

Ecole Nationale Polytechnique
Département génie Minier



**Ecole Nationale
Polytechnique**



**Laboratoire de
génie minier**



SLB

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État
En Génie Minier

Décontamination des déblais de forages pétroliers par l'application de techniques de biotraitement

Réalisé par :

M. Mohammed Ouanis

STAMBOULI

M. Arezki YOUSSEIDENE

Encadré par :

Dr. Amira MERCHICHI

Pr. Malek OULD HAMOU

M. Zahir BENCHEIKH

Soutenu le 14 Juin 2023, Devant le jury composé de :

Président M. E.MOUSSAOUI

Examinatrice MME. N. BOUTOUCHENT-GUERFI

Promotrice MME. A.MERCHICHI

Co-Promoteur M. M.OULD HAMOU

Co-Promoteur M. Z.BENCHEIKH

MAA - ENP

MR - CRTSE

MCB - ENP

PR - ENP

SM - SLB

Ecole Nationale Polytechnique
Département génie Minier



**Ecole Nationale
Polytechnique**



**Laboratoire de
génie minier**



SLB

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État
En Génie Minier

Décontamination des déblais de forages pétroliers par l'application de techniques de biotraitement

Réalisé par :

M. Mohammed Ouanis

STAMBOULI

M. Arezki YOUSSEIDENE

Encadré par :

Dr. Amira MERCHICHI

Pr. Malek OULD HAMOU

M. Zahir BENCHEIKH

Soutenu le 14 Juin 2023, Devant le jury composé de :

Président M. E.MOUSSAOUI

Examinatrice MME. N. BOUTOUCHENT-GUERFI

Promotrice MME. A.MERCHICHI

Co-Promoteur M. M.OULD HAMOU

Co-Promoteur M. Z.BENCHEIKH

MAA - ENP

MR - CRTSE

MCB - ENP

PR - ENP

SM - SLB

Dédicaces

“

*Àu nom de Dieu le Tout-Puissant, qui m'a donné la
volonté, la patience et le courage d'arriver à ce jour,*

*À mes très chers parents, qui m'ont soutenu et guidé tout
au long de mes études, je tiens à exprimer ma profonde
gratitude pour leurs sacrifices envers moi,*

À mes grands-parents, que Dieu vous préserve pour nous

À ma sœur bien-aimée, qui a toujours été à mes côtés,

À mon petit frère Souheyl,

À mon beau-frère Hichem,

À ma petite nièce Ritel ,

À mes tantes, oncles et cousins,

À tous mes ami.es,

Je dédie ce modeste travail.

”

- *Ouanis*

Dédicaces

“

À mes parents et toute ma famille.,

À la mémoire de ma grand-mère,

*À tous ceux qui ont osé croire en mes rêves et m'ont
encouragé à défier les limites, cette petite pierre dans
l'océan du savoir vous est dédiée.*

” No matter how difficult it gets, there is always hope ”

-M.L

”

- Arezki

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers notre promotrice, **Dr. Amira MERCHICHI**, pour ses efforts inlassables, ses conseils précieux et le partage généreux de son savoir. Les nombreuses heures passées ensemble au laboratoire ont été enrichissantes à bien des égards. Nous lui sommes infiniment reconnaissants pour tout ce qu'elle a fait.

Nous tenons également à remercier chaleureusement notre co-promoteur, **Pr. Malek OULD HAMOU**. Grâce à lui, nous avons pu bénéficier de tous les moyens nécessaires pour mener à bien notre travail. Sa présence a été d'une grande aide tout au long de ce projet.

Nous saisissons également cette occasion pour exprimer notre reconnaissance envers les membres du jury, **M. Elabas MOUSSAOUI**, qui nous a fait l'honneur de présider le jury et **Mme. Nabila GUERFI**, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous tenons également à adresser nos remerciements à tous les enseignants et à l'équipe pédagogique du département de Génie Minier, le laboratoire CETIM ainsi que les départements Environnement et QHSE.

Un remerciement particulier s'adresse au **Dr. Iskander ZOUAGHI**, directeur adjoint et chargé des relations extérieures à l'ENP, pour son écoute envers les étudiants, ainsi que pour les efforts qu'il déploie pour favoriser leur réussite.

Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers **M. Zahir BENCHEIKH**, notre manager à SLB, pour sa disponibilité, ses conseils précieux et son accompagnement tout au long de ce travail. Ses connaissances et son expérience dans le domaine ont été une source d'inspiration constante.

Nous n'oublions pas de remercier chaleureusement toute l'équipe de **SLB** et **Mi-SWACO**.

ملخص

تُنتج عمليات الحفر كميات كبيرة من الفتات الملوثة بالهيدروكربونات ، بشكل أساسي من الزيوت البترولية التي تستخدم في عمليات الحفر و كذلك من التكوينات الجيولوجية التي تم اجتيازها. تحتوي هذه القطع على تركيزات من (TPH) (إجمالي الهيدروكربونات البترولية) تتراوح من 34 غ/كغ إلى 104 غ/كغ ، خاصة مع وجود الديزل ، وكذلك المعادن الثقيلة مثل الحديد والنحاس ، إلخ. نظراً للمخاطر المحتملة على المياه الجوفية، من الضروري تطهير هذه القطع قبل تصريفها في البيئة.

يهدف هذا المشروع إلى تنفيذ تقنيات معالجة حيوية متعددة لإزالة التلوث من فتات الحفر في منطقة حاسي مسعود ، بهدف جعلها تتوافق مع المعايير القانونية والتنظيمية. (TPH أقل من 20 غ/كغ).

كلمات مفتاحية :

هيدروكربونات، تنقية، العلاج الحيوي، ديزل، فتات الحفر، حاسي مسعود, TPH.

Abstract

Drilling operations generate large quantities of cuttings contaminated with hydrocarbons, mainly from the oil-based muds used in the drilling process, as well as from the geological formations crossed. These cuttings have TPH (Total Petroleum Hydrocarbons) concentrations ranging from 34 g/kg to 104 g/kg, notably with the presence of diesel oil, as well as heavy metals such as iron, copper, etc. Given the potential risks to groundwater, it is imperative to decontaminate this spoil before discharging it into the environment.

The aim of this project is to implement various bioremediation techniques to decontaminate rock cuttings in the Hassi Messaoud area, bringing them into line with current regulatory standards (TPH less than 20g/Kg).

Keywords : Hydrocarbons, Decontamination, Bioremediation, Diesel, Drill cuttings, Hassi Messaoud, TPH.

Résumé

Les opérations de forage génèrent d'importantes quantités de déblais contaminés par des hydrocarbures, principalement issus des boues pétrolières à base d'huile utilisées dans le processus de forage, ainsi que des formations géologiques traversées. Ces déblais présentent des concentrations de TPH (Total des Hydrocarbures Pétroliers) allant de 34 g/kg à 104 g/kg, notamment avec la présence de gasoil, ainsi que des métaux lourds tels que le fer, le cuivre, etc. Étant donné les risques potentiels pour les nappes phréatiques, il est impératif de décontaminer ces déblais avant de les rejeter dans l'environnement.

Le présent projet vise à mettre en œuvre différentes techniques de bioremédiation pour décontaminer les déblais rocheux dans la zone de Hassi Messaoud, en les rendant conformes aux normes réglementaires en vigueur (TPH inférieur à 20g/Kg).

