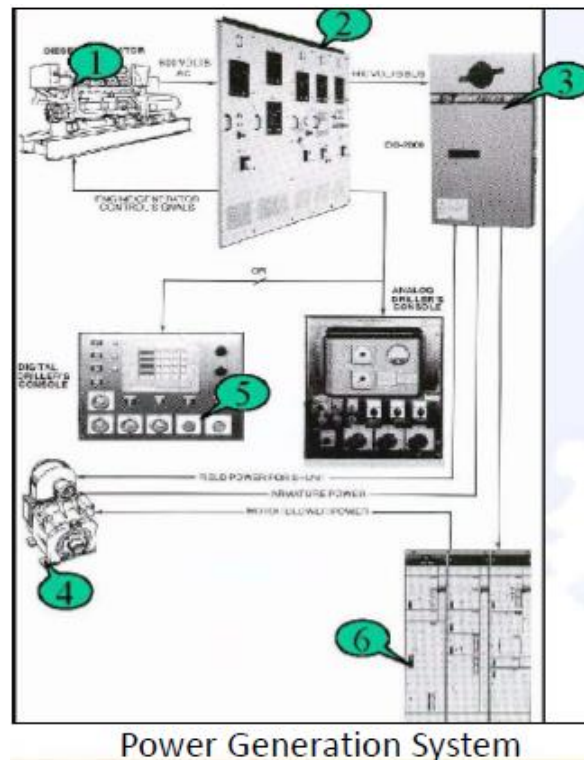


Figure 6: système de production d'électricité [8].

7. Définition de fluide du forage :

Les fluides de forage sont des systèmes complexes de composants liquides et/ou gazeux, accompagnés d'additifs minéraux et organiques comme des polymères, des tensioactifs et des argiles. Ces mélanges sont ajustables selon les besoins en modifiant les poids ou les ratios des composants. Leur utilisation remonte à 1933, lors du premier Congrès Mondial du Pétrole, et en 1936, Evans et Reid ont publié la première étude sur le sujet. L'American Petroleum Institute (API) a officiellement défini le fluide de forage en 1979 comme un liquide en circulation continue pendant le processus de forage. Préparé dans des bacs à boue, il est injecté dans les tiges jusqu'à l'outil, puis remonte dans l'annulaire en transportant les déblais formés à la surface. En tête de puits, divers traitements sont effectués pour éliminer les déblais transportés et réajuster les propriétés du fluide avant sa réutilisation[11].

8. Rôle du fluide de forage :

Les boues de forage doivent posséder des propriétés qui leur permettent d'optimiser les fonctions suivantes :

8.1. Nettoyage du puits :

La boue doit débarrasser le puits des particules de formation forées qui se présentent forme de débris de roche appelés « puttings » ou « déblais »

8.2. Maintien des déblais en suspension :

Le fluide de forage doit non seulement débarrasser le puits des déblais de forage Durant les périodes de circulation, mais il doit également les maintenir en suspension pendant les arrêts de circulation.

8.3. Sédimentation des déblais fins en surface :

Alors que la boue doit permettre le maintien en suspension des déblais dans le puits Durant les arrêts de circulation, ce même fluide doit laisser sédimenter les déblais fins en surface, afin de les éliminer. Bien qu'apparemment ces deux aptitudes semblent contradictoires, elles ne sont pas incompatibles.

8.4. 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.

8.5. Dépôt d'un cake imperméable :

La filtration dans les formations perméables d'une partie de la phase liquide de la boue crée un film sur la paroi du sondage, ce film est appelé cake. Le dépôt du cake permet de consolider et de réduire la perméabilité des parois du puits.

8.6. Prévention des venues eau, de gaz, ou d'huile :

Afin d'éviter le débit dans le puits des fluides contenus dans les Réservoirs rencontrés en cours de forage, la boue doit exercer une pression hydrostatique suffisante pour équilibrer les pressions de gisement. La pression hydrostatique souhaitée est maintenue en ajustant la densité entre des valeurs maximum.

8.7. Augmentation de la vitesse d'avancement :

Au même titre que le poids sur l'outil, la rotation et le débit du fluide, le choix du type et les caractéristiques de la boue conditionnent les vitesses d'avancement instantanées, la durée de vie des outils, le temps de manœuvre, en un mot, les performances du forage. Un filtrat élevé augmente la vitesse d'avancement. Les très faibles viscosités sont aussi un facteur favorable à la pénétration des outils.

8.8. Prévention du cavage et des resserrements des parois du puits :

La boue doit posséder des caractéristiques physiques et chimiques telles, que le trou conserve un diamètre voisin du diamètre nominal de L'outil.

Le cavage est causé par des éboulements, par la dissolution du sel, par la dispersion des argiles, par une érosion due à la circulation de la boue au droit des formation fragiles, etc. Les resserrements ont souvent pour cause une insuffisance de la pression hydrostatique de la colonne de boue qui ne peut équilibrer la pression des roches.

8.9. Entraînement d'outils (turbine, MWD, etc.) :

Dans le cas du turboforage la boue entraîne la turbine en rotation. Cette fonction, l'amenant à passer à travers une série d'évents et à mettre en mouvement des aubages, implique certaines caractéristiques et rend impossible ou très délicat l'utilisation de certains produits (colmatant).

8.10. Diminution du poids apparent du matériel de sondage :

Bien que ce soit beaucoup plus une conséquence qu'une fonction, la Présence d'un fluide d'une certaine densité dans le puits permet de diminuer le poids apparent du matériel de sondage, garniture de forage et tubages, ceci permet de réduire la puissance exigée au levage.

8.11. Apport de renseignements sur le sondage :

La boue permet d'obtenir des renseignements permanents sur l'évolution des formations et fluides rencontrés. Ces renseignements sont obtenus :

Par les déblais remontés avec la circulation du fluide,

L'évolution des caractéristiques physiques et /ou chimiques de la boue,

La détection de gaz ou autres fluides mélangés à la boue.

8.12. Contamination des formations productrices :

La présence d'un fluide au droit de formation poreuses et perméables peut exercer une pression hydrostatique supérieure à la pression de gisement. Cela peut nuire à la future mise en production de cette zone.

8.13. Corrosion et usure du matériel :

Le fluide peut accélérer l'usure du matériel de sondage, par une action mécanique, si elle contient des matériaux abrasifs. Elle peut aussi être corrosive par une action électrolytique (présence d'ions) Due à un déséquilibre chimique.

8.14. Toxicité et sécurité :

La boue de forage ne devra pas présenter de danger pour la santé du personnel. Elle ne devra pas non plus créer de risques incendie, tout particulièrement dans le cas d'utilisation des boues à base d'huile[12].

9. Différents types de fluides de forage et leur composition :

Historiquement, les fluides de forage ont progressé d'un mélange rudimentaire d'eau et d'argile, appelé "boue", vers des systèmes de plus en plus sophistiqués composés d'eau ou d'huile et d'une multitude d'additifs répondant aux besoins spécifiques et aux défis rencontrés. Ces fluides de forage sont des mélanges complexes classés en fonction de leur base constitutive. Traditionnellement, ils sont classés en trois catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation : eau ou huile. Les propriétés requises des boues de forage sont nombreuses et parfois contradictoires. Par exemple, elles doivent avoir une densité suffisante pour limiter les pertes de charge et prévenir la fracturation de la formation. Pour atteindre ces objectifs, de nombreux composants multifonctionnels sont ajoutés à la boue, pouvant être regroupés grossièrement en 20 catégories[13].

Tableau 1: Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage[13].

Agents moussants. (AVA détergent)	Contrôleurs D'alcalinité (Costique soude NaOH₂)	Décoinçant (ou dégrippants)	Viscosifiants (Victosal)
Emulsifiants (AVA-OIL PT/ST)	Bactéricides. (AVA-Cide)	Inhibiteurs de gonflement des argiles. (Kcl)	Alourdissant (Barite BaSO₄)
Réducteurs de filtrat (Visco 83SL)	Anti-calcium. (Soda-H, Na₂CO₃)	Produits facilitant la séparation	Saumure. (NaCl, Kcl, Cacl₂)
Floculant. (CMC HVT)	Inhibiteurs de Corrosion	Stabilisants haute température : Les polymères spécifiques hauts température	Huile minéral ou organique (Gas- oil)
Colmatant (LCM)	Anti-mousses (Ste-AVA-liquid)	Défloculants (AVA-LIGNE)	Lubrifiants (Ecolube)

9.1La boue à base d'eau :

Ces liquides sont souvent appelés "boues à base d'eau" ou WBM. Ils consistent généralement en des suspensions de bentonite dans l'eau (30 à 60 g/L), dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont ajustées par des polymères. Les électrolytes et leur concentration sont choisis en fonction des caractéristiques de formation, tandis que les additifs comprennent des Viscosifiants tels que des argiles naturelles ou des polymères synthétiques, des réducteurs de filtrat comme l'amidon ou la carboxyméthylcellulose, des inhibiteurs de gonflement et de dispersion des argiles comme le KCl ou des polymères, des agents alourdissant comme la barytine ou la calcite, et enfin des colmatants exotiques comme des granulés, des fibres ou des lamelles. Ces boues peuvent être utilisées dans tous les types de sondages nécessitant une faible teneur en solides

Tableau 2: Les avantages et inconvénients de La boue à base d'eau[13].

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<p>Augmentation de vitesse d'avancement, Réduction importante des pertes de charge, Augmentation de la durée de vie des douce, de mer ou salée saturée, Faible tonnage de produits mis en œuvre Possibilité de contrôler les caractéristiques avec les produits (C.M.C. etc.).</p>	<p>Filtrat A.P.I. difficilement contrôlé à moins de 10 cm 3/30min, Dégradation du bio polymère aux environs de 150°C, Le bio polymère est fermentescible, d'où la nécessité d'ajouter un anti ferment, Prix élevé (dépond de consommation des produits).</p>

9.2. La boue à base d'huile :

L'origine de l'utilisation de d'huile dans les fluides de forage remonte aux premiers forages effectués à Oklahoma City (1934-1937) au cours desquels ont constaté une amélioration des performances de forage après ajout de l'huile sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gazole,) et la phase dispersée est de l'eau. Par définition les fluides de forage à base d'huile contenant plus de 5% d'eau, on a les boues à l'huile. Ces fluides sont souvent désignés par "Oil-Based Mud" ou OBM. La phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gazole, mais actuellement la législation relative à la protection de l'environnement impose l'utilisation d'huile minérales ou " synthétiques", ne contenant plus de composée aromatiques. Des agents émulsifiants et mouillants sont alors utilisée pour favoriser la stabilité de l'émulsion. Les propriétés rhéologiques (thixotropie) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents Viscosifiants, généralement des argiles organophiles. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (composés asphaltiques et polymères) et d'autres additifs spéciaux. Il faut signaler qu'aujourd'hui la plupart des travaux de recherche portent sur l'amélioration des boues inverses synthétique, vu leurs a avantages économiques et environnementaux, comparativement aux fluides classiques à base de gazoln.

9.2.1.Utilisation :

Les boues à l'huile sont principalement utilisées :

Les principales interfaces utilisateur :

Pour l'échantillonnage et le carottage des niveaux producteurs dans les sondages d'extension ;

Pour les interventions de maintenance et d'entretien des producteurs ;

Elle offre une excellente génération pour atteindre les horizons de production des produits.

9.2.2.Composition :

Une phase continue d'huile ;

Une phase dispersée (exprimée en pourcentage en volume).

Tableau 3: Avantages et inconvénients de la boue à base d'huile[13].

AVANTAGES	INCONVENIENT
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contrôle aisé des caractéristiques en l'absence de venues d'eau ou de brut. ▪ Insensibilité aux contaminants habituels des boues à base d'eau (NaCl, CaSO₄ Ciment, argile). ▪ Excellentes caractéristiques de filtration statiques 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'outillé et d'accumulation des déblais sur les drrill-collars et diminution du "pistonnage" lors des manœuvres. ▪ Diminution du collage par pression différentielle. ▪ Meilleure récupération il est carottage. ▪ Carottes sur lesquelles il est possible de mieux approcher la valeur de saturation en eau et en huile. ▪ Augmentation par rapport au forage en boue à l'eau, de la productivité. ▪ Moindres dommages à formation. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensibilité à l'eau et à certains bruts. ▪ Risque de sédimentation des alourdisant. ▪ Manipulation salissante. ▪ Risque d'incendie. ▪ Détérioration des caoutchoucs ne résistant pas aux hydrocarbures. ▪ Difficultés pour déceler la présence d'huile de formation dans les déblais. ▪ Prix de revient au m³ plus élevé que les boues à l'eau. ▪ Logistique plus importante.

10.Composition de boues de forage :

La classification des boues de forage peut être simplifiée en deux catégories principales :

- Celles où l'eau constitue la phase continue.
- Celles où l'huile est la phase continue

10.1.Les boues dont la phase continue est l'eau :

Ces boues se composent de trois éléments distincts :

L'eau, qui constitue une phase importante en volume et peut contenir de l'huile émulsifiée ainsi que des produits chimiques solubles.

Les argiles, ajoutées délibérément ou provenant des formations forées.

Les solides inertes, tels que le sable, le calcaire, la dolomie, la barytine, etc..., qui ne réagissent pas chimiquement.

10.1.1.L'eau de fabrication :

L'eau utilisée dans le processus de fabrication peut être classé en deux catégories : l'eau douce, qui contient peu ou pas des sels tels que le sodium, le calcium ou le magnésium, et l'eau dure, qui contient des ions tels que Ca^{2+} et Mg^{2+} en concentrations plus élevées. Une eau dure peut réduire l'efficacité des argiles et des produits chimiques utilisés. Pour atténuer cette dureté, on peut ajouter de 1 à 2 Kg de soude caustique ou de carbonate de soude par mètre cube d'eau, ce qui permet de précipiter le calcium et le magnésium. En outre, l'eau utilisée peut avoir une certaine salinité, généralement comprise entre 7 et 35g/l et 35g/l. Cependant, la salinité ne peut être réduite que par dilution avec de l'eau douce.

10.1.2.Les argiles :

En suspension dans l'eau, l'argile augmente de volume en absorbant de grandes quantités de liquide, ce qui entraîne une augmentation de la viscosité du mélange, dépendant de la qualité de l'argile et de la composition électrolytique de l'eau, ainsi qu'une diminution du filtrat. Lors du forage, l'outil rencontre des formations argileuses de différentes épaisseurs, les "cuttings" se dispersent et gonflent, ce qui augmente la viscosité de la boue. De ce fait, l'argile peut être contrôlée, telles que l'ajouté de produits fluidifiants et d'inhibiteurs de gonflement.

10.1.3. Les solides inertes :

En règle, générale, ces substances sont insolubles dans l'eau et ne produisent d'effet qu'à grande échelle. Par exemple, le sulfate de baryum (BaSO₄), également connu sous le nom de barytine, est utilisé pour augmenter la densité d'une solution. Cependant, cela entraîne également une augmentation de la viscosité, mais seulement parce qu'il faut une quantité considérable de barytine pour augmenter la densité d'une solution de forage.

10.2. Les boues dont la phase continue est l'huile :

Une boue à base d'huile est un liquide où l'huile constitue la phase continue. Nous examinerons ultérieurement les bénéfices de cette composition. On distingue principalement deux types :

Les boues émulsionnées à base d'huile

Les boues émulsionnées inverses, où l'eau est dispersée dans l'huile[14].

Tableau 4: types caractéristiques, compositions et domaines d'utilisation des boues à huile[14].

Classe de la boue	Type de boue	Caractéristique de la boue	Composition	Cas principaux D'utilisation
Les boues dont la phase continue est l'huile	Boue émulsion	Filtrat faible	Huile (95-98) % Eau (2-5) % -agent plastifiant -agent fluidifiant alourdissant	-Forage d'une couche productrice -Forage du sel massif reprise et entretien du puits -Forage d'une couche productrice.
	Boues à émulsion Inverse	Filtrat faible prix de Revient moins élevé	Huile (80-30) % Eau (20-70)%	-Problèmes de forage à haute Température. -Forage dans des zones trop froides

11 .Système de circulation :

Pendant le processus de forage, un liquide appelé "boue de forage" est injecté à haute pression à l'intérieur des tubes de forage. La boue de forage est expulsée de l'outil de forage assez rapidement pour extraire les morceaux de roche creusés vers la surface dans l'espace entre les tubes de forage et les parois du puits. À la surface, les débris de roche sont séparés de la boue à travers des tamis vibrants qui retiennent les débris et laissent passer le liquide. Si nécessaire, des Traitements supplémentaires sont effectués pour renouveler les propriétés de la boue (viscosité, densité, etc.). Ensuite, elle est envoyée dans des réservoirs où elle est pompée pour être réinjectée dans les tubes de forage. Ainsi, la boue circule dans un circuit fermé[15].

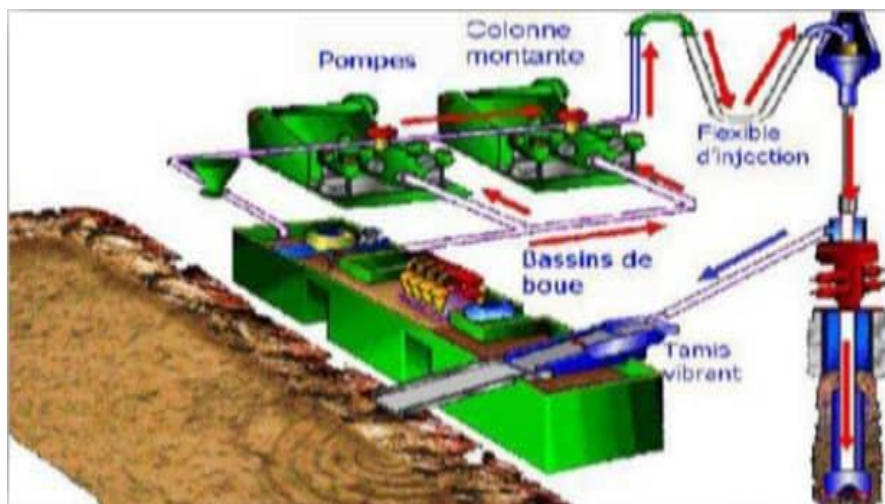


Figure 7: Circuit de la boue de forage [15].