Mots clés : Hydrocarbures, Décontamination, Bioremédiation, Gasoil, Déblais de forage, Hassi Messaoud, TPH.

Table des matières

Liste des tableaux	
Table des figures	
Liste des abréviations	
Introduction Générale	14
1 Forage, Fluide de Forage et Généralités sur la Zone de Hassi Messaoud	16
1.1 Introduction	17
1.2 Le forage	17
1.2.1 Introduction	17
1.2.2 Les étapes principales du forage pétrolier	18
1.2.3 Schéma du puits de forage dans la région de HMD	20
1.3 Le fluide de forage	20
1.3.1 Introduction	20
1.3.2 Rôle des fluides de forage	21
1.3.3 Les différentes catégories de fluides utilisés pour le forage	22
1.4 Généralités sur la zone de Hassi Messaoud	26
1.4.1 Situation géographique du champ de Hassi Messaoud	26
1.4.2 Cadre structural de Hassi Messaoud	27
1.4.3 Climatologie de hassi messaoud	28
1.4.4 Stratigraphie du champ Hassi Messaoud	30
1.4.5 Système de séparation entre le fluide de forage et les déblais au niveau de SLB	32
1.4.6 la station Thermal Phase Separation (TPS)	34
1.5 Conclusion	35
2 Polluants présents dans les déblais de forage et techniques de décontamination	36
2.1 Introduction	37
2.2 Les hydrocarbures	37
2.3 Le gasoil	38
2.4 Les métaux lourds	40
2.5 Introduction sur les méthodes de décontamination	40
2.6 Les micro-ondes	41
2.7 solidification et stabilisation	42
2.8 la bioremédiation	42
2.8.1 Les micro-organismes	42
2.8.2 Cinétique de croissance bactériennes	43
2.8.3 Différentes techniques de bioremédiation	44
2.8.4 Types de bioremédiation	45

2.9	Conclusion	46
3	Matériels et méthodes utilisées	47
3.1	Introduction	48
3.2	Prélèvement des échantillons	48
3.3	Caractérisation et mesures effectuées sur les échantillons	48
3.3.1	Teneur en eau	48
3.3.2	Dosage des Hydrocarbures	49
3.3.3	Détermination des paramètres pH et potentiel redox	53
3.3.4	Dénombrement bactérien par densité optique	54
3.3.5	Préparation des lixiviats	55
3.3.6	Analyse de la composition élémentaire	59
3.4	Codification des essais	60
3.5	Choix des méthodes de traitement	61
3.5.1	Première méthode	63
3.5.2	Deuxième méthode	69
3.5.3	Troisième méthode	76
3.6	Conclusion	82
4	Résultats et Interprétation	83
4.1	Introduction	84
4.2	Résultats de la caractérisation physique et chimique des échantillons avant traitement	84
4.2.1	Résultats des analyses complémentaire par XRF	84
4.3	Présentation et interprétation des résultats relatifs aux développement des microorganismes	85
4.4	Présentation et interprétation des résultats relatifs aux Hydrocarbures	92
4.5	Présentation et interprétation des résultats relatifs aux analyses en éléments complémentaire	96
4.6	Présentation et interprétation des résultats relatifs aux analyses des métaux (SAA)	98
	Conclusion générale	100
4.7	Conclusion générale	101
	Annexes	108
A	Tableaux des résultats	109

Liste des tableaux

1.1	Constituants de la boue de forage à base d'eau	23
1.2	Constituants de la boue de forage à base d'huile	23
1.3	Données climatologiques enregistrées au niveau de la station météologique d'Ouargla (AIT OUMERACI 2020)	29
2.1	Normes hollandaises de qualité des sols (LE BISSONNAIS et al. 2005).	38
2.2	Les caractéristiques physico-chimiques du Gasoil (KHODJA 2008).	39
2.3	Seuils de référence pour les métaux lourds (MERCHICHI et al. 2022)	40
3.1	Prélèvements réalisés sur différents côtés pour les deux points d'échan- tillonnage	48
3.2	Codification des essais	60
3.3	Préparation pour 1L de milieu LB	75
3.4	Composition chimique du milieu 9K (SILVERMAN et al. 1959).	77
4.1	Caractérisation de l'échantillon 1 et 2	84
4.2	Résultats de la XRF	85
A.1	Dénombrement bactériens du bac 1 à 7 et de 11 à 18	109
A.2	Dénombrement bactériens du 9 et 19	110
A.3	Suivi de la température	110
A.4	Résultats du pH pour les bacs de 1 à 8 et de 11 à 18	111
A.5	Résultats du pH pour les essais 9 et 19	111
A.6	Résultats du potentiel redox dans les bacs	112
A.7	Résultats du potentiel redox et de l'oxygène dissous dans les essais 9 et 19 .	112
A.8	Résultats du Phosphore, calcium, sodium et potassium	113
A.9	Résultats du distillateur pour les bacs de l'échantillon 1	113
A.10	Résultats du distillateur pour les bacs de l'échantillon 2	113
A.11	Résultats du TPH	114
A.12	Résultats de l'analyse des métaux	115

Table des figures

1.1	Le forage pétrolier.	18
1.2	Le trépan	19
1.3	Schéma du puits de forage dans la région de HMD.	20
1.4	Cycle des boues sur le site de forage (MiSwaco 2001).	21
1.5	disposition d'un émulsifiant autour d'une goutte d'eau (swaco2001drilling).	24
1.6	Schéma de l'émulsion stable (swaco2001drilling).	25
1.7	Localisation du champ de Hassi Messaoud par rapport aux autres champs pétrolifères (TEBIB et al. 2017).	27
1.8	Coupe géologique Est-Ouest du champ de Hassi Messaoud (TRABELSI et al. 2019).	28
1.9	Colonne stratigraphique du champ hassi Messaoud (TEBIB et al. 2017).	31
1.10	Shale shaker (swaco2001drilling).	33
1.11	Schéma d'un hydrocyclone (swaco2001drilling).	33
1.12	Verti-G.	34
1.13	Photo d'un bourbier "ENF 29 well" (AIT OUMERACI 2020)	35
1.14	Processus de désorption thermique (TPS) (MiSwaco 2001).	35
2.1	Prototype d'unité de chauffage.	41
2.2	Unité expérimentale(PEREIRA et al. 2013).	42
2.3	Unité de solidification et stabilisation(MiSwaco 2001).	42
2.4	La Cinétique de la croissance bactériennes.	44
3.1	Échantillons prélevés.	48
3.2	Échantillons dans le four pour déterminer la teneur en eau.	49
3.3	Distillateur.	50
3.4	Ultrason.	52
3.5	Solutions résultantes.	52
3.6	Rota-vapeur.	53
3.7	Mesure du pH.	53
3.8	Mesure du Potentiel redox.	54
3.9	Spectrophotomètre UV-visible.	55
3.10	Filtration des solutions	55
3.11	Le lixiviat	56
3.12	Réglage du blanc dans le photomètre à flamme.	56
3.13	Analyse du phosphore par spectométrie.	58
3.14	Spectrophotométrie d'Absorption Atomique.	58
3.15	Étalons utilisés pour la SAA.	59
3.16	Principe de la fluorescence des Rayons X (XRF) (THIRION-MERLE 2014).	60
3.17	Schéma des trois méthodes explorées dans les essais.	62
3.18	Terreaux.	64
3.19	Foin.	64

3.20	Feuilles mortes.	64
3.21	Sciure de bois.	65
3.22	Fumier de vache et moutons.	65
3.23	Argile activée.	65
3.24	Argile.	65
3.25	Cendre de bois.	66
3.26	Préparation de l'argile activée.	66
3.27	Les bacs des mélanges.	67
3.28	Résultat d'une analyse de hotspot (AIT OUMERACI 2020).	68
3.29	Appareil pour la mesure d'humidité.	69
3.30	Préparation des dilutions.	70
3.31	Préparation du milieu nutritif.	71
3.32	Autoclavage.	71
3.33	Remplissage des boites de petri.	72
3.34	Ensemencement.	72
3.35	Incubation.	73
3.36	Les souches bactériennes après incubation de 48h.	73
3.37	Ensemencement de la souche choisie.	74
3.38	Incubation de la souche choisie.	74
3.39	Préparation du milieu LB.	75
3.40	Milieu LB.	75
3.41	Bac de l'échantillon 1.	76
3.42	Bac de l'échantillon 1.	76
3.43	Mesure de pH du KOT.	77
3.44	Filtration du Fer.	78
3.45	Milieu 9k.	78
3.46	Incubation des bactéries acidophiles.	79
3.47	Centrifugation.	80
3.48	Le passage à la centrifugeuse.	81
3.49	Lancement de l'essai.	81
4.1	Résultats du dénombrement bactérien.	86
4.2	Suivi de la température sur les bacs.	87
4.3	Résultats du suivie du pH dans les bacs.	89
4.4	Résultats du suivie du potentiel redox dans les bacs.	90
4.5	Résultats lors de l'isolement des bactéries.	91
4.6	Résultats du suivie dans l'essais 9 et 19 (Bactéries acidophiles).	92
4.7	Résultats de la distillation.	93
4.8	Résultats du TPH.	95
4.9	Résultats de l'analyse du Phosphore.	96
4.10	Résultats des analyses réalisées par photomètre à flamme.	97
4.11	Résultats des analyses des métaux.	99

Liste des sigles et acronymes

ALG	<i>Alger</i>
BTEX	<i>Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes</i>
CPG	<i>Chromatographie en phase gazeuse</i>
DCM	<i>Dichlorométhane</i>
DRX	<i>Diffraction des Rayons X</i>
ENP	<i>Ecole Nationale Polytechnique</i>
GN	<i>Gélose nutritive</i>
H	<i>Humidité</i>
HAP	<i>Hydrocarbure aromatique polycyclique</i>
HMD	<i>Hassi-Messaoud</i>
KOT	<i>Kef Oum Tboul</i>
OBM	<i>Boue à base d'huile</i>
SLB	<i>Schlumberger</i>
SAA	<i>Spectrophotométrie d'Absorption Atomique</i>
T	<i>Température</i>
TPH	<i>Hydrocarbures Pétroliers Totaux</i>
TPS	<i>Thermal Phase Separation</i>
pH	<i>Potentiel hydrogène</i>
WBM	<i>Huile à base d'eau</i>
XRF	<i>Fluorescence des rayons X</i>

Introduction Générale

Le présent projet de fin d'études propose une solution sur un enjeu environnemental majeur dans la région de Hassi Messaoud en Algérie : la décontamination des déblais de forages pétroliers par l'application de techniques de biotraitement. Cette recherche est menée au Laboratoire du Génie Minier de l'École Nationale Polytechnique en collaboration avec l'entreprise SLB ex Schlumberger, un acteur clé de l'industrie pétrolière et gazière qui s'engage à développer des solutions durables pour atténuer l'impact environnemental de ses opérations.

Hassi Messaoud, située dans le désert algérien, est connue pour être une zone riche en ressources pétrolières. Toutefois, l'exploitation de ces gisements d'hydrocarbures génère d'importants volumes de déblais de forages contaminés par des hydrocarbures, essentiellement du gasoil provenant de l'utilisation des fluides de forage à base d'huile (OMB), mais pouvant aussi contenir un seuil élevé de métaux lourds.(DAMOU 2007)

Ces déchets, stockés dans des bourbiers, représentent une source dangereuse de pollution susceptible d'affecter la santé humaine, la faune et la flore (KHODJA 2008 ; FOKOU MBOGNE 2017 ; ARPORNONG et al. 2020). Par conséquent, la gestion adéquate de ces déblais est essentielle pour prévenir les conséquences néfastes sur les écosystèmes locaux et garantir la durabilité de l'industrie pétrolière dans la région.

Le biotraitement, une approche respectueuse de l'environnement, s'est avérée être une solution prometteuse pour la décontamination des déblais de forages. Cette méthode repose sur l'utilisation de microorganismes capables de dégrader les contaminants présents dans les déblais ou de favoriser leur adsorption, rendant ainsi ces substances moins nocives (AIT OUMERACI 2020). En collaborant avec SLB, cette recherche vise à évaluer l'efficacité et l'applicabilité des techniques de biotraitement dans le contexte spécifique de Hassi Messaoud.

L'Entreprise SLB joue un rôle prépondérant dans cette étude en partageant son expertise, ses ressources et en fournissant un accès privilégié aux sites de forage de la région. Cette collaboration entre le monde universitaire et l'industrie pétrolière illustre l'importance de l'engagement conjoint dans la recherche de solutions durables pour préserver l'Environnement.

L'objectif principal de notre travail est de développer des protocoles de biotraitement adaptés aux caractéristiques spécifiques des déblais de forages à Hassi Messaoud, en prenant en compte les variations de composition chimique et les conditions environnementales particulières de la région.

À travers une approche expérimentale rigoureuse et des analyses détaillées, l'efficacité des techniques de biotraitement dans la dégradation et la stabilisation de ces contaminants est évaluée.

Pour ce faire, le document présenté est réparti comme suit :

- “**Le premier chapitre**” de ce mémoire offre une vue d’ensemble de la région de Hassi Messaoud, en couvrant sa situation géographique, son cadre structural, sa climatologie, les opérations pétrolières et gazières, ainsi que le processus de forage, les fluides de forage utilisés et les techniques de gestion des déblais de forage, y compris le processus de séparation utilisé par Mi-swaco. Ce chapitre permettra de mieux appréhender le contexte global et les aspects techniques essentiels liés à l’exploitation des ressources pétrolières et gazières dans cette région.
- “**Le deuxième chapitre**” expose les différents polluants susceptibles de se trouver dans les déblais de forage, ainsi que les diverses méthodes de décontamination qui peuvent être utilisées. Une revue exhaustive de la littérature sera effectuée pour présenter les approches existantes en matière de décontamination.
- “**Le troisième chapitre**” traitera de l’ensemble de la méthodologie suivie tout au long de cette étude. Il mettra en évidence les procédures expérimentales et les approches analytiques utilisées pour la caractérisation.
- Enfin, “**le quatrième chapitre**” sera dédié à la présentation et à l’interprétation des résultats obtenus. Les données recueillies au cours de cette recherche seront analysées et discutées afin de tirer des conclusions significatives et de formuler des recommandations pour une gestion plus efficace et durable des déblais de forage dans la région de Hassi Messaoud.