Chapitre II : *La nanotechnologie*



1.Histoire de la nanotechnologie:

L'émergence des nanotechnologies ne peut être rattachée à des époques précises, mais il semble que les artisans médiévaux aient été parmi les premiers à utiliser les nanotechnologies sans vraiment les comprendre. À cette époque, ils utilisaient des nanoparticules d'or pour colorer le verre, comme l'illustre le célèbre calice grec du IV^e siècle conservé au British Museum, qui change de couleur, passant du vert au rouge, en fonction de l'angle sous lequel la lumière tombe dessus, grâce à des nanoparticules d'or et d'argent mélangées au verre. Les nanotechnologies ont également été utilisées dans la civilisation arabo-islamique, où les épées de Damas étaient réputées pour leur solidité et leur durabilité. À l'ère moderne, les études et les recherches sur les nanotechnologies ont commencé à se multiplier. En 1959, le célèbre physicien Richard Feynman a parlé du concept de matière au niveau nanométrique et a suggéré que des méthodes pourraient être développées pour déplacer les atomes et les molécules de manière indépendante. En 1979, le terme "nanotechnologie" est apparu dans une conférence du professeur Tanucci Norio à l'université de Tokyo, décrivant la nanotechnologie comme le contrôle des matériaux au niveau atomique et moléculaire.

Avec l'invention du microscope à effet tunnel en 1981, qui permet de visualiser des objets à l'échelle nanométrique, la recherche dans ce domaine s'est développée. En 2000, le scientifique Mounir Naifeh a découvert et synthétisé une famille de grains de silicium à l'échelle nanométrique. Au cours des années suivantes, les nanotechnologies ont commencé à être utilisées dans des domaines tels que la médecine et l'ingénierie.

Les nanotechnologies ont attiré l'attention des scientifiques et des chercheurs dans tous les domaines et ont été utilisées dans divers domaines de la vie tels que l'industrie, la médecine et l'agriculture au cours des quatre dernières décennies[16].

2.définition de la technologie nano :

Il existe de nombreuses définitions des nanotechnologies qui partagent le principe général et l'objectif, et qui aident à clarifier l'idée de cette technologie : Nanotechnologie : L'application de principes et de concepts scientifiques et techniques pour produire des matériaux et des dispositifs utiles à l'échelle nanométrique. Il s'agit de la capacité de contrôler ou de manipuler la matière au niveau atomique. Elle représente la science, l'ingénierie et la technologie qui nous donnent la capacité de contrôler directement les atomes, les molécules, les matériaux et les structures dont les dimensions sont inférieures à 100 nanomètres, y compris l'observation, la mesure et l'étude de leurs propriétés physiques, chimiques, magnétiques, mécaniques et

électriques, la capacité de les fabriquer, puis d'utiliser leurs applications dans les domaines scientifiques et dans la vie quotidienne[17].

3.dimensions nanométriques

On peut dire que tous les types de matériaux traditionnels, tels que les métaux et leurs alliages, les semi-conducteurs, le verre, la céramique et les polymères, servent de matières premières dans la fabrication de matériaux de dimensions nanométriques (matériaux Nanos). Les formes des matériaux Nanos varient selon la méthode de préparation utilisée. Ils peuvent être sous forme de couches nanométriques, de nanotubes, de nano fils, de nano tiges, ou encore de nanoparticules. Les matériaux Nanos se distinguent par leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques uniques par rapport aux matériaux traditionnels à grains plus gros. Étant les pierres angulaires de la fabrication de nouveaux produits, ces matériaux manufacturés Présentent des propriétés uniques qui se reflètent dans l'efficacité et les performances du produit final. Ils offrent des propriétés qui ne sont pas disponibles dans les produits des matériaux traditionnels[18].

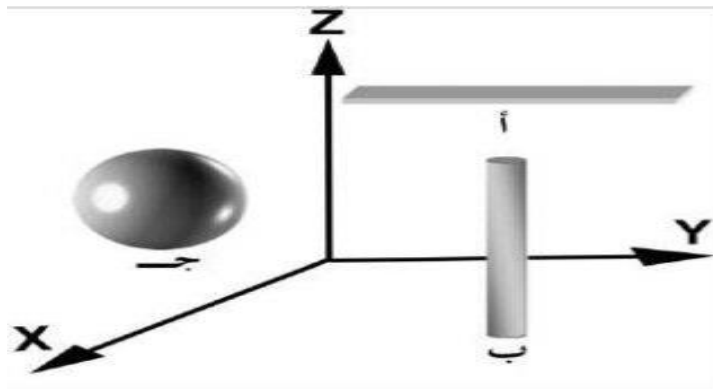


Figure 8:A Nano flocons ou couches (unidimensionnels), B cylindres ou tubes (bidimensionnels) et C nanoparticules (tridimensionnels) [18].

4. Les formes des nanostructures.

La préparation de matériaux nanométriques sous différentes formes :

4.1. Les points quantiques.:

Ces points quantiques sont comme des semi-conducteurs nanométriques tridimensionnels, avec des dimensions allant de 2 à 10 nanomètres. Lorsque le diamètre d'un point quantique atteint 10 nanomètres, il est possible d'aligner jusqu'à 3 millions de points quantiques côte à côte, ce qui équivaut à la largeur d'un pouce humain en termes de perspective.

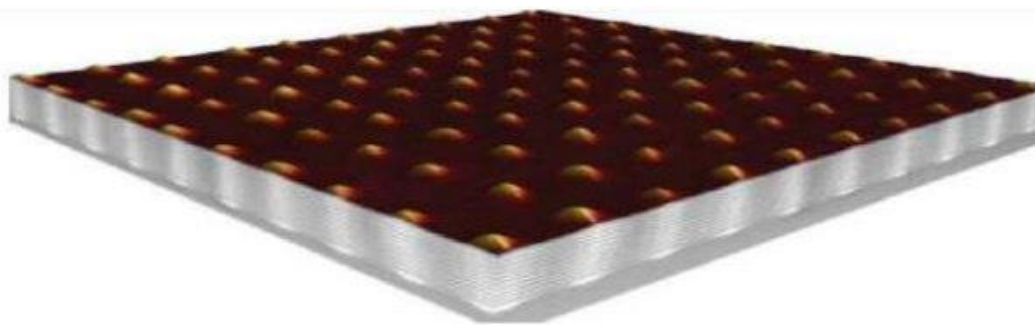


Figure 9: Point une quantité tridimensionnelle de cristaux[16].

4.2. Le fullerène :

Les fullerènes sont des molécules nanométriques composées d'atomes de carbone tridimensionnels liés, qui leur donnent une structure en forme de sphère ressemblant au graphite hexagonal, mais au lieu de contenir une forme hexagonale pure, elles contiennent des formes pentagonales d'atomes de carbone, ce qui entraîne le pliage des couches et leur transformation en sphères ou en cylindres. La molécule de carbone C_{60} est la plus célèbre des fullerènes, où 60 atomes de carbone sont disposés aux sommets d'un polyèdre de vingt faces tronquées, et la forme de ce polyèdre tronqué ressemble à un ballon de football. Il se distingue par le fait d'être magnétique et non réactif au frottement.

Les fullerènes ont été découverts en 1944 lorsque Harold Kroto a observé la présence de chaînes de carbone lors d'expériences visant à former des atomes lourds à partir d'atomes plus légers en les bombardant de neutrons. Sa recherche était axée sur la détection des petites différences de poids entre certains isotopes d'éléments lourds qu'il vaporisait dans un arc de carbone.



Figure 10: Fullerène C60 sous forme moléculaire. Fullerène C60 sous forme cristalline[16].

4.3. Les nano-sphères ou les nano-billes de carbone

Les nano-sphères appartiennent à la catégorie des fullerènes (60C), avec une légère différence dans leur structure ; elles sont multicouches, creuses au centre, et en raison de leur structure en couches semblable à un oignon, les scientifiques les ont appelées "bucky", c'est-à-dire oignon. Leur diamètre peut atteindre plus de 500 nanomètres selon les formes suivantes.

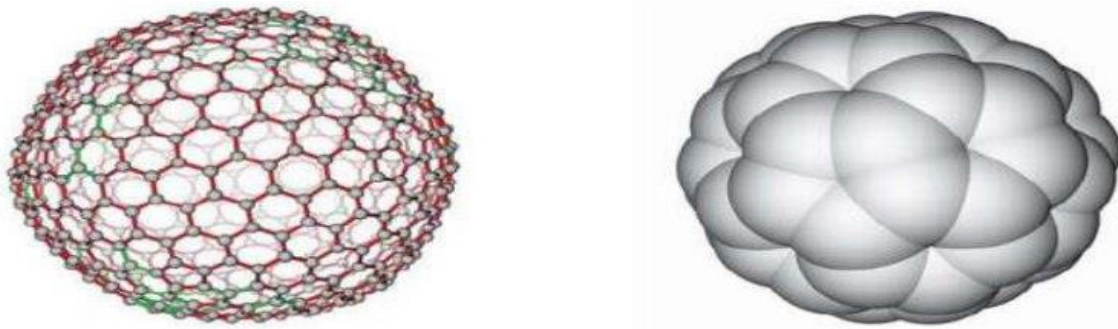


Figure 11: Nano sphère[16].

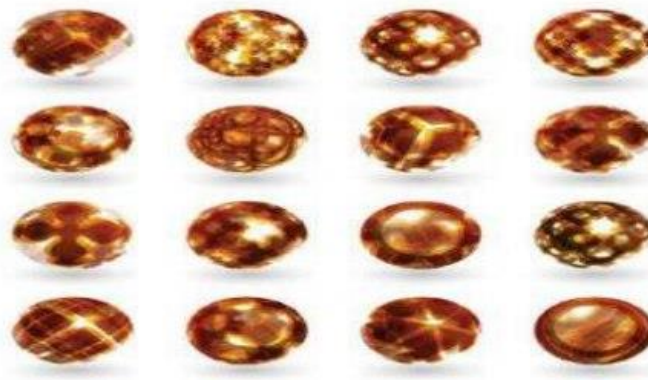


Figure 12: Nano billes[16]

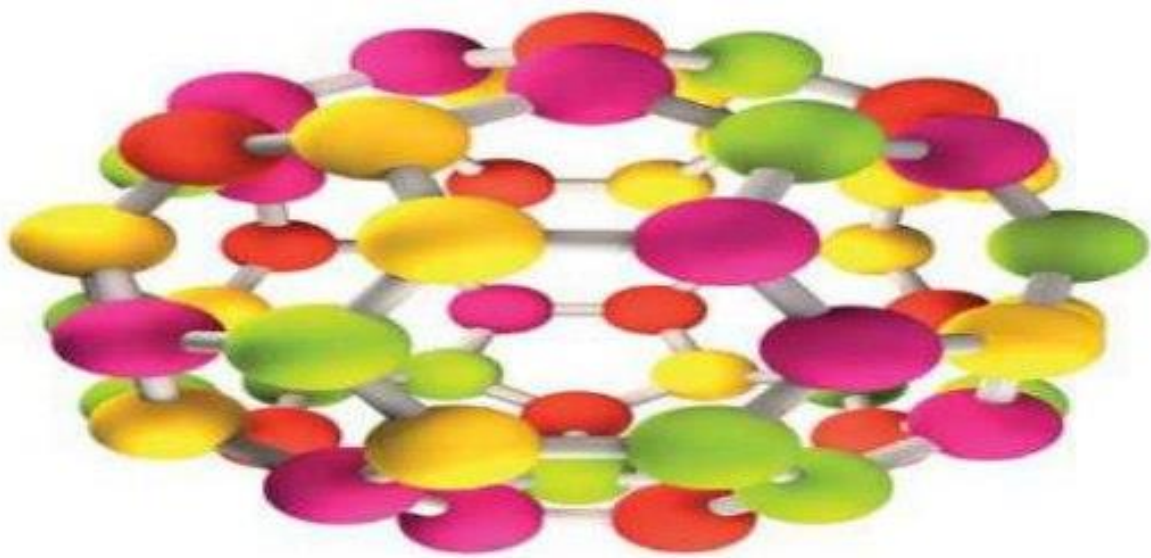


Figure 13: Nano sphères[16].

4.4.Nanoparticules

En nanotechnologie, une particule est définie comme la plus petite unité possédant les propriétés chimiques et physiques de la matière, les nanoparticules ayant des dimensions comprises entre 1 et 100 nanomètres.

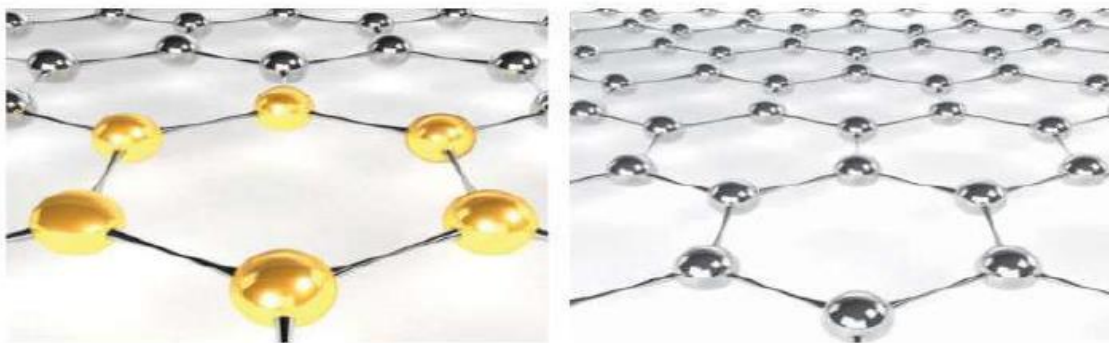


Figure 14: Différentes formes de nanoparticules[16].

4.5.Nanotubes :

Les matériaux utilisés en nanotechnologie doivent avoir une taille comprise entre 1 et 100 nanomètres. Par conséquent, les matériaux utilisés doivent être coupés en parties dont le

diamètre ne dépasse pas 100 nanomètres. Par exemple, les nanotubes sont constitués d'un mélange de matériaux conducteurs et semi-conducteurs en forme de cylindre creux dont le diamètre est compris entre 1 et 100 nanomètres.

Plusieurs tubes de rayons progressivement plus petits peuvent être insérés.

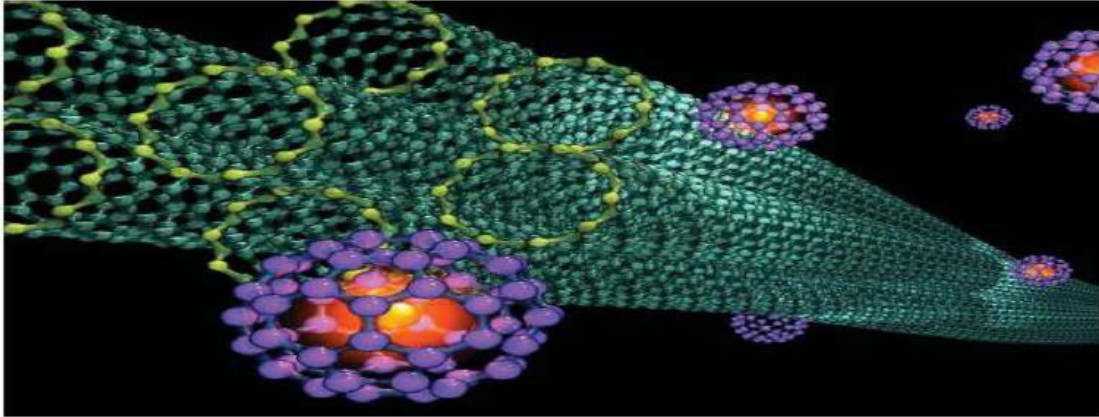


Figure 15: Un ensemble de tubes de nucléotides imbriqués ayant des propriétés différentes [16].

4.6.Nanofils :

Les fils illustrés dans la figure ont un diamètre supérieur à un nanomètre et une longueur variable. Le rapport longueur/largeur de ces fils est généralement supérieur à 1000 fois. Les fils tridimensionnels ordinaires sont capables de conduire efficacement le courant électrique, car ils ont la capacité de confiner quantitativement les électrons dans une direction latérale. Cette caractéristique leur permet d'occuper des niveaux d'énergie spécifiques qui diffèrent des niveaux plus larges des matériaux tridimensionnels



Figure 16: Microscope à nano fils de silicium[16].