Dans l’ensemble, ce mémoire présente une structure claire et méthodique pour aborder l’étude de la décontamination des déblais de forages pétroliers à Hassi Messaoud. En fournissant une base solide de connaissances bibliographiques, en explorant les processus de forage, en examinant les polluants présents et en évaluant la méthode de bioremédiation, cette recherche contribuera à l’amélioration des pratiques environnementales de l’industrie pétrolière dans la région.

Chapitre 1

Forage, Fluide de Forage et Généralités sur la Zone de Hassi Messaoud

1.1 Introduction

Le chapitre 1 marque le commencement de ce projet de fin d'études offrant ainsi une vue d'ensemble de l'industrie pétrolière et gazière : le forage et le fluide de forage, avec un accent particulier sur la zone de Hassi Messaoud.

Cette zone revêt une grande importance en Algérie en raison de ses vastes réserves d'hydrocarbures. Dans ce chapitre, nous explorerons les généralités sur la zone de Hassi Messaoud, en mettant en évidence sa situation géographique, son cadre structural et sa climatologie, afin de fournir une base solide pour les études subséquentes.

Nous examinerons également le système utilisé par la société Schlumberger (SLB) pour la séparation entre le fluide de forage et les déblais de forage. Nous analyserons les techniques et les équipements mis en place par SLB pour réaliser cette séparation.

1.2 Le forage

1.2.1 Introduction

Pour étudier l'adaptabilité de l'utilisation des processus de traitement, il est important de comprendre comment se déroule le forage, ainsi que les raisons pour lesquelles il est nécessaire de traiter les déblais de forage (DAMOU 2007).

Pour trouver du pétrole, les études géologiques et géophysiques de la région permettent seulement de repérer les couches sédimentaires et les pièges qui ont potentiellement la capacité de contenir du pétrole. Pour confirmer la présence du pétrole, il est nécessaire de forer un puits à l'emplacement identifié, en se basant sur les résultats des études géologiques et géophysiques. (DAMOU 2007).

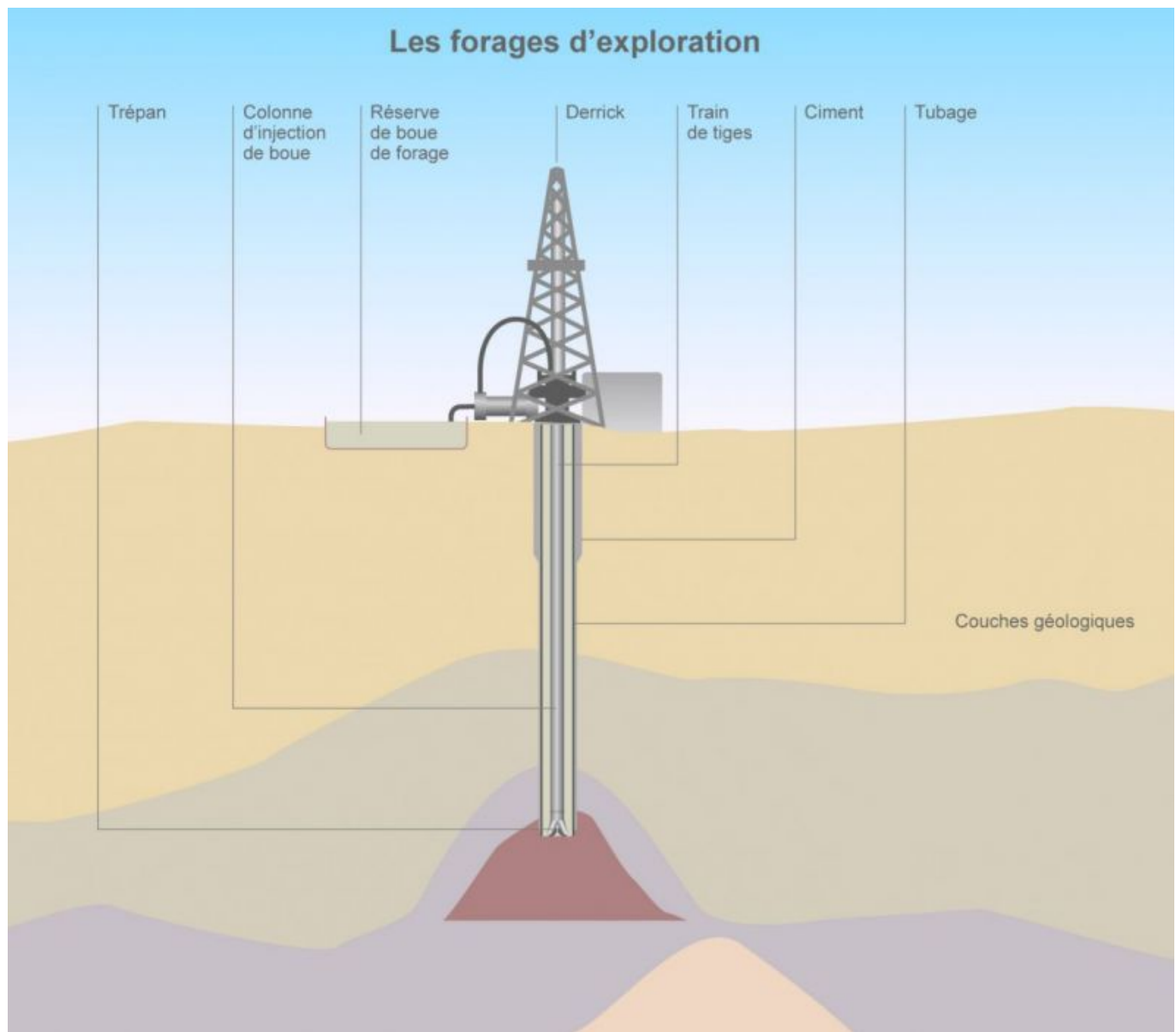


FIG. 1.1 : Le forage pétrolier.

1.2.2 Les étapes principales du forage pétrolier

Forage initial

Le forage initial (drilling) est la première étape du processus de forage pétrolier, où une foreuse rotative est utilisée pour pénétrer le sol. Une longue tige de forage, équipée d'un trépan (Figure1.2) à la pointe, est descendue dans le puits et tourne pour percer le sol. Pendant le forage, une boue de forage spéciale est pompée à travers la tige de forage pour refroidir le trépan, transporter les débris de forage à la surface et maintenir la pression du puits.(Figure1.1).

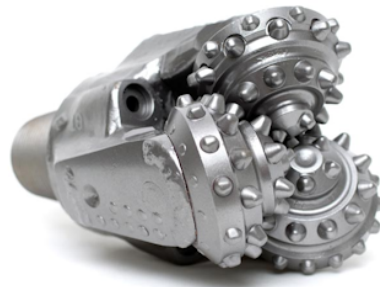


FIG. 1.2 : Le trépan

Une fois que le puits atteint une certaine profondeur ou une certaine formation géologique, il est temps de procéder au tubage et à la cimentation (casing and cementing).