4.7.Nanofibres :

Parmi les nanofibres les plus populaires, les fibres fabriquées à partir de polymères sont en tête de liste. Ces fibres se caractérisent par un grand nombre d'atomes de surface par rapport au nombre total, ce qui leur confère d'excellentes propriétés mécaniques telles que la résistance, la rigidité et autres. Ces propriétés font que les fibres fabriquées à partir de polymères peuvent être utilisées dans la fabrication de filtres pour purifier les liquides et les gaz, en plus de leur large éventail d'applications dans les domaines médical et militaire

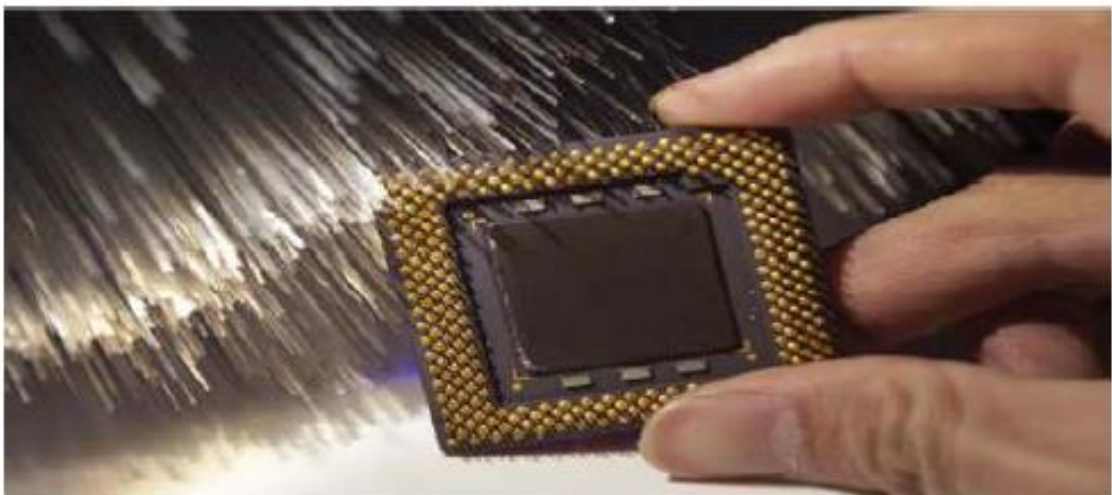


Figure 17: Nanofibres[16].

4.8Nanocomposites :

Lorsque des nanotubes de carbone sont ajoutés à un matériau, la conductivité électrique et thermique de ce matériau est considérablement améliorée. Les propriétés optiques et mécaniques, telles que la dureté et la résistance, sont souvent améliorées lorsque certains nanomatériaux sont ajoutés à certains matériaux. Parmi les principaux nanomatériaux actuellement utilisés figurent les composites polymères.

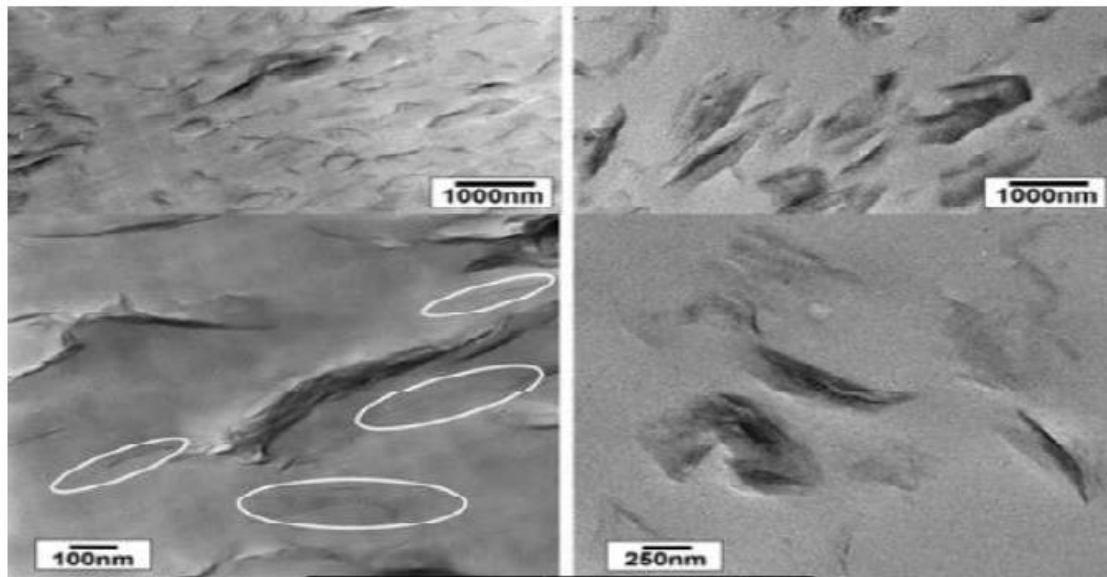


Figure 18: Nano composite[16].

5.L'importance des nanotechnologies :

Les nanotechnologies sont à l'avant-garde des domaines les plus importants et les plus passionnants de la physique, de la chimie, de la biologie, de l'ingénierie et de bien d'autres encore. Ces développements ont alimenté les espoirs de révolutions scientifiques dans un avenir proche. L'intérêt généralisé pour les nanotechnologies remonte à 1996-98, lorsque le Centre mondial d'évaluation des technologies (WTEC) a réalisé une étude approfondie de la recherche en nanotechnologies et de son importance pour le développement des nanotechnologies. La conclusion de cette étude a été résumée en plusieurs points importants, notamment Les nanotechnologies sont promises à un grand avenir dans tous les domaines, notamment médical, militaire, informatique, électronique, informatique, pétrochimique, agricole, biologique et bien d'autres encore.

L'idée de la nanotechnologie repose sur des particules d'une taille inférieure à 100 nanomètres, qui confèrent de nouvelles propriétés aux matériaux. La différence de comportement des matériaux à la taille nanométrique modifie la structure électronique et les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des matériaux. Les nanotechnologies présentent un grand intérêt et englobent un large éventail de domaines techniques, notamment la production de matériaux légers et résistants, l'amélioration de l'administration des médicaments à l'échelle nanométrique, l'augmentation de la capacité des bandes magnétiques à capturer les particules et la fabrication de commutateurs informatiques rapides. Les avantages des comprennent également l'amélioration des méthodes de fabrication, des systèmes de purification de l'eau, l'amélioration

de la santé environnementale et de la nanomédecine, l'amélioration des méthodes de production alimentaire à grande échelle, des infrastructures industrielles plus sophistiquées et des produits technologiques à haute productivité, à coûts réduits et à dépendance limitée à l'égard des ressources énergétiques [16].

6. Principes et caractéristiques des nanotechnologies

Tableau 5: Principes et caractéristiques des nanotechnologies[16].

Le principe	Caractéristiques
La capacité de contrôler avec précision le mouvement et le réarrangement des atomes individuels.	La possibilité de construire n'importe quel matériau dans l'univers parce que l'atome est l'élément constitutif de tous les matériaux.
Les propriétés physiques et chimiques de la matière à l'échelle du nanomètre sont différentes pour la même substance à son échelle naturelle.	La découverte des propriétés distinctives des matériaux qui sont utilisées dans de nombreuses inventions et domaines d'application.
Les nanotechnologies reposent sur les principes de la physique, de la chimie, de la biologie et de l'ingénierie électrique et électronique.	Il relie les sciences et encourage tous ceux qui ont des disciplines scientifiques différentes à faire de la recherche, à participer dans leur domaine et à collaborer les uns avec les autres.
La possibilité de contrôler les atomes dans la fabrication des matériaux et des machines et de les purifier des impuretés et des défauts.	Les propriétés des matériaux et des machines s'améliorent ils sont plus petits, plus légers, plus résistants, plus rapides, moins chers et moins gourmands en énergie.
Les nanotechnologies reposent sur la recherche scientifique qui se caractérise par son applicabilité en matière d'inventions et utiles.	La science-fiction est devenue réalité.

7.Méthodes de préparation des nanomatériaux :

Les propriétés physiques et chimiques des matières premières utilisées dans la préparation des nanomatériaux jouent un rôle important sur ce qui se passe lorsque le matériau est synthétisé. Les scientifiques ont découvert que certains composés, lorsqu'ils sont synthétisés

À des tailles de l'ordre du nanomètre, ils acquièrent des propriétés uniques qu'ils n'ont pas lorsqu'ils sont synthétisés. Qu'ils n'ont pas lorsqu'ils sont de taille physique, et ce malgré le fait que la composition chimique soit identique dans les deux cas.

Bien que la composition chimique soit identique dans les deux cas, le matériau nanométrique acquiert des propriétés électriques, optiques et magnétiques uniques. Propriétés électriques, optiques et magnétiques exceptionnelles en raison de la nouvelle disposition des atomes.

Les différentes propriétés d'un nano produit dépendent de la manière dont la microstructure interne du matériau est contrôlée et de la taille de ses grains, ainsi que de la méthode et de la technique utilisées pour produire le nanomatériau.

Cette méthode est souvent incluse dans les méthodes chimiques et se caractérise par la petite taille des matériaux produits et des liaisons solides. Des nanomatériaux produits.

Si nous examinons la première section de haut en bas, nous constatons que certaines techniques apparues il y a plus de 50 ans permettaient de préparer des billes de matériau de très petites dimensions. Ces technologies sont les suivantes les techniques de refroidissement le refroidissement rapide, la chimie fraîche et les techniques de gel-sol)[19].

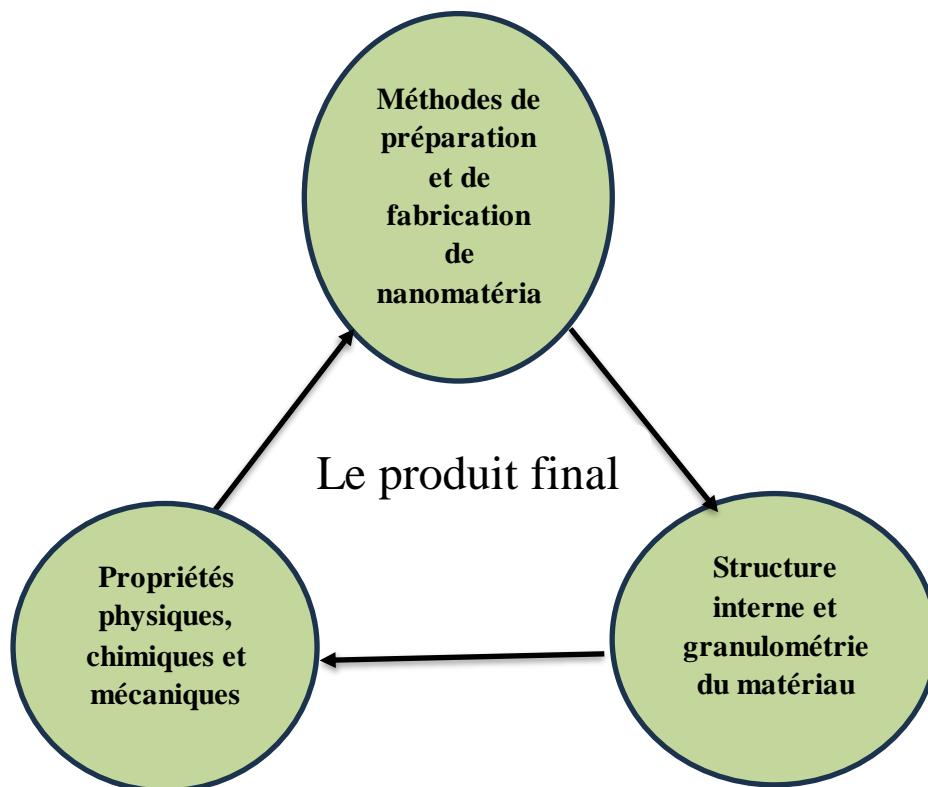


Figure 19: Cours sur la fabrication des nanomatériaux[19].

Il existe également d'autres techniques qui permettent de préparer des particules de très petites dimensions, telles que l'arc électrique, le laser, le plasma, et d'obtenir ainsi des grains de très petites dimensions qui contrôlent certaines propriétés du matériau : Arc

Électrique, laser, plasma et on obtient ainsi des grains de très petites dimensions qui

Contrôlent certaines propriétés du matériau, telles que : le détachement (propriétés mécaniques), les propriétés magnétiques, et des phénomènes qui ne sont effectifs qu'à l'échelle du nanomètre.

Dans la deuxième partie ascendante, les structures et les matériaux sont construits de manière contrôlée, à partir d'atomes ou de molécules. Les méthodes de préparation des nanomatériaux peuvent être classées en trois catégories : Préparation physique, préparation chimique et préparation mécanique.

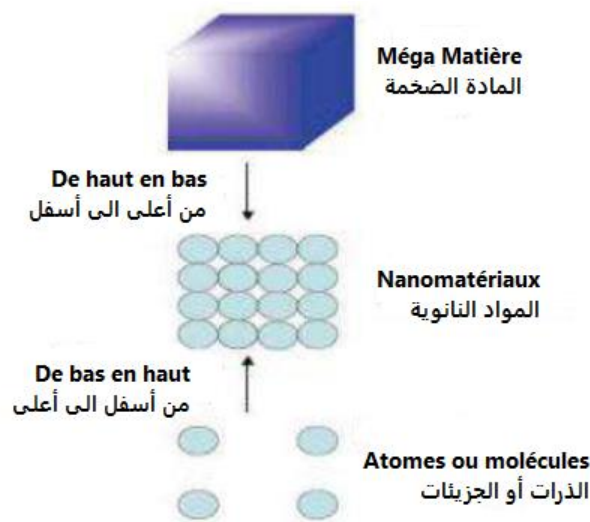


Figure 20: méthodes de catalyse des nanomatériaux[19].

8 .Les propriétés importantes des nanomatériaux:

8.1.Propriétés mécaniques :

Les nanotechnologies améliorent les propriétés mécaniques des matériaux métalliques et de leurs alliages, en augmentant leur dureté et leur résistance à différents poids. Ce résultat est obtenu en réduisant la taille des grains des matériaux et en contrôlant l'agencement de leurs atomes. Par exemple, la réduction de la taille des grains des céramiques peut améliorer leur durabilité, ce qui n'est pas possible avec les céramiques conventionnelles.

8.2.Point de fusion:

La température de fusion des matériaux est affectée par la réduction des dimensions de leurs grains. Par exemple, le point de fusion de l'or est généralement de 1064°C, mais lorsque la taille des grains d'or est réduite, le point de fusion peut baisser d'environ 500°C.

8.3.Propriétés magnétiques :

La force d'un aimant dépend entièrement des dimensions des grains du matériau à partir duquel l'aimant est fabriqué. Lorsque les dimensions des grains sont réduites au niveau nanométrique, leur surface extérieure augmente, ce qui entraîne une augmentation du nombre d'atomes à la surface. Plus le nombre d'atomes à la surface augmente, plus la force et l'intensité de l'aimant augmentent.

8.4.Propriétés électriques :

La petite taille des grains des nanomatériaux a un effet positif sur leurs propriétés électriques. Lorsque la taille des grains est faible, la capacité du matériau à conduire le courant électrique est considérablement accrue. Par conséquent, les nanomatériaux sont utilisés dans la fabrication de micro capteurs et de puces électroniques dans les appareils modernes, qui ont des spécifications techniques élevées.

8.5.Propriétés chimiques :

Si les nanoparticules sont homogènes et ont la même taille, leur réactivité est accrue. Parmi les propriétés biologiques, on peut citer la perméabilité accrue des nanomatériaux pour pénétrer les barrières biologiques, l'amélioration de la cicatrisation des plaies et la biocompatibilité. Cela facilite l'administration de médicaments et de substances thérapeutiques à des zones cibles à travers les membranes biologiques et les vaisseaux sanguins[20].

9.Les raisons des différentes propriétés des nanoparticules :**9.1.Taille des particules :**

Les propriétés des matériaux telles que la conductivité et la couleur ne changent pas en fonction de la taille, mais lorsque la taille atteint l'échelle du nanomètre, leurs propriétés changent. Par exemple, le silicium à une taille normale est considéré comme un matériau sombre qui ne rayonne pas, mais lorsqu'il atteint une taille de 1 nanomètre, il rayonne. Lorsqu'il mesure 1 nanomètre, il rayonne en bleu, et lorsqu'il mesure 3 nanomètres, il rayonne en rouge

9.2.La forme des particules :

Les propriétés des nanoparticules dépendent de leur forme, qui peut être sphérique, tubulaire, hexagonale ou en forme de goutte d'eau.

9.3.Composition des particules :

De quel type d'atomes ou de molécules une nanoparticule est-elle constituée et combien y en a-t-il

9.4.Le degré d'agrégation :

Certaines nanoparticules ont des atomes ou des molécules très éloignés les uns des autres, tandis que d'autres ont des atomes ou des molécules regroupés et collés les uns aux autres. Les molécules ou les atomes sont regroupés, et la différence de degré de regroupement des molécules d'une particule à l'autre entraîne une modification.

9.5.Distribution :

La distribution des molécules ou des atomes à l'intérieur de la particule peut être régulière ou irrégulière, et peut être stable ou instable.Par exemple, si les particules de silicium sont uniformément réparties dans la solution, elles irradient toute la solution, mais après l'avoir laissée pendant plusieurs jours, elles deviennent irrégulièrement réparties et tombent au fond. Si les particules de silicium sont uniformément réparties dans la solution, elles irradient toute la solution, mais après l'avoir laissée quelques jours, leur répartition devient irrégulière et elles tombent au fond, de sorte que toute la solution devient radioactive.

9.6.Confinement quantique :

Certaines substances sont confinées dans deux dimensions, de sorte que le mouvement des électrons se fait dans une seule direction, et certaines substances sont confinées dans une seule dimension, de sorte que les électrons se déplacent dans deux directions. Substances sont confinées dans une seule dimension, de sorte que les électrons se déplacent dans deux directions[21].