Tubage et cimentation

Pendant le processus de forage, le trou de sondage peut traverser des formations rocheuses différentes, avec des compositions, des propriétés physiques et chimiques, ainsi que des pressions variées. Certaines roches peuvent être stables, tandis que d'autres peuvent présenter des risques d'éboulement ou de gonflement. De plus, le puits peut rencontrer des couches à basse pression qui absorbent le fluide de forage, ainsi que des couches à pression élevée, certaines productives et d'autres non.

Afin de garantir un forage sans imprévus, il est nécessaire de consolider le puits en utilisant des tubes d'acier, regroupés sous le terme générique de tubage ou casing. Le tubage consiste à descendre les tubes casing dans le puits après avoir atteint la profondeur souhaitée en ajoutant un tube à la fois, de diamètre important. Les connexions lors du tubage doivent être suffisamment solides pour résister à la torsion, à la flexion et à la traction, tout en étant parfaitement étanches.

Les principaux objectifs du tubage sont les suivants : (BELHAOUA et al. 2003)

- Former un conduit durable et étanche pour le transfert du pétrole depuis la couche profonde jusqu'à la surface.
- Assurer l'isolation sécurisée entre les horizons de différentes pressions, ainsi qu'entre les horizons productifs et non productifs.
- Renforcer les parois du trou, constituées de roches instables.

La cimentation consiste à injecter un mélange de ciment dans l'espace annulaire, soit à travers les tiges de forage en utilisant un dispositif appelé stinger, soit en faisant remonter le ciment à travers le sabot à l'aide de deux bouchons, par simple circulation. L'objectif de la cimentation est de maintenir le tubage en suspension et d'assurer l'étanchéité entre le tubage et les parois du trou, d'isoler les formations absorbantes traversées par le puits, et de protéger le tubage contre la corrosion causée par les fluides agressifs du gisement, entre autres. (Figure1.1).

La réussite de cette opération nécessite une attention particulière aux moindres détails, ce qui implique une collaboration étroite entre l'opérateur et la société de services à toutes les étapes. Elle dépend également d'un ensemble de facteurs tels que la géométrie du trou, les propriétés de la boue de forage, la centralisation du tubage, la composition du mélange

de ciment, le déplacement efficace de la boue, ainsi que la préparation et l'exécution soignée des opérations de cimentation.

1.2.3 Schéma du puits de forage dans la région de HMD



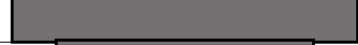


Diamètre du trou (in)	Programme de tubage	Type de boue	Ratio (oil/water)
26"		WBM	/
16"		OBM	70/30 ou 90/10
12" 1/4		OBM	90/10 ou 95/05
8" 1/2		OBM	90/10 ou 95/05
6"		OBM	95/05

FIG. 1.3 : Schéma du puits de forage dans la région de HMD.

1.3 Le fluide de forage

1.3.1 Introduction

Le fluide de forage, également appelé "mud", est un liquide utilisé lors d'une opération de forage. Il peut être composé de différents agents liquides et/ou gazeux, et peut contenir en suspension d'autres additifs minéraux et organiques.

Lors du premier Congrès Mondial du Pétrole en 1933, le fluide de forage a été présenté et a fait l'objet de cinq communications (CAENN et al. 2011). En 1979 l'American Petroleum Institute (API), définit le fluide de forage comme un liquide circulant en continu tout au long de l'opération de forage, à la fois dans le puits et en surface. Il est donc préparé dans des bacs à boues et injecté dans la tige de l'outil de forage jusqu'au trépan et remonte ensuite en surface à travers l'annulaire (NGUYEN 1993).

À la sortie du puits, le fluide de forage subit plusieurs traitements, notamment des tamisages et des dilutions afin d'éliminer les débris transportés et de le rendre réutilisable (LANDRIOT 1968) (Figure 1.4)

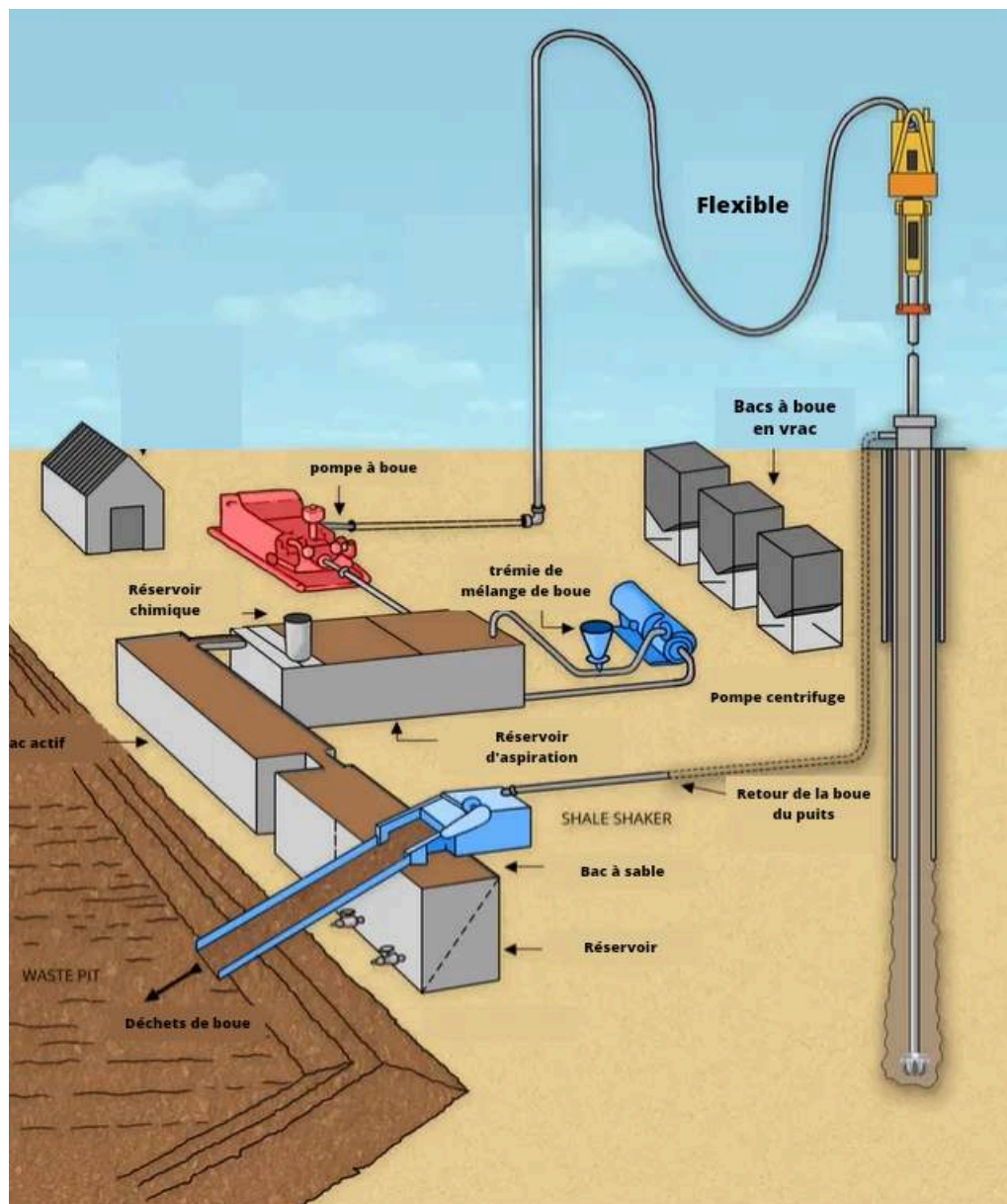


FIG. 1.4 : Cycle des boues sur le site de forage (MISWACO 2001).

1.3.2 Rôle des fluides de forage

Les fonctions des fluides de forage désignent les tâches que le fluide peut accomplir, même si certaines ne sont pas nécessaires pour tous les puits. Toutefois, éliminer les débris de forage du puits et contrôler les pressions de formation sont des fonctions vitales pour tous les puits (MISWACO 2001).

L'ordre d'importance peut varier selon les conditions et les opérations en cours. En général, les fonctions les plus courantes des fluides de forage sont :

- Éliminer les déblais du puits : Le fluide de forage est utilisé pour transporter les déblais de forage hors du puits afin d'éviter qu'ils ne s'accumulent et ne gênent le forage.
- Contrôler les pressions de formation : Le fluide de forage peut être utilisé pour réguler la pression dans le puits afin de prévenir l'infiltration de fluides ou de gaz provenant de la formation géologique.

- Suspendre et libérer les déblais : Le fluide de forage est capable de maintenir en suspension les déblais de forage, permettant ainsi de les éliminer plus facilement.
- Sceller les formations perméables : Le fluide de forage peut être utilisé pour créer un bouchon temporaire dans une formation géologique perméable afin d'empêcher la fuite de fluides.
- Maintenir la stabilité du puits : Le fluide de forage est utilisé pour stabiliser les parois du puits en empêchant les éboulements et les effondrements.
- Minimiser les dommages au réservoir : Le fluide de forage peut être utilisé pour minimiser les dommages causés à la formation géologique pendant le forage.
- Refroidir, lubrifier et soutenir le trépan et l'ensemble de forage : Le fluide de forage peut être utilisé pour refroidir et lubrifier le trépan et l'ensemble de forage afin de prolonger leur durée de vie en l'occurrence dans les boues à base d'huile.
- Transmettre l'énergie hydraulique aux outils et au trépan.
- Assurer une évaluation adéquate de la formation : Le fluide de forage peut être utilisé pour obtenir des échantillons de la formation géologique et pour aider à la caractérisation géologique.
- Contrôler la corrosion : Le fluide de forage peut être utilisé pour protéger les tuyaux et l'équipement de forage contre la corrosion.
- Faciliter le cimentage et l'achèvement : Le fluide de forage peut être utilisé pour faciliter la cimentation et l'avancement de la foration des puits.
- Minimiser l'impact sur l'Environnement : Le fluide de forage peut être utilisé de manière à minimiser son impact sur l'Environnement, notamment en utilisant des fluides de forage biodégradables et non toxiques.

1.3.3 Les différentes catégories de fluides utilisés pour le forage

La composition de la boue utilisée pour le forage doit être choisie en fonction de différents facteurs tels que le type de forage, la nature du terrain et la profondeur. Ce choix peut influencer directement la vitesse, la sécurité et le coût du forage. De plus, il est nécessaire de prendre en compte les contraintes écologiques en optant pour des substances non toxiques pour l'Environnement.

Les progrès technologiques dans le domaine du forage pétrolier ne se limitent plus à l'amélioration des dispositifs de forage tels que les tiges et les outils de forage, ainsi qu'à la formulation de boues adaptées aux conditions de forage. Ils visent également à réduire les polluants dans les déblais résultant des opérations de forage, afin de respecter les contraintes Environnementales et économiques.

Il existe trois familles de fluides de forage (KHODJA 2008).

Les fluides de forage à base d'eau (WBM)

Ce type de fluide de forage est largement utilisé, en particulier pour les premières sections d'un puits et repose sur une base d'eau à laquelle sont ajoutés des solides et des produits chimiques (Tableau1.1) pour répondre à toutes les exigences d'une boue de fluide de forage (REIS 1996).

Au cours du forage, le fluide peut subir des modifications de sa composition et de ses propriétés, en raison de l'incorporation des matériaux de formation.

Ordre	Produits utilisés	Temps de mixage (min)	Vitesse de mixage
1	Eau	/	/
2	Traitement de dureté(Soda Ash)	2	Faible
3	Régulateur de pH (NaOH)	2	Faible
4	Sel	2	Faible
5	Inhibiteur de schiste	2	Faible
6	Encapsulateur	10	Faible
7	Les réducteurs de filtras	10	Faible
8	Viscosifiant	10	Faible
9	Alourdissant	25	Moyenne
10	Lubrifiant/Stabilisateur	5	Faible

TAB. 1.1 : Constituants de la boue de forage à base d'eau

Les fluides de forage à base d'huile (OBM)

Les fluides de forage à base d'huile principalement utilisés dans des sections profondes d'un puits. Ce sont des mélanges d'huile et d'eau, avec un taux d'eau qui varie généralement entre 5 % et 30 %. Ce taux peut être plus élevé en fonction de la lithologie du site et des additifs ajoutés pour augmenter l'efficacité du fluide (Tableau1.2). Parmi ces additifs, on peut citer :

ordre	les produits utilisés	temps de mixage (Min)	la vitesse de mixage
1	Gasoil	/	/
2	Viscosifiant	8	Faible
3	Source D'alkalinité	5	Faible
4	Emulsifiant	2	Faible
5	Agent Mouillant	2	Faible
6	Brine (Eau+NaCl)	15	Faible
7	Les réducteurs de filtras	10	Faible
8	Alourdissant	25	Moyenne

TAB. 1.2 : Constituants de la boue de forage à base d'huile

- Les émulsifiants

Les émulsifiants sont des agents tensioactifs qui réduisent la tension de surface entre les gouttelettes d'eau et d'huile. Ils stabilisent le mélange en étant partiellement so-

lubles dans l'eau et partiellement solubles dans l'huile. Ils sont généralement constitués d'alcools à longue chaîne, d'acides gras ou de polymères et peuvent être de nature anionique, cationique ou non ionique. Une extrémité de la molécule d'émulsifiant est hydrophile (attirée par l'eau), tandis que le reste de la molécule est hydrophobe (attiré par l'huile ou le fluide synthétique). Les particules d'émulsifiant forment un revêtement autour des gouttelettes d'eau pour les empêcher de se coalescer, comme illustré dans la figure (1.5).

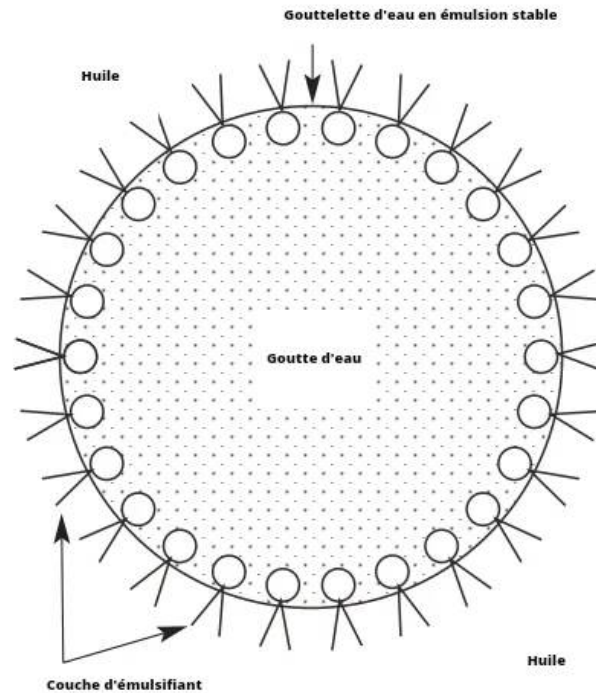


FIG. 1.5 : disposition d'un émulsifiant autour d'une goutte d'eau (swaco2001drilling).