10.Les objectifs futurs de la nanotechnologie :

Les nanotechnologies ont des applications prometteuses dans divers domaines qui affectent directement la vie humaine, c'est pourquoi leurs produits mettent du temps à apparaître sur le marché. L'expérimentation et la recherche pour mettre au point des traitements, des aliments ou même des armes nécessitent de la patience et du dévouement. En outre, elles ont des applications potentielles dans l'habillement, l'électronique, les télécommunications, etc., ce qui

les fait rêver d'un avenir plein de possibilités imaginatives qui se réaliseront peut-être dans plusieurs années.

Au fur et à mesure que la recherche et le développement progressent, les nanoparticules s'appliquent de plus en plus à notre vie quotidienne. Cette technologie offre un potentiel énorme pour résoudre certains des plus grands défis de l'humanité[22].



Partie 02

Bibliographique



Chapitre III :
Application des nanoparticules dans
la boue de forage



1. Matériel et méthode :

1.1. Préparation des nanoparticules :

Dans les études précédentes sur les expériences menées par certains chercheurs pour préparer différentes nanoparticules, nous avons mentionné la première expérience de préparation de nanoparticules de gilsonite, dans laquelle certains matériaux ont été utilisés et une série d'étapes pratiques ont été suivies, comme suit :

Matériels:

- Poudre de gilsonite naturelle
- Acide sulfurique (H₂SO₄)
- Acide nitrique (HNO₃)
- Eau distillée
- Billes d'acier
- Gaz argon

La préparation:

Les chercheurs ont d'abord fait réagir la gilsonite naturelle avec un mélange d'acide sulfurique et d'acide nitrique pour la rendre hydrophile. La gilsonite fonctionnalisée a ensuite été recueillie et lavée soigneusement avec de l'eau distillée jusqu'à ce que le pH soit ajusté entre 6 et 7, puis la suspension a été filtrée et enfin séchée. La gilsonite fragile a ensuite été broyée à l'aide d'un broyeur planétaire sous atmosphère d'argon, puis la poudre de gilsonite fragile a été placée dans un ballon cylindrique en acier inoxydable, et le ballon a été scellé. Le rapport pondéral entre les billes d'acier et la gilsonite fragile a été fixé à 1/10, la vitesse de rotation du ballon à 360 tours par minute et la durée de broyage à 100 heures[23].

Dans la deuxième expérience, Majeed et ses collègues ont utilisé certains types de nanohybrides tels que le MWNTTiO₂ (100 nm, pureté 95 %, surface spécifique 80-100 m²/g), ZrO₂ (4,46 nm, pureté 99 %, surface spécifique 85 m²/g) FMWCNTs (14 nm, pureté 99% et surface spécifique 220 m²/g) Ils ont ensuite mesuré les composants cristallins, les morphologies et les tailles des nanoparticules par diffraction des rayons X (XRD), microscopie électronique à transmission (TEM) et spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Ils ont également préparé de l'acide sulfurique (H₂SO₄), de l'acide nitrique (HNO₃), du chlorure de titane (TiCl₄), de l'hydroxyde de sodium (NaOH), du carbonate de calcium (CaCO₃) et de la

bentonite sodique (57 μm de taille et 2,48 g/cm^3 de densité) Sous forme de poudre sèche et a été utilisé sans purification supplémentaire[24] .

Dans l'expérience récente de préparation de nanoparticules de magnésium par synthèse verte, les chercheurs ont synthétisé des nanoparticules de magnésium en réduisant le permanganate de potassium (KMnO_4) à l'aide d'un extrait de feuille de *Ficus retusa*. Les nanoparticules ont été synthétisées selon la méthode rapportée par Srivastava et Choubey (Srivastava et Choubey 2020). Ils ont préparé l'extrait aqueux de feuilles de *Ficus retusa* en faisant bouillir une solution de sel d'Angus sous forme de poudre qui a été oxydée en α -MNP de taille nanométrique. Cette étude est une extension d'un travail précédent qui traitait de l'application de feuilles séchées à l'air avec de l'eau pendant un certain temps. L'extrait a ensuite été utilisé pour minimiser les nanoparticules synthétisées vertes dans les fluides de forage à base d'eau[25].

1.2. Préparation des fluides de forage:

Après avoir préparé les différents nano composites mentionnés ci-dessus, les mêmes chercheurs pour chaque expérience ont également préparé des boues de forage à base d'eau, ajouté des nanoparticules à certains échantillons, puis évalué l'effet de ces nanoparticules sur les propriétés de ces fluides, dont les méthodes de préparation seront décrites dans les détails et dans l'ordre suivants :

Tout d'abord, la préparation de la boue de forage dans laquelle ils ont utilisé des nanoparticules de gilsonite:

Matériels:

- Eau de mer
- Hydroxyde de sodium
- Carbonate de sodium
- Chlorure de sodium
- Chlorure de potassium
- Amidon
- Gomme xanthane
- Barytine
- Nanoparticules
- PAC-FV

La préparation:

Ils ont préparé un tonneau de laboratoire équivalant à 350 ml de boue de forage à base aqueuse en ajoutant dans l'ordre de l'eau de mer, de l'hydroxyde de sodium (soude caustique), du carbonate de sodium (soude de lavage), du chlorure de sodium, du chlorure de potassium, de l'amidon, du PAC-LV, de la gomme xanthane et de la barytine.

Ces ingrédients ont ensuite été soigneusement mélangés à l'aide d'un agitateur commercial Hamilton Beach à 11 500 tours/minute selon la procédure suivante. Dans un premier temps, 2 g d'hydroxyde de sodium ont été ajoutés à 266,4 ml d'eau de mer et agités pendant 3 minutes. Cette étape a été répétée pour dissoudre 2 g de carbonate de sodium, 46 g de chlorure de sodium et 15 g de chlorure de potassium dans la solution de boue de forage, séparément et dans l'ordre mentionné ci-dessus. Lors de la deuxième étape, 5 g d'amidon ont été ajoutés à la solution et agités pendant 10 minutes. Cette étape a été répétée pour dissoudre 2 grammes de PAC-LV et 1 gramme de gomme xanthane dans la solution de boue de forage séparément. Enfin, 56 grammes de barytine ont été ajoutés à la solution de boue et agités pendant 15 minutes. En outre, pour homogénéiser la boue de forage de base, elle a été mélangée pendant 15 minutes supplémentaires.

Pour préparer l'échantillon contenant des nanoparticules, ils ont ajouté 10 grammes de nanoparticules hybrides (HGNs) à la solution de boue de forage de base après avoir ajouté du chlorure de potassium, puis ils ont placé la solution dans l'appareil à ultrasons pendant 20 minutes. Ensuite, les autres composants ont été ajoutés à la boue de forage de base, étape par étape[23].

Dans l'expérience suivante, les chercheurs ont préparé la boue de forage à laquelle ils ont appliqué une série de types de nanoparticules à différentes concentrations en suivant une série de procédures :

Matériels:

- Bentonite
- Eau douce
- Carbonate de calcium
- Particules nanométriques

La préparation:

Pour cette étude, les chercheurs ont préparé des échantillons d'argile à base d'eau contenant 10 grammes de bentonite et 350 millilitres d'eau douce. La bentonite a été délicatement ajoutée à l'eau à l'aide d'un mélangeur multi mixer 9B de FANN. Pour éviter l'agglomération de la bentonite dans l'eau et la formation de liquides biphasiques, le mélange a été effectué pendant 15 minutes à une vitesse constante de 15 000 tr/min. Ensuite, une quantité spécifique de carbonate de calcium a été utilisée pour augmenter la densité de l'échantillon d'argile à 1281,44 kg/m³. 171,52 g de carbonate de calcium ont été délicatement mélangés à un mélange d'eau et de bentonite et le mélange a été mélangé pendant 10 minutes. L'échantillon de fluide de forage à base d'eau a été vieilli à 27°C pendant 24 heures pour assurer la cristallisation de la bentonite dans le mélange. Après cette période, l'échantillon de boue a été mélangé à l'aide d'un multi mixer pendant 5 minutes pour homogénéiser la structure de la boue. Pour analyser l'effet des nanoparticules sur les propriétés des fluides de forage, des nanoparticules avec des fractions pondérales de 0,01, 0,05, 0,1 et 0,5 % en poids ont été mélangées à la boue de référence. Les échantillons expérimentaux ont ensuite été mélangés pendant deux heures à l'aide d'un agitateur orbital à 1500 tours/minute, suivi d'un bain ultrasonique pendant une demi-heure pour obtenir un mélange stable avant chaque analyse expérimentale. Les essais pilotes ont été réalisés en stricte conformité avec les procédures de l'API 13D. La composition du fluide de forage et les concentrations de nanoparticules ont été sélectionnées sur la base de la littérature (Kang et al., 2015) et optimisées pour obtenir de bonnes performances à de faibles concentrations. Le résumé des échantillons de fluide de forage préparés dans le cadre de cette étude est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 6: Échantillons de fluide de forage et titres abrégés [24] .

Échantillon	Titre abrégé
10 g Bentonite +350 ml Eau douce +171.52 carbonate de calcium	R
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 carbonate de calcium +0.01 wt.% MWNT-TiO2 hybrids	MWNT-TiO2 hybrids - 0.01%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 carbonate de calcium +0.05 wt.% MWNT-TiO2 hybrids	MWNT-TiO2 hybrids - 0.05%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 carbonate de calcium +0.1 wt.% MWNT-TiO2 hybrids	MWNT-TiO2 hybrids - 0.1%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 calcium carbonate +0.5 wt.% MWNT-TiO2 hybrids	MWNT-TiO2 hybrids - 0.5%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce r+ 171.52 carbonate de calcium +0.01 wt% ZrO2	ZrO2 - 0.01%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 calcium carbonate + 0.05 wt% ZrO2	ZrO2- 0.05%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 carbonate de calcium + 0.1 wt% ZrO2	ZrO2- 0.1%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce r +171.52 calcium carbonate +0.5 wt% ZrO2	ZrO2- 0.5%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 carbonate de calcium +0.01 wt% FMWCNTs	FMWCNTs- 0.01%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 calcium carbonate +0.05 wt% FMWCNTs	FMWCNTs- 0.05%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 carbonate de calcium +0.1 wt% FMWCNTs	FMWCNTs- 0.1%
10 g Bentonite +350 mL Eau douce +171.52 carbonate de calcium +0.5 wt% FMWCNTs	FMWCNTs- 0.5%

Dans cette dernière expérience, nous examinons la préparation d'une boue de forage dans laquelle les chercheurs ont appliqué des nanoparticules d'oxyde de manganèse fabriquées dans le respect de l'environnement.

Matériels:

- Bentonite
- Eau du robinet
- Bentonite pré-saturée Presse-agrumes

- Nanoparticules de dioxyde de manganèse
- Gomme xanthane
- PAC

La préparation:

20,00 g de bentonite dans 400 ml d'eau du robinet ont été mélangés à l'aide d'un mélangeur Hamilton Beach (HB) à la vitesse I pendant 20 minutes, puis le mélange a été laissé pendant une nuit de 16 heures pour hydrater complètement l'argile. La sève de bentonite pré-saturée (PHBS) a d'abord été mélangée à la vitesse I à l'aide d'un mélangeur Hamilton Beach. Des nanoparticules de dioxyde de manganèse (MNP) ont ensuite été ajoutées au PHBS et mélangées à la même vitesse. Le système PHBS-MNP a été soumis à des ultrasons pendant 30 minutes avant que le XG et le PAC ne soient ajoutés au système. Enfin, la suspension a été mélangée au taux de cisaillement le plus élevé dans un mélangeur HB à la vitesse III et refroidie à température ambiante dans un bain-marie pendant 15 à 20 minutes. Enfin, la suspension a été homogénéisée pendant 3 minutes à 15 000 tr/min à l'aide de l'outil HT 1025 dans un homogénéisateur HG-15D. La concentration de XG et de PAC a été déterminée à 0,25 % w/v chacun, soit 1,00 g de XG et 1,00 g de PAC pour préparer un échantillon de boue de 400 ml [25].

2.Résultats:**2.1.L' effet des nanoparticules sur les Propriétés visqueuses :****2.1.1.Effet des nanoparticules de glyconien sur les Propriétés visqueuses :**

En fonction du taux de cisaillement de la boue de forage, le comportement de la viscosité correspond à la direction de la fluidité fine. Cette propriété est très souhaitable pour l'utilisation de liquides dans les puits.

La figure 22 montre la courbe de viscosité en fonction du taux de cisaillement pour la boue de base et l'échantillon, dans les conditions avant et après le processus de laminage à chaud. D'après ces résultats, il est clair que le processus de fluidification fine de la boue de base est considérablement réduit avant et après le laminage à chaud, en particulier au taux de cisaillement le plus faible, où une réduction de 70 % est observée. Par conséquent, après le laminage à chaud, l'argile de base perd sa capacité à suspendre les résidus à des taux de cisaillement faibles et

pendant le processus de forage. Ce résultat prouve également la dégradation des polymères à 149°C. En outre, la fluidité de l'échantillon d'argile est supérieure à celle de l'argile de base avant le laminage à chaud, en particulier au taux de cisaillement le plus faible, où une augmentation de 50 % est observée, ce qui peut accroître la capacité de suspension à de faibles taux de cisaillement. Bien que la courbe de viscosité de l'échantillon d'argile montre une tendance à la baisse après le laminage à chaud, son approche de fluide mince est remarquablement cohérente avec l'argile de base, confirmant pleinement la stabilité à la température des HGN dans le maintien des propriétés des polymères. D'autres chercheurs s'accordent également sur la contribution du comportement de fluidité fine au transport des déchets de forage.

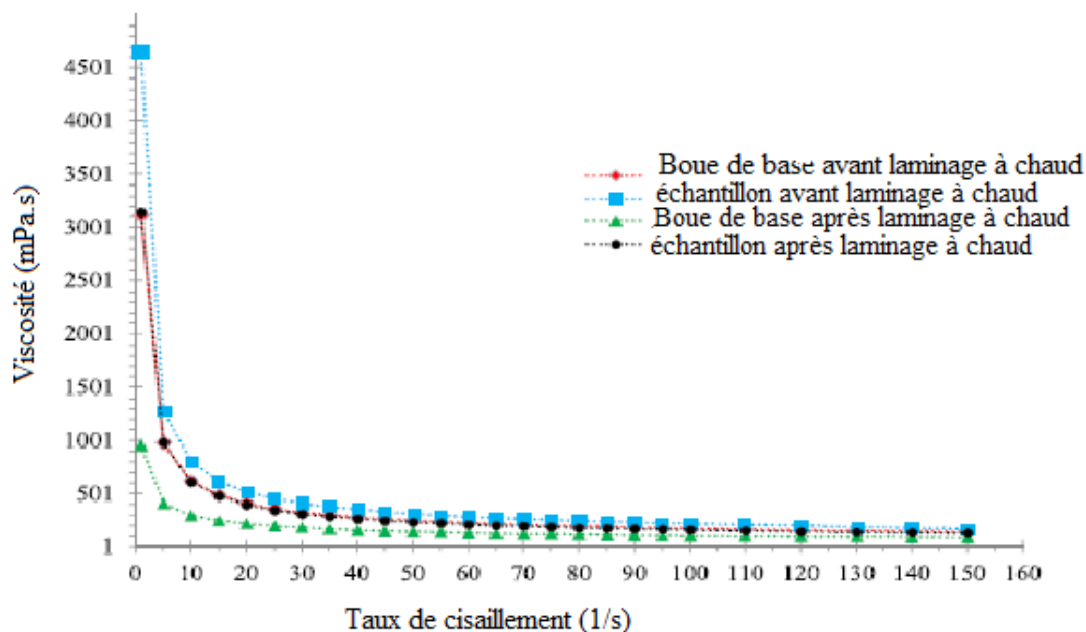


Figure 21: Viscosité en fonction du taux de cisaillement avant le laminage à chaud et après laminage à chaud[23].

La limite de ramollissement et la viscosité plastique sont considérées comme les paramètres les plus importants de la viscosité des boues de forage. La figure 23 montre l'effet de l'utilisation des HGN sur les propriétés visqueuses de la boue de forage avant et après le processus de laminage à chaud. Comme le montre la figure 6a, la viscosité plastique de la boue de base est de 23 mPa.s avant le processus de laminage à chaud, alors que la viscosité plastique de l'échantillon de boue a augmenté jusqu'à 27 mPa.s. Cela peut être attribué à l'utilisation de HGNs dans les boues de forage. Ceci peut être attribué à l'utilisation de nanoparticules HGNs avec de longues chaînes moléculaires qui peuvent augmenter la viscosité globale de la boue.

De plus, l'augmentation d'environ 17% de la viscosité plastique de l'échantillon de boue avant le laminage à chaud peut confirmer la dispersion complète des nanoparticules HGNs, augmentant ainsi la friction mécanique entre les particules solides et les fluides présents dans la boue de forage. En outre, ces particules portent une charge électrique, de sorte que la réduction de la taille des HGN peut entraîner une augmentation de la viscosité plastique. Bien qu'une diminution de 8,7 % de la viscosité plastique de la boue de base et une diminution de 37 % de la viscosité plastique de l'échantillon de boue après le processus de laminage à chaud aient été rapportées, ces diminutions sont bénéfiques car une viscosité plastique élevée indique une viscosité élevée au niveau du trépan, ce qui réduit la vitesse de rotation du train de tiges. En outre, une viscosité plastique élevée peut poser plusieurs problèmes, tels que l'augmentation de la probabilité d'un collage différentiel de la tige de forage.