- Les agents mouillants

ce sont des agents qui réduisent la tension interfaciale et l'angle de contact entre un liquide et un solide. Ils permettent au liquide de se répandre sur la surface du solide. Dans les fluides non aqueux, les agents mouillants font en sorte que les solides soient mouillés par l'huile ou le liquide synthétique. Si les solides ne sont pas mouillés, ils vont s'agréger et se déposer (Figure1.6).

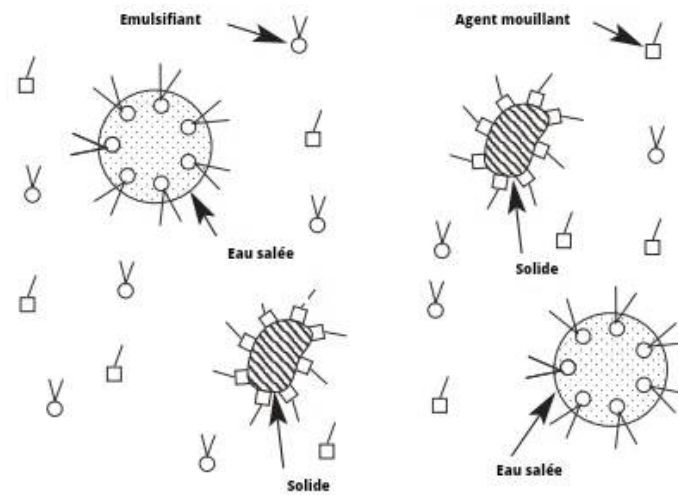


FIG. 1.6 : Schéma de l'émulsion stable (**swaco2001drilling**).

- Les viscosifiants

Les viscosifiants et agents gélifiants sont nécessaires pour augmenter la viscosité des fluides de forage afin de réduire les frottements et favoriser le refroidissement de l'outil de forage (MiSWACO 2001).

- Les alourdissants

Les assourdisants sont utilisés afin de régulariser la densité souhaitée dans le puits. Le matériau le plus couramment utilisé dans les boues à base d'huile et synthétiques est la barytine, mais le carbonate de calcium et l'hématite peuvent également être utilisés et cela dépendra du milieu ainsi que de la densité souhaitée.

- Les réducteurs de filtras

Les réducteurs de filtration sont utilisés pour favoriser la formation d'une croûte filtrante (cake) et ainsi réduire la perte de boue dans la formation.

- Les sources d'alcalinité

Les sources d'alcalinité sont utilisées pour augmenter le potentiel d'hydrogène (pH) afin de favoriser les mécanismes d'émulsification. La chaux est couramment utilisée comme source d'alcalinité dans les fluides de forage.

Les fluides de forage à base de gaz

Les fluides en question sont des mélanges gaz-liquide où la phase continue est principalement composée de gaz, avec des proportions d'eau variables. Les gaz utilisés dans les fluides de forage peuvent être de l'air ou du gaz naturel et peuvent exister sous forme de mousse ou de brouillard (KHODJA 2008).

1.4 Généralités sur la zone de Hassi Messaoud

1.4.1 Situation géographique du champ de Hassi Messaoud

Le champ de Hassi Messaoud est localisé à environ 700 Km au Sud-Est d'Alger, à une distance de 350 Km de la frontière tunisienne et à 80 Km à l'Est de la ville de Ouargla. Il s'étend sur une superficie de 2000 km carrés et se situe à une altitude de 142m. Le climat de cette région est désertique, avec des températures moyennes variant entre 0°C et 47°C. Durant les saisons d'automne et de printemps, la région subit souvent des vents de sable fréquents, atteignant une vitesse maximale de 100km², soufflant principalement en direction du NNE.

Le champ de Hassi Messaoud est le plus important gisement pétrolier de la province triasique algérienne, ainsi que le plus grand gisement de pétrole d'Algérie, avec une superficie d'environ 2200km² et des réserves considérables. Il est bordé par plusieurs limites, notamment à l'ouest par la ville de Ouargla, au sud et est par la wilaya de Touggourt et au nord par la ville de Hassi Messaoud. Figure1.7

- NW par le gisement de Ouargla, Guellaba,
- Benkahla et Haoud Berkaoui.
- SW par le gisement d'el Gassi, Zotti et El Agreb.
- SE par le gisement de Rhoude-El-Baguel et Mesdar.
- Est par le gisement de Ghadamés.

Sa localisation en coordonnées Lambert Sud Algérie est :

790000; 840000*Est*

110000; 150000*Nord*

Les coordonnées géographiques correspondantes sont :

Latitude Nord 32° 15'

Latitude Sud 31° 30'

Longitude Ouest 5° 40'

Longitude Est 6° 35'