D'autre part, il convient de noter que la viscosité plastique dépend du taux de cisaillement. Par conséquent, cette diminution significative de la valeur de la viscosité plastique de l'échantillon de boue prouve qu'à mesure que la température augmente, les HGN entraînent une diminution supplémentaire de la friction entre les particules solides. En outre, la chaleur intense produite par la friction pendant les opérations de forage ne peut être ignorée. Par conséquent, l'échantillon d'argile, comparé à l'argile de base, présente un meilleur comportement de fluidité après le processus de laminage à chaud. Ceci est attribué à la présence de nanoparticules HGNs dans l'argile de base, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus dans la figure 21.

Le point de rendement est la capacité des fluides de forage à transporter les déblais de forage du fond du puits à la surface. En outre, en termes de capacité de transport des déblais de forage, les fluides de forage ayant des valeurs de point de rendement plus élevées sont bien meilleurs que ceux ayant des valeurs de point de rendement plus faibles. La figure 6b montre que la portance de l'échantillon de boue a diminué de 3,3 % par rapport à la boue de base avant le processus de laminage à chaud, ce qui est considéré comme une diminution négligeable. Cependant, une réduction de 70 % de la portance de la boue de base a été observée après le processus de laminage à chaud. Cela entraîne une réduction significative de la capacité du fluide de forage à transporter les déchets. En outre, il convient de noter que l'échantillon de boue n'a montré qu'une diminution de 31 % de la valeur de durabilité. Par conséquent, les nanoparticules HGNs peuvent maintenir les propriétés visqueuses des polymères et les forces du gel après le processus de laminage à chaud.

La relation entre la durabilité du fluide et la viscosité plastique (LR/PV) permet de déterminer l'efficacité du fluide de forage lors des opérations de nettoyage du puits. Une faible viscosité plastique associée à un LR/PV élevé indique une efficacité optimale. En d'autres termes, l'effet de la viscosité sur le processus de nettoyage des puits est déterminé par le rapport LR/PV, une propriété liée au taux de cisaillement des fluides. Le rapport LR/PV reflète le schéma d'écoulement des fluides de forage, et un rapport LR/PV élevé est nécessaire pour augmenter les propriétés de fluidité de la boue de forage, ainsi que l'efficacité du transport des déblais de forage, ce qui permet d'améliorer les performances de la pompe et d'optimiser le taux de forage.

Sur la base des valeurs LR/PV, le tableau 9 montre qu'après le processus de laminage à chaud, ce rapport a diminué de 67% pour la boue de base, tandis que le rapport YP/PV de la boue échantillon a augmenté de 9,5%. Par conséquent, l'ajout de nanoparticules de HGNs peut améliorer l'efficacité de nettoyage des puits de la boue de base après le processus de laminage à chaud. L'étude de Beg et al. a montré que l'ajout de TiO₂ aux fluides de forage à base d'eau peut réduire leur viscosité plastique (PV), la durabilité du fluide (LR) et le rapport LR/PV de 13 %, 24,2 % et 13 %, respectivement, après un traitement de laminage à chaud [23].

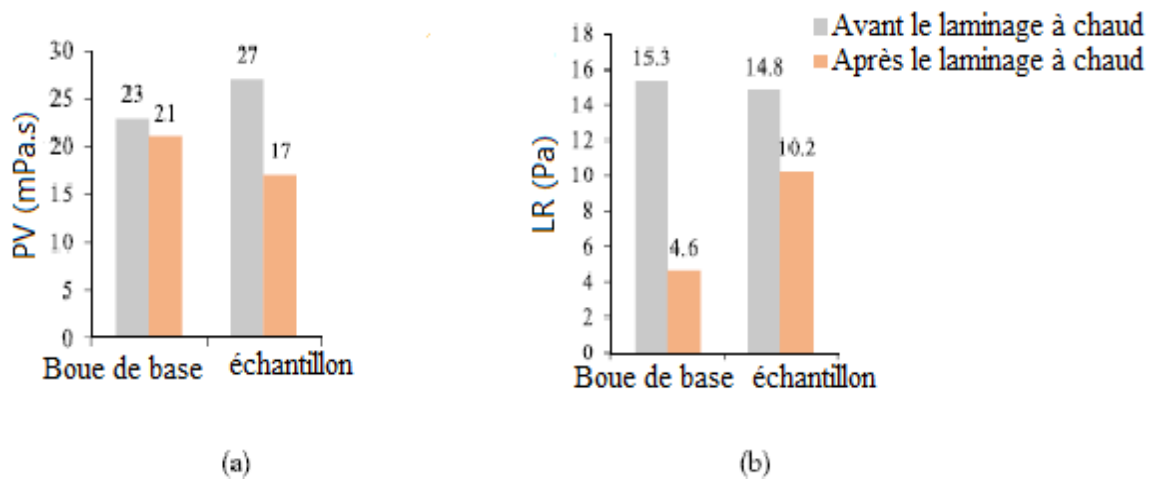


Figure 22: Propriétés rhéologiques de la boue de base de 80 lb/pi3 et des échantillons

(a) PV et (b)LR. [23].

2.1.2. Effet des nanoparticules de ZrO₂ et d'autres types de particules à différentes concentrations sur les Propriétés visqueuses:

Résultats obtenus à partir des expériences rhéologiques pour les échantillons de fluides de forage constitués de nanoparticules sont présentés dans le tableau 8. Comme le montre le tableau, la valeur limite souple et la viscosité plastique augmentent à mesure que la concentration de nanoparticules s'accroît.

La valeur de la viscosité plastique du fluide de forage de base (échantillon de référence) est de 12 mPa. Comme le montre la figure 23, la viscosité plastique augmente en raison de la force d'interaction accrue entre les nanoparticules et les autres matériaux dans le système de boue.

Malgré cela, la valeur de la viscosité plastique pour chaque type de nanoparticules varie à différents pourcentages de poids allant de 0,01 % à 0,5 % w/w. En outre, la valeur de la viscosité plastique a augmenté jusqu'à environ 18 mPa en utilisant des nanoparticules de ZrO₂ à un taux compris entre 0,1 % et 0,5 % en poids. En outre, la valeur de la viscosité plastique a également été améliorée et a presque doublé pour atteindre 28 mPa en mélangeant des nanotubes à parois multiples (FMWCNT) à 0,5 % en poids. Les résultats pour les nano hybridés hybrides MWNT-TiO₂ étaient similaires aux autres types de nanoparticules. En utilisant 0,5 % en poids de nano hybridés hybrides MWNT-TiO₂ comme échantillon de référence, on a obtenu une valeur de viscosité plastique de 21 mPa [24].

Tableau 7: Paramètres rhéologiques de divers échantillons expérimentaux [24].

Échantillon	Bingham Plastique		Droit de l'énergie		Force du gel	
	Viscosité plastique, mPa s	Limite de ramollissement, Pa	Indice de consistance, Pa s ⁿ	Indice de comportement du flux	10 s, Pa	10 min, Pa
R	12	16	6.6553	0.374	2.5	3
MWNT-TiO2 hybrids - 0.01%	13	16	6.5596	0.382	2.5	3.5
MWNT-TiO2 hybrids - 0.05%	14	17	8.1875	0.357	3.1	4
MWNT-TiO2 hybrids - 0.1%	16	19	8.7620	0.366	3.5	4.4
MWNT-TiO2 hybrids - 0.5%	18	19	11.4433	0.333	4	5.1
FMWCNTs- 0.01%	16	19	9.6718	0.349	3	4.2
FMWCNTs- 0.05%	21	25	11.4433	0.367	4	5.5
FMWCNTs- 0.1%	25	34	14.8428	0.365	5	7
FMWCNTs- 0.5%	28	41	19.4872	0.346	7	9
ZrO2 - 0.01%	13	17	7.3735	0.368	2.6	3.2
ZrO2- 0.05%	15	17.5	7.3735	0.368	3	3.8
ZrO2- 0.1%	17.5	18.5	10.5336	0.341	3.6	4.5
ZrO2- 0.5%	21	20	14.8428	0.306	4.5	5

Il convient de noter que la viscosité est définie comme la friction interne dans les couches de liquide, et donc que la présence de nanoparticules dans les couches de liquide peut entraîner une augmentation de la viscosité.

L'optimisation de la viscosité plastique est obtenue en attachant des nanoparticules à d'autres particules solides, en particulier la bentonite, directement ou indirectement par l'intermédiaire de matériaux latéraux spéciaux. Les nanoparticules et l'argile bentonitique peuvent se lier ou s'associer directement ou par le biais de certaines liaisons chimiques intermédiaires afin d'augmenter la viscosité plastique de l'argile bentonitique.

L'augmentation la plus importante de la viscosité plastique de l'argile est obtenue en utilisant une concentration de 0,5 % en poids de nanotubes à parois multiples (FMWCNT), le meilleur choix, suivi par les nanohybrides MWNT-TiO2 et les nanoparticules de ZrO2, respectivement.

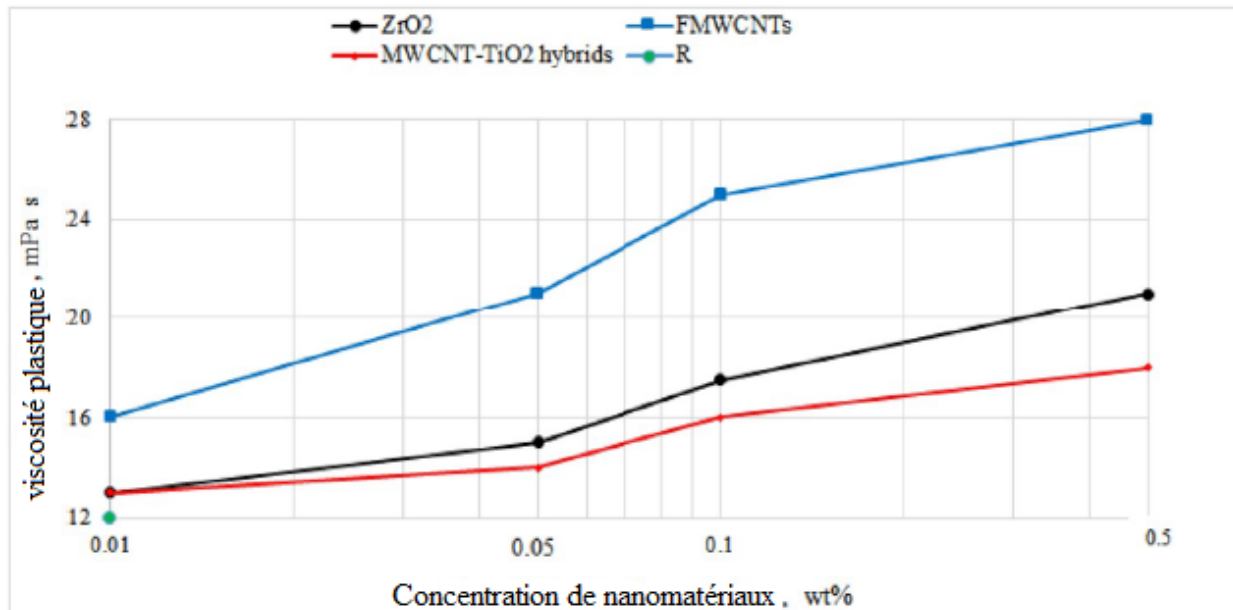


Figure 23: Tendance de la viscosité plastique pour les échantillons expérimentaux avec différents nanomatériaux [24].

la limite de ramollissement est absolument nécessaire pendant le processus de forage pour déplacer les déblais de forage et également pour éviter une contrainte supplémentaire sur la pompe de forage.

L'augmentation de la limite de ramollissement de la boue est causée par l'attraction électrostatique entre les particules avec des ions négatifs. Ces ions négatifs conduisent à la formation d'une phase homogène stable sans agglomération ni précipitation. De plus, ce système d'ions négatifs entraîne une augmentation de la limite molle et de la viscosité du fluide de forage. La valeur de la limite molle pour la boue de base a été obtenue à 7,5 Pa.

L'effet des nanoparticules sur la limite de ramollissement des échantillons de boue est illustré dans la figure 24. La valeur de la limite de ramollissement des échantillons de boue montre une efficacité différente selon les quantités et les types de nanomatériaux.

Cette propriété des nanoparticules de ZrO₂ dans les fluides de forage à base d'eau montre une tendance à une lente amélioration à toutes les concentrations étudiées jusqu'à 10 Pa. La valeur limite de ramollissement la plus élevée de l'argile a été mesurée à 20 Pa avec un rapport de poids de 0,5 % pour les nanotubes à parois multiples (FMWCNT). La valeur limite de ramollissement des FMWCNT dans l'argile de base a montré une augmentation significative. Quant au nanotube hybride MWNT-TiO₂, sa valeur a maintenu une stabilité relative à environ 10,5 Pa à une concentration et un poids de 0,5 %.

En conclusion, les nanotubes multi-parois (FMWCNT) se sont avérés être le meilleur agent pour augmenter la limite de ramollissement.

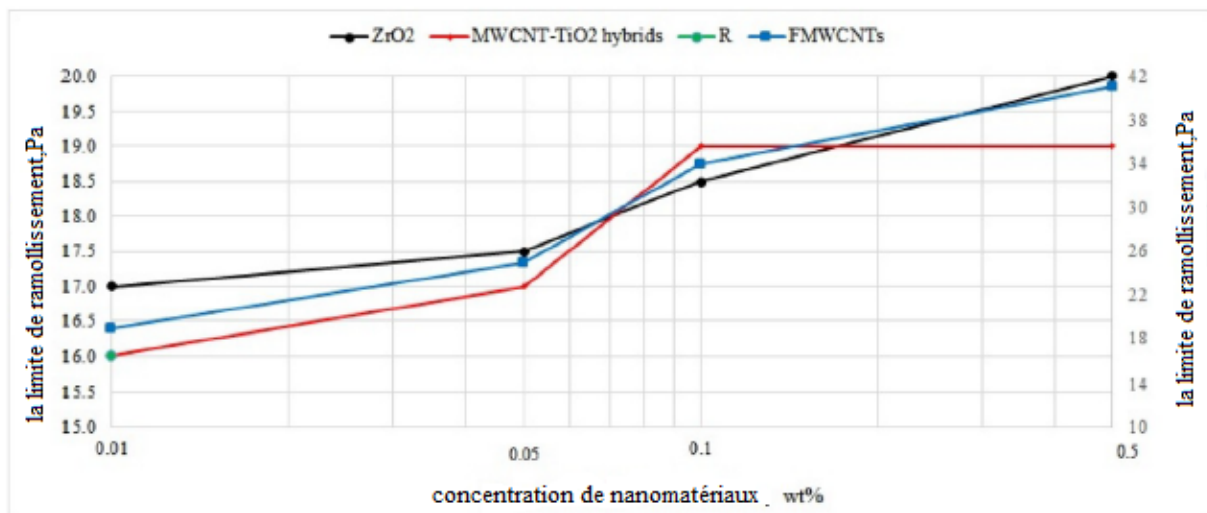


Figure 24: Le comportement de la propriété LR pour les nanomatériaux - WBDF à différentes fractions massiques (R, ZrO₂ et hybrides MWNT-TiO₂ référencés à l'axe Y gauche et FMWCNTs sur l'axe Y droit) [24].

La figure 25 montre la résistance d'un gel de fluide de forage à base d'eau contenant différents nanomatériaux définis en

- A. Valeur initiale après 10 secondes - et
- b. Valeur finale après 10 minutes.

(Les axes Y de gauche suivent les nanocomposites hybrides R, ZrO₂ et MWNT-TiO₂, tandis que l'axe Y de droite suit les nanotubes à parois multiples (FMWCNT)).

Les résultats indiquent que l'ajout de nanoparticules à un fluide de forage à base d'eau améliore la résistance du gel du fluide de forage, en particulier à une concentration de 0,5 % en poids. Ceci est cohérent avec les conclusions de certaines études précédentes qui indiquaient l'interaction des nanoparticules avec le matériau de base et le fluide de forage ambiant à base d'eau.

La résistance du gel est un autre paramètre clé des propriétés des boues de forage, qui permet de suspendre les déblais de forage et les solides de la boue lorsque le système de circulation est arrêté pendant le remplacement de l'assemblage de fond de trou ou les opérations

de maintenance. En général, la capacité des boues de forage à retenir les déblais de forage pendant la circulation et à les suspendre, en particulier lorsque la circulation de la boue est arrêtée, est très importante.

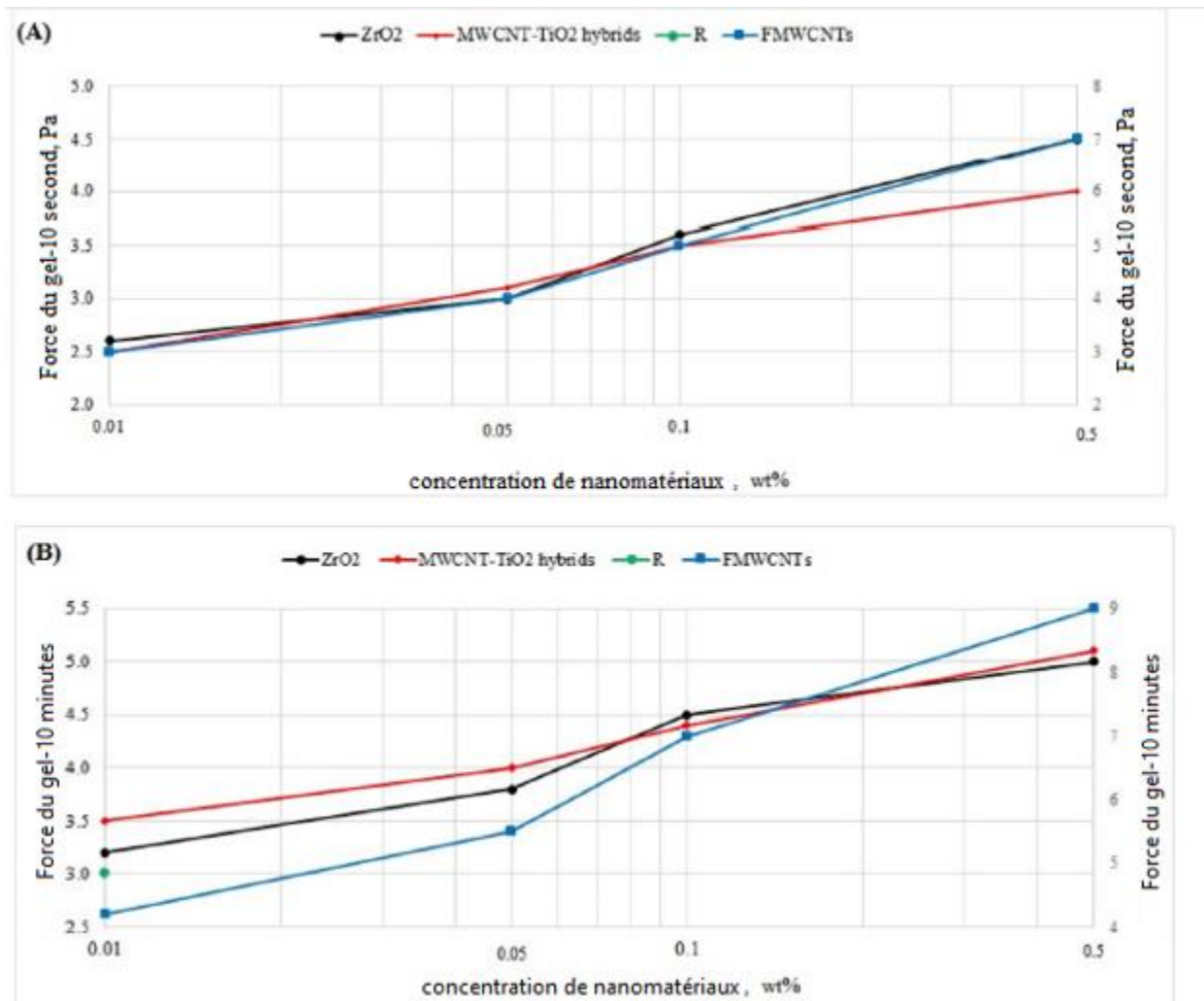


Figure 25: Résistance du gel de WBDF contenant différents nanomatériaux déterminée en (A) initial pour une durée de 10 s - et (B) final pour une durée de 10 min (R, ZrO2 et hybrides MWNT-TiO2 sur l'axe Y gauche et FMWCNT sur l'axe Y droit) [24].

Les résultats des expériences sur la force du gel, mesurée initialement pendant 10 secondes puis pendant 10 minutes, La figure 25 montre l'effet des nanoparticules sur la force du gel à différentes concentrations pendant 10 secondes et 10 minutes. La force du gel de l'échantillon de référence (échantillon 1) a été mesurée et était de 2,5 Pa au début et de 3 Pa à la fin.

Comme le montre la figure 26, l'utilisation de 0,01 à 0,5 % p/p de FMWCNT dans l'échantillon de référence a permis de multiplier par trois la résistance du gel par rapport à

l'échantillon de référence. En utilisant des hybrides MWNT-TiO₂ dans des échantillons de fluides de forage à base d'eau, la résistance du gel a augmenté pour toutes les concentrations d'hybrides MWNT-TiO₂ utilisées dans cette étude. Des valeurs de résistance du gel de 4 et 5,1 Pa, respectivement, ont été obtenues à une concentration de 0,5 %.

En utilisant des nanoparticules de ZrO₂, les forces du gel (début et fin) ont été lentement augmentées à 4,5 et 5 Pa à 0,5% w/w. Des améliorations de la résistance du gel de 180 % et 200 % ont été obtenues pour 10 secondes et 10 minutes, respectivement, par rapport à l'échantillon de base.



Figure 26: Images photographiques de 0,5 % en poids de FMWCNT, (A) gâteau de boue formé dans un environnement HPHT (B) Ajout dans de l'eau douce [24].

En conclusion, les meilleures propriétés de résistance au gel ont été obtenues en utilisant des nanotubes de carbone à double paroi (FMWCNT) par rapport à d'autres nanomatériaux étudiés avec le même rapport de poids. En général, un nettoyage inadéquat des puits peut entraîner de graves problèmes pendant les opérations de forage, tels que l'effondrement du puits après le forage, la réduction de la durée de vie du trépan et le déclenchement partiel de l'équipe de forage, ce qui fait perdre du temps et de l'argent pour mener à bien l'opération de forage. Le nettoyage du trou de forage, qui est la fonction principale de la boue de forage, est amélioré en augmentant sa viscosité et en limitant sa porosité. Ainsi, l'utilisation de nanomatériaux tout en augmentant la viscosité et la limite d'élasticité de la boue de forage améliore le processus de nettoyage du puits [24].

2.1.3. Effet des nanoparticules de dioxyde de manganèse sur les Propriétés visqueuses:

Les formulations de boue de forage ont été mélangées avec différentes quantités de nanoparticules de MNP et soumises à un processus de laminage à chaud pendant 16 heures à 100°C. La figure 27 montre les paramètres de viscosité pour différents types de mélanges d'argile avant et après le laminage à chaud.

Pour les échantillons de boue fraîchement préparés (avant le laminage à chaud), il a été observé que les valeurs de viscosité apparente (AV), de viscosité plastique (LR), de point de ramollissement (LR) et de résistance au gel (Gel-0 et Gel-10) augmentaient toutes avec la concentration des nanoparticules de MNP. Par exemple, l'ajout de 0,6 % p/v de MNP à l'argile de base (BM) a augmenté les valeurs de AV, PV, LR, Gel-0 et Gel-10 de 71 %, 43 %, 90 %, 154 % et 103 %, respectivement, dans des conditions BHR. Cela montre que la présence de nanoparticules a eu le moins d'effet sur la viscosité plastique (PV), tandis que la force du gel (Gel-0) a été la plus affectée[25].

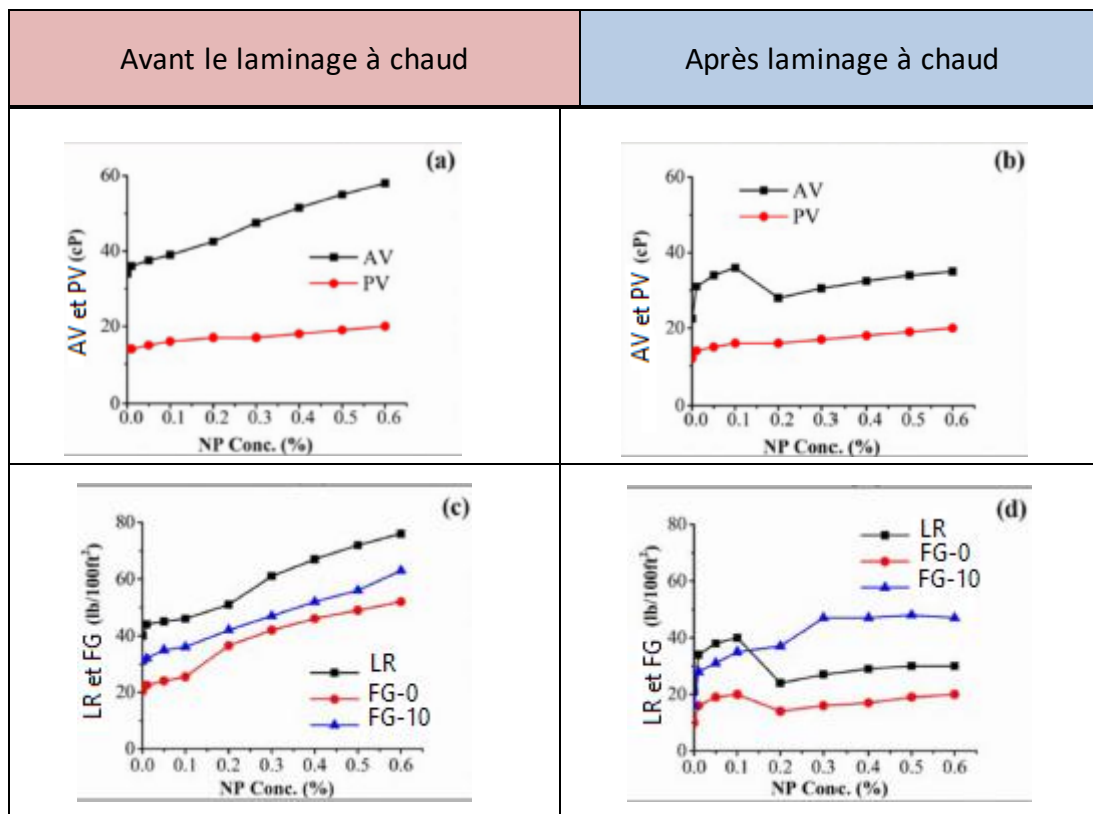


Figure 27: Paramètres rhéologiques des fluides de forage avant et après laminage à chaud à 100 °C pendant 16 h (AV Viscosité apparente, PV Viscosité plastique, YP Point d'écoulement, GS Force du gel, Gel-0 GS initial, Gel-10 10 min ou GS final) [25].

L'augmentation de la valeur AV est souhaitable pour un meilleur nettoyage du puits, car la capacité de levage du plancton rocheux (segments) dépend également de la valeur AV des fluides de forage [25].

La valeur PV des fluides de forage devrait être plus faible pour un taux de pénétration plus rapide, mais ce paramètre dépend également d'autres paramètres visqueux et, en général, l'augmentation de la valeur AV augmente la valeur PV. Dans le cas des formulations d'argile actuelles, l'augmentation de la valeur AV (et d'autres paramètres visqueux, comme le montre la figure 28a,c) peut être obtenue en ajoutant des nanoparticules de MNP, ce qui aura un effet négligeable sur la valeur PV, car le graphique de la valeur PV semble presque droit par rapport aux graphiques des autres paramètres [25].

La limite souple (LR) est un paramètre important pour la capacité de l'argile à transporter du plancton (segments), et des valeurs plus élevées de la limite souple permettent de transporter facilement des segments plus lourds. Ici, l'effet des nanoparticules sur la limite molle peut aider à optimiser la capacité de l'argile à transporter le plancton. L'ajout de seulement 0,01 % p/v de MNP a augmenté les valeurs AV, PV et LR de l'argile de base (BM) de 6 %, 0 % et 10 %, respectivement, et les valeurs correspondantes pour 0,05 % p/v de MNP dans l'argile de base (c.-à-d. pour BNM05) étaient d'environ 10 %, 7 % et 13 %. Les données ci-dessus montrent que même à une très faible concentration de nanoparticules de MNP, une amélioration significative de la viscosité du fluide de forage peut être obtenue en utilisant des MNP avec l'avantage supplémentaire d'une augmentation plus faible de la valeur de viscosité plastique (PV) pour maintenir un taux de pénétration plus rapide [25].

La force du gel (FG) de la boue est importante pour maintenir le plancton (déblais) en suspension dans le fluide pendant l'arrêt du processus de forage. Si la force du gel est insuffisante, le plancton commencera à se déposer au fond et risque d'obstruer le train de tiges. Les nanoparticules de MNP améliorent la résistance initiale et finale du gel à mesure que la concentration des nanoparticules augmente [25].

Effet du vieillissement et de la concentration en nanoparticules sur les mélanges de boues de forage [25].

Le processus de vieillissement a un effet sur les mélanges de boues de forage contenant des polymères, où les propriétés visqueuses dues à la dégradation des biopolymères (par exemple XG et PAC) sont réduites dans une certaine mesure, en fonction de la température (Beg et al.

2018). Dans le cas présent, l'argile de base (BM) contient du XG et du PAC, et le vieillissement a entraîné une diminution de ses propriétés visqueuses, comme le montre la figure 5. Cependant, l'ajout d'une petite quantité de nanoparticules réduit l'ampleur de cette dégradation induite par le vieillissement. En l'absence de nanoparticules, les valeurs de viscosité apparente et de souplesse de l'argile de base (BM) ont diminué respectivement de 34 % et 48 % en raison du vieillissement à 100°C, et les valeurs correspondantes (diminution de la viscosité apparente et de la souplesse) pour les mélanges d'argiles BMN01, BMN05 et BMN10 étaient respectivement d'environ (14 % et 23 %), (9 % et 16 %) et (8 % et 13 %). Les données expérimentales indiquent que l'augmentation de la concentration de nanoparticules améliore la stabilité thermique des mélanges de boues de forage contenant des polymères, ce qui est essentiel pour l'utilisation de fluides de forage à base de polymères à des températures élevées[25].

À une concentration de MNP supérieure à 0,1 % w/v, les valeurs de la viscosité apparente, de la limite de ramollissement et de la résistance du gel (Gel-0) ont diminué de manière significative. L'ajout supplémentaire de nanoparticules a progressivement amélioré les propriétés visqueuses après le laminage à chaud (figure 27b,d). Ce comportement particulier peut être dû à l'agglomération des nanoparticules à des concentrations plus élevées. Lorsque la concentration en MNP atteint 0,2% w/v, le nombre de nanoparticules dans le système de suspension devient si élevé que les nanoparticules interagissent les unes avec les autres plus fréquemment pendant la période de laminage à chaud de 16 heures et commencent à s'agglomérer dans le système de suspension, réduisant les propriétés visqueuses d'un pourcentage plus élevé que prévu. L'augmentation de la concentration en MNP augmente le nombre d'agglomérats de MNP et accroît les propriétés visqueuses (Figure 27b,d).

Un autre facteur favorisant l'agglomération est la nature ferromagnétique de l' α -MnO₂ en présence d'ions K⁺ présents dans le système argileux. [25]

2.2.Effet des nanoparticules sur la perte de filtration:

2.2.1.Effet des nanoparticules de HGNs sur la perte de filtration:

La pression hydrostatique de la colonne de fluide de forage doit être supérieure à la pression de la formation pour éviter les éruptions de puits d'hydrocarbures. Par conséquent, le fluide de forage a tendance à pénétrer dans les formations poreuses de la paroi du puits, ce qui entraîne une perte de fluide de forage et des dommages à la formation. La perte par percolation est donc l'un des principaux facteurs qui jouent un rôle important dans l'endommagement de la formation. Comme le montre le tableau 9, la présence de HGN réduit la perte de filtration selon

la norme API pour l'échantillon de boue de 36% par rapport à la boue de base après le processus de laminage à chaud. En outre, dans des conditions de haute pression et de haute température, ces nanoparticules réduisent de 79,4 % le taux de perte de filtration de l'échantillon de boue par rapport à la boue de base.

Tableau 8: Caractéristiques rhéologiques et de perte de filtration du WBMS 80 lb ft. (NC : Non calculé) [23].

Rhéologie (49 °C)	Boue de base		Échantillon	
	Avant le laminage à chaud	Après le laminage à chaud	Avant le laminage à chaud	Après le laminage à chaud
600 tr/min (mPa.s)	76	51	83	54
300 tr/min (mPa.s)	53	30	56	37
LR/PV (1/s)	665,2	219	548	600
IAP Perte de filtration (ml)	NC	5	NC	3.2
HPHT Perte de filtration (ml)	NC	98.2	NC	20.2
HPHT Gâteau de filtration (in)	NC	6/32"	NC	3/32

Gâteau de boue :

L'épaisseur du gâteau de l'échantillon de boue a été réduite de 50 % par rapport à la boue de base, car un gâteau de boue plus fin s'est formé sur la paroi du puits. Cependant, l'ajout de nanoparticules de sépiolite au fluide de forage à base d'eau a entraîné une diminution de la perte de filtration dans des conditions de basse pression et de température (BPBT) et de haute pression et de température (HPHT) de 27,3 % et 43,2 %, respectivement. Par rapport aux HGN, la valeur de la perte de filtration des nanoparticules de sépiolite était plus élevée dans les deux conditions. En d'autres termes, les HGN ont bloqué de manière intéressante les pores du papier filtre et ont donc réduit de manière significative la valeur de la perte de filtration [23].

2.2.2.Effet des nanoparticules de ZrO₂ et d'autres types de particules à différentes concentrations sur la perte de filtration:

Les propriétés de filtration ont été évaluées en effectuant des tests expérimentaux dans différentes conditions de pression et de température, appelées conditions BPBT et HPHT. Les propriétés de filtration ont été étudiées en obtenant certains paramètres tels que le volume de la perte de filtration et l'épaisseur du gâteau de boue après une période de temps spécifiée. Cette propriété en BPBT pour l'échantillon de référence était de 4,2 ml après une demi-heure. Les

résultats des expériences mesurés aux positions BPBT sont présentés dans le tableau 10 et la figure 28-A [24].

Tableau 9: Propriétés de filtration de diverses nanoparticules dans de faibles conditions [24].

Échantillons	Volume de filtrat de boue, ml	Pourcentage de variation du volume du filtrat de boue par rapport à la boue de référence, %.	Pourcentage de variation du volume du filtrat de boue par rapport à la boue de référence, %.	Pourcentage de variation de l'épaisseur, %
R	4.2	–	2.381	–
MWNT-TiO2 hybrids - 0.01%	4.1	–2.38	2.381	0
MWNT-TiO2 hybrids - 0.05%	3.6	–14.29	2.381	0
MWNT-TiO2 hybrids - 0.1%	3.3	–21.43	2.381	0
MWNT-TiO2 hybrids - 0.5%	3	–28.57	2.381	0
ZrO2 - 0.01%	3.4	–19.05	1.588	–33.33
ZrO2- 0.05%	3.1	–26.19	1.588	–33.33
ZrO2- 0.1%	3.4	–19.05	1.588	–33.33
ZrO2- 0.5%	3.1	–26.19	1.588	–33.33
FMWCNTs- 0.01%	2.8	–33.33	2.381	0
FMWCNTs- 0.05%	2.6	–38.10	1.588	–33.33
FMWCNTs- 0.1%	2.3	–45.24	1.588	–33.33
FMWCNTs- 0.5%	2.3	–45.24	1.588	–33.33

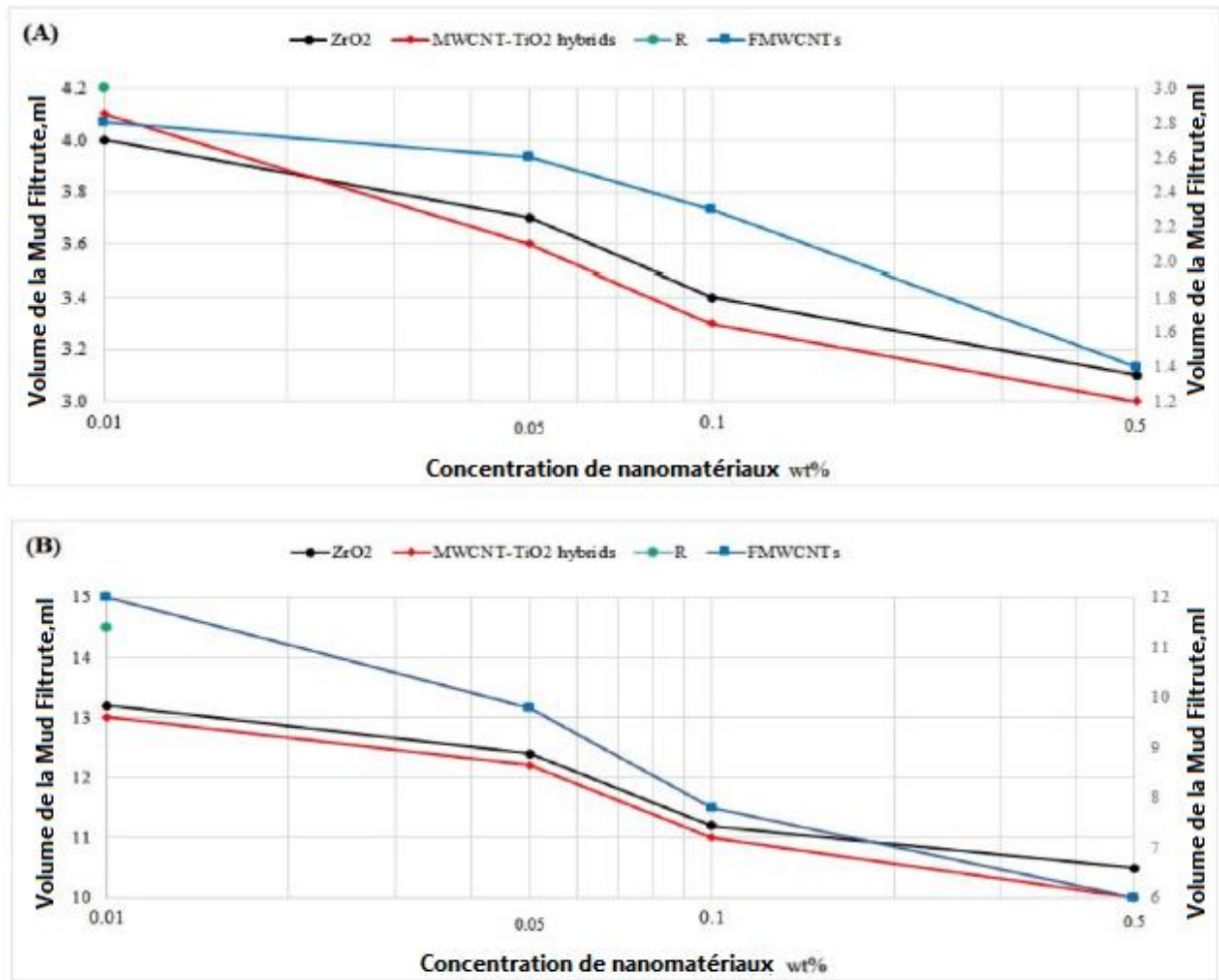


Figure 28: Volumes de filtrat de boue des échantillons expérimentaux avec diverses nanoparticules (A) : Les environnements LPLT et (B) HPHT (hybrides MWNT-TiO₂ et ZrO₂ sur l'axe Y gauche et FMWCNT sur l'axe Y droit) [24].

Comme le montre la figure 28-A, l'utilisation de ZrO₂ à différentes concentrations permet de réduire légèrement le volume de perte de filtration jusqu'à 3,1 ml à une concentration de 0,5 % en poids. Le volume de la perte de filtration est également fortement réduit à 1,8 ml en ajoutant 0,5 % en poids de nanotubes de carbone à double paroi (FMWCNT). En utilisant 0,01 % en poids d'hybrides MWNT-TiO₂ dans l'échantillon d'argile de référence, un volume de perte de liquide de 4,1 ml a été obtenu et cette propriété a été lentement réduite à 3 ml avec une concentration de 0,5 % en poids d'hybrides MWNT-TiO₂ [24].

La raison de la réduction du volume de la perte de filtration avec les FMWCNT est l'augmentation des forces électrostatiques entre les ions négatifs des FMWCNT et les autres particules qui créent un système de suspension favorable tout en évitant l'agglomération des

particules. Les particules non agglomérées et les particules bien suspendues dans le système de fluide de forage peuvent entraîner la formation d'un gâteau de boue mince et peu perméable à la surface de la zone perdue [24].

L'utilisation de nanotubes de carbone à double paroi dans un système de fluide de forage à base d'eau peut réduire considérablement le volume de filtration de la boue [24].

Il existe une relation indirecte entre la concentration de nanotubes de carbone à double paroi et la diminution du volume de filtration. Par conséquent, le volume de filtration de la boue diminue à mesure que la concentration de nanotubes de carbone à double paroi augmente. Cela est dû à la force d'attraction électrostatique entre les nanotubes de carbone à double paroi et d'autres particules solides telles que la bentonite à bord positif avec la face ou le bord négatif des nanotubes de carbone à double paroi. La force d'attraction qui se produit entre les nanotubes de carbone à double paroi et les autres particules peut créer une structure de gel qui améliore la consistance de la boue et réduit le volume de filtration de la boue. Certains facteurs jouent un rôle dans la détermination de la force entre deux particules et consistent en des diamètres, des constituants chimiques et une charge électrique. Ces forces conduisent à la formation d'agrégats [24].

Il convient de noter que la réduction de l'épaisseur du gâteau de boue (mm) réduit la probabilité de coller au trépan pendant le processus de forage, ce qui est l'un des avantages de l'utilisation de nanotubes de carbone à double paroi dans un fluide de forage à base d'eau [24].

La réduction la plus importante de l'épaisseur du gâteau de boue, jusqu'à 67 %, a été observée en utilisant 0,5 % de nanotubes de carbone à double paroi par rapport à l'échantillon de base sans nanomatériaux, comme le montre le tableau 10 [24].

Les résultats expérimentaux mesurés lors des essais de filtration HPHT sont présentés dans le tableau 11 et la figure 28-b. Comme le montre le tableau 11, l'augmentation de la concentration de nanotubes de carbone à double paroi entraîne une réduction du volume de filtration de la boue des échantillons expérimentaux en raison de la formation d'un gâteau de filtration solide et rigide. En fait, à mesure que la concentration de nanotubes de carbone à double paroi augmente, l'épaisseur du gâteau de boue diminue en raison de l'augmentation du nombre de nanoparticules dans le système de fluide de forage, ce qui entraîne le colmatage de très petits trous et de petites cavités (de taille nanométrique) à la surface du gâteau de boue. Par conséquent, la réduction du volume de filtration de la boue augmente [24].

Ces essais pilotes ont été menés pour montrer que le fluide de forage conçu dans cette étude de recherche peut résister aux conditions HPHT qui se produisent dans les puits profonds. Les nanoparticules étudiées dans cette étude ont également montré la même tendance de test de filtration pour les conditions BPBT et HPHT [24].

Il est important de noter que le gâteau de boue pour tous les échantillons expérimentaux utilisant du ZrO₂ et des FMWCNT est plus court que pour l'échantillon de référence. Le volume de filtration de la boue recueilli lors de l'essai de filtration hybride MWNT-TiO₂ est supérieur à celui de la boue de référence. Ces essais pilotes ont montré que les propriétés de filtration de la boue, telles que le volume de filtration et la qualité du gâteau, étaient considérablement améliorées par l'utilisation de différentes concentrations de ZrO₂ et de FMWCNT. Une meilleure qualité, un gâteau de boue plus fin et un volume de filtration plus faible étaient liés respectivement aux FMWCNT et au ZrO₂ [24].

Les nanomatériaux ont été liés à des additifs de boue de forage pour créer un gâteau de boue mince et très peu perméable afin d'éviter l'entrée de pertes de fluides. Par conséquent, tous les nanomatériaux introduits dans cette recherche peuvent réduire le volume de filtration de la boue et il peut être affirmé dans plusieurs types de recherches antérieures que les agents nanodiamétriques ainsi que les compositions modifiées, y compris les nanofeuilles et les nanotubes, obstruent les boucles de nanopores des infrastructures excavées pour empêcher l'invasion des fluides. Ainsi, la réduction la plus importante du volume de filtration de la boue est obtenue à une concentration de 0,5 % en poids de nanotubes de carbone à double paroi. En augmentant la température, les propriétés de filtration de la boue, telles que le volume de filtration et l'épaisseur du gâteau de boue, augmentent pour de nombreuses raisons telles que la réduction de la viscosité de la boue et la destruction des produits chimiques qui réduisent la filtration. À une concentration de 0,5 % en poids de nanotubes de carbone à double paroi, l'épaisseur du gâteau de boue est considérablement réduite, jusqu'à 33 %, par rapport à l'échantillon de base dans un environnement HPHT [24].

Tableau 10: Caractéristiques de filtration des fluides de forage avec différents types de nanomatériaux Et concentrations dans des conditions HPHT (6894,75 kPa et 176,67 C) [24].

Échantillons	Volume de filtrat de boue, m	Changements dans le volume du filtrat de boue par rapport à la boue de référence, %.	Épaisseur du gâteau de boue, mm	Variation de l'épaisseur, %.
R	14.5	–	4.763	–
MWNT-TiO2 hybrids - 0.01%	13	–10	4.763	0
MWNT-TiO2 hybrids - 0.05%	12.2	–16	4.763	0
MWNT-TiO2 hybrids - 0.1%	11	–24	3.969	–17
MWNT-TiO2 hybrids - 0.5%	10	–31	3.969	–17
ZrO2 - 0.01%	13.2	–9	4.763	0
ZrO2- 0.05%	12.4	–14	4.763	0
ZrO2- 0.1%	11.2	–23	4.763	0
ZrO2- 0.5%	10.5	–28	3.969	–17
FMWCNTs- 0.01%	12	–17	4.763	0
FMWCNTs- 0.05%	9.8	–32	3.969	–17
FMWCNTs- 0.1%	7.8	–46	3.175	–33.5
FMWCNTs- 0.5%	6	–59	3.175	–33.5

2.2.3.Effet des nanoparticules de dioxyde de manganèse sur la perte de filtration:

Perte de fluide de boue à haute pression et haute température (HPHT)

La perte de fluide de forage à haute pression et haute température (HPHT) a été testée à 150°C et les résultats obtenus sont présentés dans la figure 29. Comme pour la perte de fluide BPBT, la perte de filtration dans des conditions HPHT a également diminué en raison de l'ajout de nanoparticules, mais les taux de filtration par unité de surface étaient plus du double de ceux des conditions BPBT, où la surface de filtration pour la haute pression et la température (HPHT) est environ la moitié de celle de la basse pression et de la température (BPBT). L'observation

intéressante suivante est que le changement du taux de filtration après le laminage à chaud est d'environ 82 % pour la suspension de base (BM) et qu'il est tombé à environ 74 % pour le mélange de suspension contenant 0,1 % p/v de MNP. L'effet de 0,1 % p/v de MNP avant le laminage à chaud a été de réduire la perte de fluide HPHT d'environ 11 %, ce qui a rétabli une valeur d'environ 15 % après le laminage à chaud. À la concentration la plus élevée, l'efficacité du MNP est restée similaire à celle de 0,1 % p/v pour réduire l'effet du laminage à chaud sur la filtration HPHT. La réduction de la perte de filtration HPHT prouve que les nanoparticules contribuent à minimiser efficacement la perte de liquide [25].

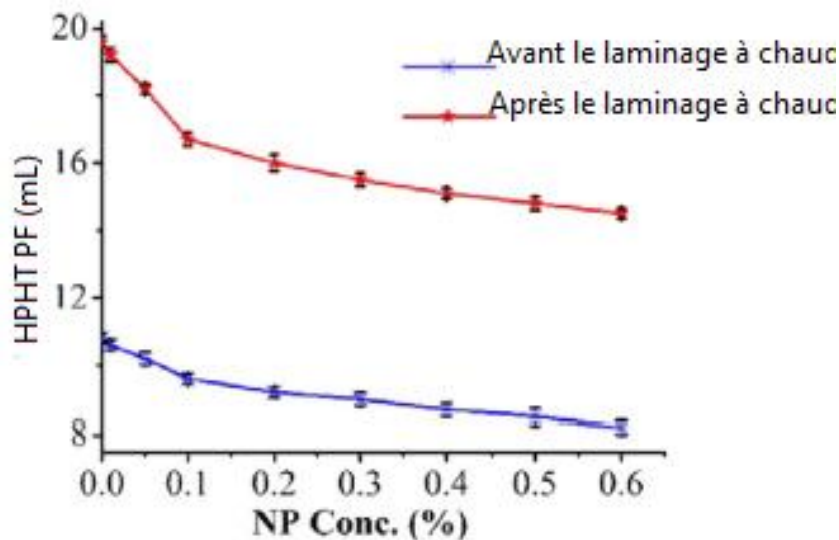


Figure 29: Perte de fluide HPHT des formulations de boue contenant des nanoparticules avant et après le laminage à chaud [24].

2.3. L'effet des nanoparticules sur la conductivité électrique:

2.3.1. Effet des nanoparticules de ZrO₂ et d'autres types de particules à différentes concentrations sur la conductivité électrique:

Cette partie des expériences a été menée pour déterminer la compatibilité des composants chimiques utilisés pour préparer la boue avec la bentonite de sodium, ainsi que la pertinence du changement de conductivité électrique des échantillons expérimentaux. Il est important de savoir que l'interprétation des diagraphies de puits dépend fortement de la valeur de la conductivité électrique du fluide de forage [24].

L'interprétation des diagraphies peut être peu fiable et invalide en raison du changement de conductivité électrique des échantillons expérimentaux. La boue doit offrir une bonne conductivité électrique, ce qui entraîne des signaux faibles ou inappropriés pour les mesures des diagraphies. La conductivité de l'électricité à travers le fluide de forage est l'une des principales raisons de la fuite d'électricité défectueuse dans le sous-sol [24].

Dans cette recherche expérimentale, un conductimètre a été utilisé pour mesurer la conductivité électrique de chaque échantillon. Les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette recherche sont présentés dans le tableau 8. Comme le montre le tableau 8, il a été constaté que la stabilité des nanoparticules de nanotubes de carbone à double paroi (FMWCNT) est chimiquement favorisée. Ainsi, les propriétés conductrices des échantillons expérimentaux étudiés ne montrent aucun signe de discontinuité [24].

Tableau 11: La conductivité électrique des échantillons expérimentaux conçus dans le cadre de cette recherche [24].

Échantillons	Conductivité électrique, ms/cm
R	8.46
MWNT-TiO2 hybrids - 0.01%	8.32
MWNT-TiO2 hybrids - 0.05%	8.42
MWNT-TiO2 hybrids - 0.1%	8.52
MWNT-TiO2 hybrids - 0.5%	8.55
ZrO2 - 0.01%	8.11
ZrO2- 0.05%	7.95
ZrO2- 0.1%	7.85
ZrO2- 0.5%	7.81
FMWCNTs- 0.01%	8.41
FMWCNTs- 0.05%	8.56
FMWCNTs- 0.1%	8.61
FMWCNTs- 0.5%	8.72

2.3.2.Effet des nanoparticules de dioxyde de manganèse sur la conductivité électrique:

Les nanoparticules de MNP ont affecté le pH et la conductivité électrique du fluide de forage. L'augmentation de la concentration en MNP a augmenté le pH de la composition de l'argile des échantillons fraîchement préparés (Avant le laminage à chaud) (Figure 30a,b) ainsi qu'après le vieillissement des échantillons d'argile (AHR) (Figure 30c,d). Le pH plus élevé de l'argile dû à l'ajout de nanoparticules peut être attribué à la faible propriété alcaline des nanoparticules de MNP dans l'eau, car il s'agit d'un oxyde métallique. Le pH de l'argile de base (BM) est passé à 9,08 lorsque 0,1 % p/v de MNP a été ajouté, et l'ajout ultérieur a conduit à une

augmentation progressive du pH de l'argile jusqu'à 10,08 à la concentration la plus élevée. Après vieillissement, la valeur de pH la plus élevée de 8,92 a été obtenue pour l'argile contenant 0,6 % de MNP (BMN60) et la valeur pour BMN10 était de 8,51. La conductivité électrique des échantillons d'argile BHR et AHR a progressivement augmenté en raison de l'ajout de nanoparticules et est restée comprise entre 4,99 et 7,65 mS/cm pour les échantillons fraîchement préparés et entre 5,11 et 7,47 mS/cm après laminage à chaud de l'argile. L'argile de base (BM) a montré des valeurs de conductivité électrique de 4,85 et 4,83 mS/cm pour Avant le laminage à chaud et Après le laminage à chaud, respectivement. Il est évident que les nanoparticules sont efficaces pour améliorer la conductivité électrique des fluides de forage, ce qui est utile pour la diaggraphie des puits en vue de l'évaluation des formations. À une concentration de 0,1 % de MNP, la conductivité électrique de la boue de base a augmenté de 16 %, ce qui constitue une amélioration remarquable[25].

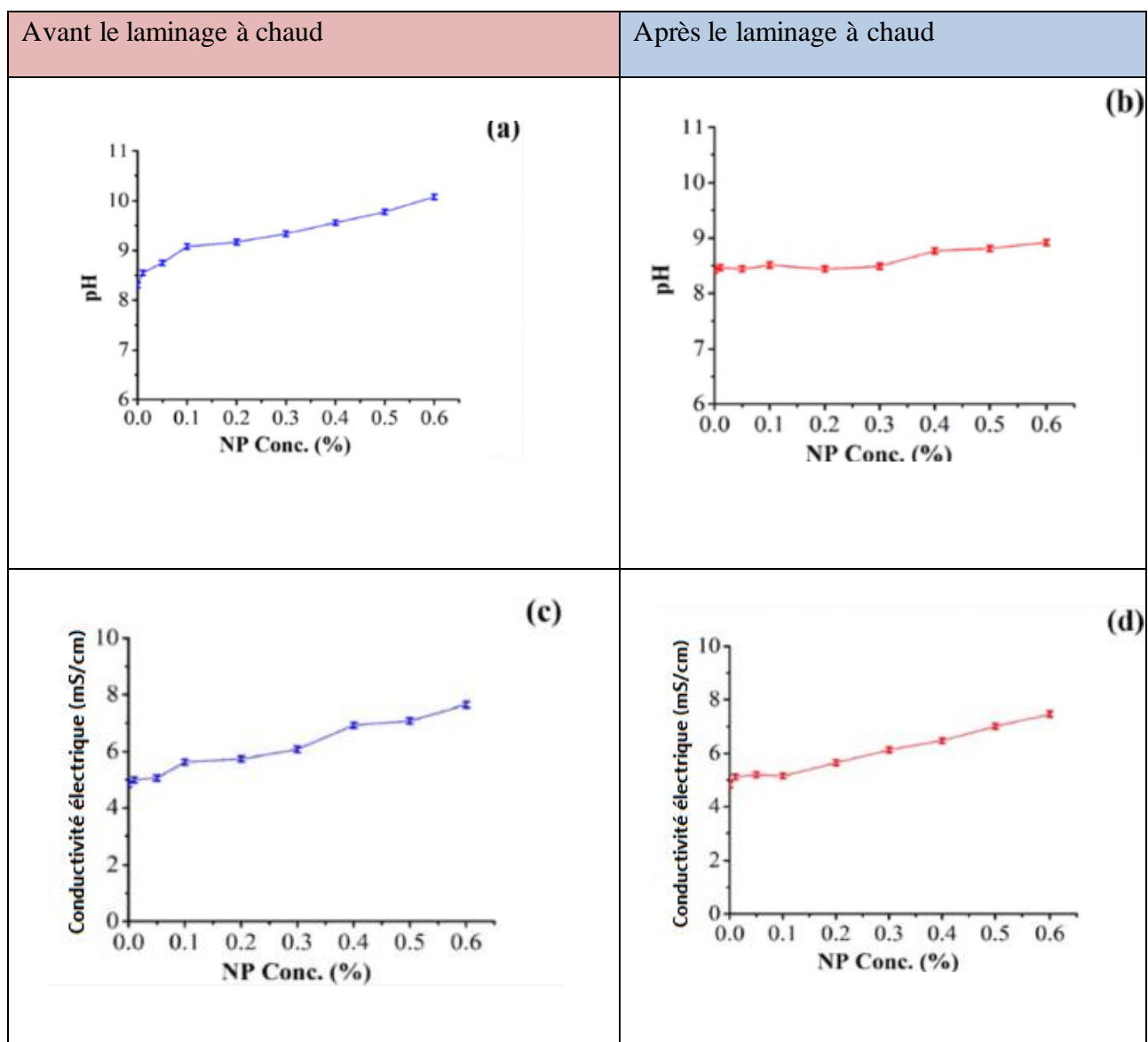


Figure 30: 10 pH et conductivité électrique des fluides de forage avant laminage à chaud (A et B) et après laminage à chaud (C et D) à 100 °C (mesurés à la température ambiante, c'est-à-dire 25 °C) [25].

Effet du vieillissement à haute température sur les mélanges d'argile

L'effet du vieillissement à haute température (c'est-à-dire 100, 125 et 150 °C) sur les échantillons d'argile avec et sans nanoparticules a également été étudié, et les résultats sont présentés dans la figure 30 dans les informations complémentaires. L'argile de base (BM) et BMN10 (argile de base avec 0,1% w/v de nanoparticules) ont été utilisées pour évaluer l'effet de la température de vieillissement sur les propriétés de viscosité et la perte de BPBT des échantillons d'argile. L'augmentation de la température de vieillissement de 100 à une valeur plus élevée (125 et 150°C) a entraîné une diminution de tous les paramètres de viscosité. La valeur de la perte de liquide API a augmenté avec l'augmentation de la température de vieillissement pour les deux formulations d'argile. Les nanoparticules ont contribué à réduire la dégradation thermique des propriétés de l'argile, comme le montre la comparaison entre les figures 30a et 30b. La présence de nanoparticules de MnO₂ a réduit la perte de filtration et même après le laminage à chaud, la valeur de perte de liquide API est restée inférieure aux valeurs correspondantes pour l'échantillon d'argile de base. Cela confirme la conclusion selon laquelle les nanoparticules sont très efficaces pour améliorer les performances des fluides de forage, même à des températures élevées [25].

- Les résultats ont montré que l'ajout de HGN améliorerait les propriétés visqueuses de la boue de forage avant le laminage à chaud, et maintenait de manière significative l'efficacité du forage dans le processus de nettoyage du puits, même après le traitement de laminage à chaud. En effet, le rapport YP/PV de l'échantillon de boue a augmenté de 9,5 % après le laminage à chaud, alors que le rapport YP/PV de la boue de base a diminué de 67 % après le laminage à chaud. La perte de filtration a également diminué de manière significative dans les conditions API et HPHT après le laminage à chaud. En outre, l'épaisseur du gâteau de boue a diminué dans les conditions HPHT. En raison de l'abondance des mines naturelles de gilsonite dans de nombreuses régions du monde et des

méthodes favorables à la production de HG et de HGN, le coût de production a été considérablement réduit par rapport à la fabrication d'autres nanoparticules telles que le SiO₂ et le TiO₂. En outre, les HGN sont des additifs multifonctionnels et compétitifs utilisés pour améliorer les propriétés des fluides de forage à base d'eau[23].

- L'utilisation d'hybrides MWNT-TiO₂ et d'oxyde de zirconium (ZrO₂) peut augmenter la limite souple, la viscosité plastique et la résistance au gel des fluides de forage, bien que cette tendance à la hausse puisse ne pas être souhaitable en raison d'effets secondaires indésirables sur le volume de filtration de la boue. La viscosité plastique, la limite de ramollissement et la résistance au gel du fluide de forage à base d'eau ont été considérablement améliorées par l'utilisation de nanotubes de carbone à double paroi (FMWCNT) à une concentration allant de 0,01 à 0,5 % en poids, ce qui est souhaitable. Les tests de perte de filtration ont montré que les nanotubes de carbone à double paroi réduisent le volume de filtration de la boue en obtenant une structure solide et cohésive dans des conditions LPLT et HPHT. L'épaisseur du gâteau de boue est considérablement réduite par l'utilisation de nanotubes de carbone à double paroi dans les systèmes de boue de bentonite. L'amélioration de la conductivité des échantillons pilotes est une autre propriété souhaitable qui améliore la conductivité électrique et les performances du processus de forage[24].
- To study the effect of laboratory-synthesized and biosynthesized α -MnO₂ nanoparticles on the rheological properties along with the fluid loss of water-based drilling fluid. The mud system was subjected to aging to study the effect of hot rolling on the aforementioned properties. It was found that the biosynthesized nanoparticles were effective in helping the drilling fluid improve rheological and filtration properties. The nanoparticles were able to improve the rheological properties of the base fluid even at the lowest concentration of 0.01 wt%, and increasing the concentration enhanced the properties. The nanoparticle-based nano-enhanced mud is effective in reducing both low and ultra-high temperature filtration loss for 100 °C aged mud samples. The presence of MNP on the surface of the clay cakes bridges the cracks on its surface and thus reduces the filtration loss. The clay formulation containing MNP showed improved electrical conductivity which aids in the recording of the clay. On peut conclure que les nanoparticules α -MnO₂ synthétisées par la voie verte peuvent être utilisées comme

additif aux fluides de forage à base d'eau pour améliorer leurs propriétés et que les fluides de forage nano-optimisés peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité des opérations de forage. Ce travail constitue une percée préliminaire de la nouveauté des nanoparticules de MnO₂ synthétisées en laboratoire dans l'amélioration des performances des fluides de forage à base d'eau. Cependant, la technologie proposée n'atteint que le niveau de préparation technologique 5 (TRL-5), que les auteurs prévoient de développer jusqu'au TRL-8, qui sera atteint après un essai réussi sur le terrain. Avant cela, des essais en laboratoire simulant l'environnement de terrain et des essais à l'échelle pilote de la technologie devront être menés, ce qui constitue le travail en cours du prochain article de recherche. Dans leurs travaux futurs, les auteurs s'attacheront à simplifier la préparation de la suspension pour faciliter l'application industrielle et à évaluer les performances des nanoparticules dans des conditions d'ultra-haute température [25].

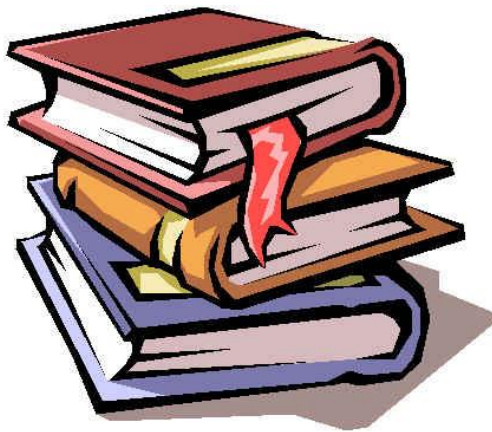
Conclusion Générale



Conclusion Générale :

L'étude de l'impact des nanoparticules sur les propriétés des fluides de forage à base d'eau est un domaine de recherche important et prometteur dans l'industrie de l'exploration pétrolière. Cette étude vise à améliorer les performances globales des fluides de forage, ce qui conduit à une meilleure efficacité des opérations de forage et à une réduction des coûts environnementaux et économiques liés à l'industrie du pétrole et du gaz. Les chercheurs ont évalué l'impact des nanoparticules sur les propriétés rhéologiques, thermiques et chimiques des fluides de forage à base d'eau. L'étude s'est concentrée sur des aspects clés tels que la stabilité thermique, la dispersion, la viscosité et le taux de filtration. Les résultats ont montré que l'ajout de nanoparticules peut améliorer de manière significative les propriétés rhéologiques des fluides de forage. L'intégration des nanoparticules a permis d'améliorer la viscosité et la cohésion, ce qui renforce la capacité du fluide à transporter les débris de forage à la surface de manière plus efficace. Maintenir la stabilité thermique des fluides de forage dans des conditions de forage à haute température est l'un des principaux défis. L'étude a montré que les nanoparticules peuvent améliorer la stabilité thermique des fluides de forage, réduisant ainsi la dégradation des fluides à une meilleure efficacité du forage, à la réduction des coûts et à la diminution des risques environnementaux. Pour réaliser ces bénéfices, il est nécessaire de continuer à investir dans la recherche et le développement, en prenant en compte les facteurs environnementaux afin de garantir une application durable et sûre de cette technologie. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer l'impact à long terme des nanoparticules, y compris leurs interactions avec d'autres produits chimiques utilisés dans les fluides de forage. L'impact environnemental de l'utilisation des nanoparticules dans les fluides de forage doit être soigneusement évalué, y compris les possibilités de recyclage et la réduction globale de l'impact environnemental. L'accent principal a été mis sur l'amélioration des propriétés des fluides de forage à base d'eau. L'étude a montré des résultats prometteurs, mais des recherches et des développements supplémentaires sont nécessaires. Les facteurs environnementaux, sanitaires et de sécurité doivent être pris en compte lors de l'utilisation des nanoparticules dans les fluides de forage.

Références bibliographique



Références :

- [1] Bureau N 2002 Interactions entre fluides de gisement et fluides de forage
- [2] Prakash A, Rasmus J, Radtke R J, Evans M and Dolman L 2012 Applications basées sur des propriétés de fluides mesurées en fond de trou
- [3] Argillier J F, Audibert-Hayet A and Duriez G 1995 Evaluation des fluides de forage HP/HT pour forages profonds *Rev. Inst. Fr. Pét.* **50** 471–89
- [4] Massam J, Browne N and Kapilla M 2005 Utilisation de granules baryte calibres comme alourdissant pour les fluides de forage
- [5] Kenney N P, Sampey J A, Smithey M, Perez J-J and Carter T S 1999 Fluide de forage en eaux profondes a base d'eau
- [6] Marcil J-S La surprenante histoire de l'exploration pétrolière au Québec
- [7] Malik O S, Manders G T and Robinson S E 2016 Dispositif et procédé pour imager un écoulement dans des puits de pétrole et de gaz à l'aide d'ultrasons doppler de réseau à commande de phase
- [8] عباس راضي عباس، أجزاء ومكونات برج الحفر، درس مقدم لطلبة جامعة ميسان، العراق، 2022.
- [9] Moussa A E, Khenniche M and Nadji I E *Analyse vibratoire du phénomène stick-slip lors de forage pétrolier* PhD Thesis
- [10] Pelfrene G Rôle du processus de forabilité des roches dans les vibrations de torsion des systèmes de forage pétrolier
- [11] Ghosn R 2016 Stabilisation des Fluides de Forage de Type Pickering Pour Applications dans les Forages Profonds et Ultra-Profonds
- [12] Tama Ali S, Belhabib A and Balla F *LES FLUIDE DE FORAGE A BASE D'HUILE: IMPACTS SUR L'ENVIRNEMENT ET TECHNIQUE DE TRAITEMENT* PhD Thesis
- [13] Belhadj C and Mzour M L 2022 *Caractérisation physico-chimique d'une boue de forage et leur impacte sur l'environnement* PhD Thesis (UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR)
- [14] Hamdaoui R, Guemmoula H-E and Djahra M E *Etude des quelque produits entrants dans la fabrication et le traitement de la boue de forage* PhD Thesis
- [15] MAHDJOUBI A and BENAMOR L *Étude statistique des paramètres du processus de forage pétrolier* PhD Thesis (UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA)
- [16] صبرينة مراجعة الأدب العلمي حول تحضير وتشخيص وتوصيف المواد النانوية العضوية المبنية على طواهر, طواهر and (جامعة قاصدي مرباح ورقلة) PhD Thesis /المركبات المعدنية
- [17] Feigenbaum D, Nsamirizi A and Sinclair-Desgagné B 2004 Les Nanotechnologies : leurs bénéfiques et leurs risques potentiels
- [18] Danilevsky A 1978 QUELQUES TYPES DE MURS DE SOUTÈNEMENT ALLEGES

- [19] Seifi S 2018 Conception d'éco-liants et/ou éco-matériaux à partir de cendres volantes papetières et laitier moulu
- [20] Hourany K 2015 Contribution à l'exploitation du bruit ambiant pour le contrôle santé intégré passif des barres et des tubes
- [21] Mannix O 2019 Etude de la complexation de nanoparticules et polysaccharides par diffusion de rayons X aux petits angles
- [22] Bensaude-Vincent B and Nurock V 2010 Éthique des nanotechnologies: (Ères) pp 355–69
- [23] Pakdaman E, Osfoury S, Azin R, Niknam K and Roohi A 2019 Improving the rheology, lubricity, and differential sticking properties of water-based drilling muds at high temperatures using hydrophilic Gilsonite nanoparticles *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **582** 123930
- [24] Sajjadian M, Sajjadian V A and Rashidi A 2020 Experimental evaluation of nanomaterials to improve drilling fluid properties of water-based muds HP/HT applications *Journal of Petroleum Science and Engineering* **190** 107006
- [25] Srivastava V, Beg M, Sharma S and Choubey A 2021 Application of manganese oxide nanoparticles synthesized via green route for improved performance of water-based drilling fluids *Applied Nanoscience* **11**