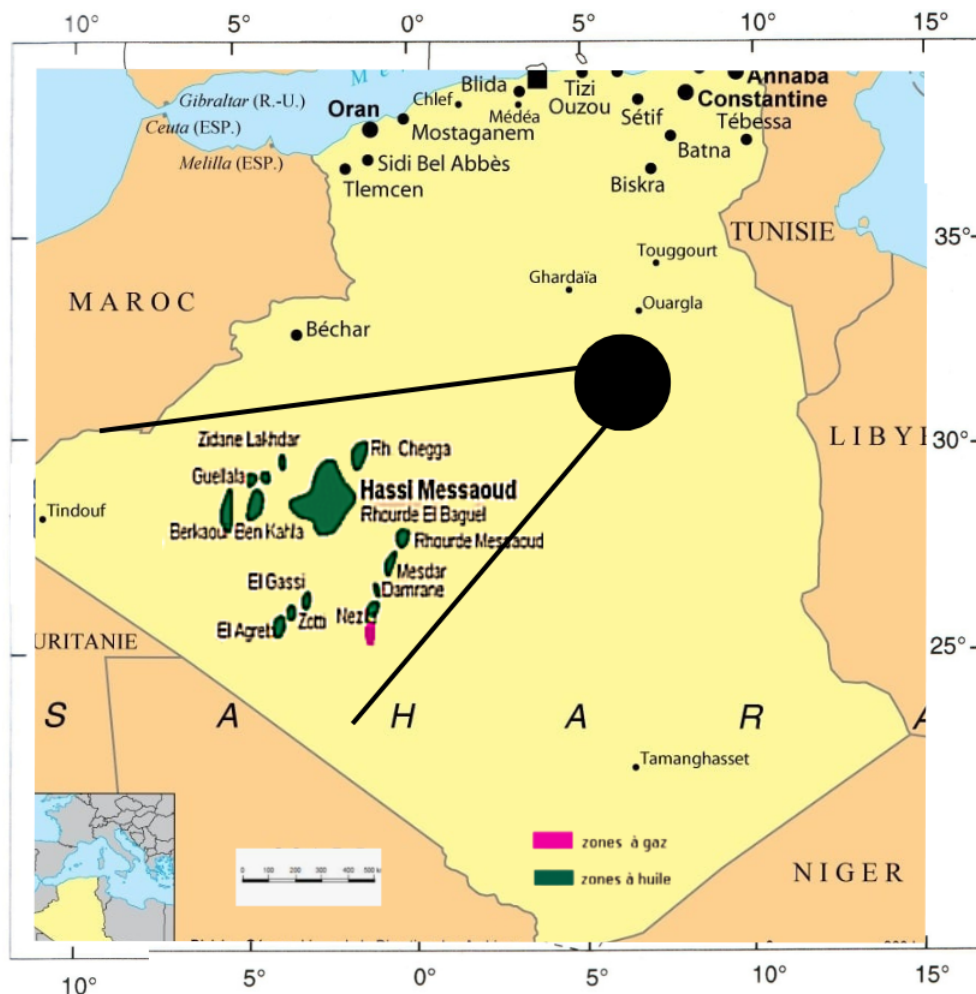


FIG. 1.7 : Localisation du champ de Hassi Messaoud par rapport aux autres champs pétrolifères (TEBIB et al. 2017).

1.4.2 Cadre structural de Hassi Messaoud

Le champ pétrolifère de Hassi Messaoud est constitué d'un important anticlinal, qui a subi une forte érosion et qui est traversé par des failles et des accidents géologiques orientés du nord-nord-ouest au sud-sud-est, créant une structure géologique en horst et grabens. Ces failles peuvent être détectées soit par le décalage structural des formations rocheuses, soit lors de la répétition des séries sédimentaires.

La couche de roches Paléozoïques, qui comprend uniquement des formations géologiques datant du Cambro-ordovicien, est recouverte en discordance par une épaisse couverture de roches datant du Mésozoïque et du Cénozoïque. À la base de cette couverture rocheuse, on trouve une couche sédimentaire très épaisse de sel datant du Trias, qui assure l'étanchéité et le piégeage des hydrocarbures au sein de la formation géologique.

L'absence des séries géologiques supérieures du Paléozoïque dans la région du champ de Hassi Messaoud est probablement due à une période prolongée d'émersion, plutôt qu'à une érosion importante.

Le champ de pétrole de Hassi Messaoud est situé au centre de la province triasique en Algérie et est le plus grand gisement de pétrole du pays en termes de superficie et de réserves. Il s'étend sur une superficie d'environ 2200 km².

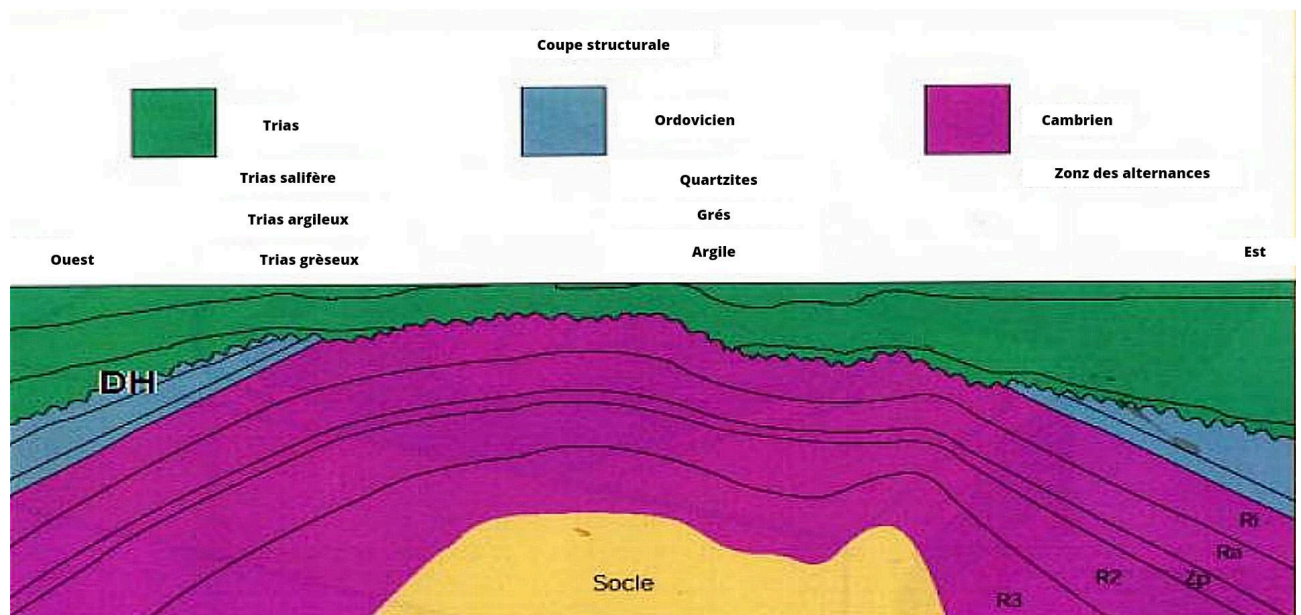


FIG. 1.8 : Coupe géologique Est-Ouest du champ de Hassi Messaoud (TRABELSI et al. 2019).

1.4.3 Climatologie de hassi messaoud

Le tableau1.3 expose les doonnées climatologiques réelles de la région de HMD de 2015 à 2018.

Année	Mois	TN en C°	TX en C°	UN en %	UX en %
2015	janvier	4	18,3	26	78
	février	6,9	18,8	26	63
	mars	10,1	24,6	17	59
	avril	16,3	32,1	12	41
	mai	20,7	37	11	33
	juin	24	39,8	10	33
	juillet	26,5	42	10	32
	août	29,1	42,8	13	39
	septembre	23,9	37,9	17	50
	octobre	17,6	31,8	22	56
	novembre	10,9	24,3	30	72
	décembre	4,8	20	34	81
2016	janvier	6,5	21,2	25	63
	février	8,1	22,7	20	57
	mars	9,7	25,7	14	45
	avril	16,7	32,8	14	49
	mai	21,3	36	11	35
	juin	24,9	41	11	32
	juillet	27,4	42,6	10	30
	août	26,9	41,3	12	32
	septembre	24,3	38	17	49
	octobre	19,4	34,2	19	56
	novembre	10,5	24,5	25	67
	décembre	8,1	19,5	41	87
2017	janvier	3,4	17,5	27	72
	février	8,5	23,1	22	58
	mars	11,5	26,1	18	57
	avril	15,2	29,9	17	50
	mai	22,9	37,5	12	37
	juin	25,5	40,4	12	35
	juillet	27,3	43,1	11	27
	août	27,1	42,9	10	32
	septembre	21,9	36,6	18	56
	octobre	16,1	29,4	25	68
	novembre	9,4	22,9	29	76
	décembre	5,4	18,2	33	80
2018	janvier	5,5	20,7	25	71
	février	6,9	19,7	26	73
	mars	11,9	26,8	14	49
	avril	16,4	30,6	15	47
	mai	20,2	34,9	14	48
	juin	24,5	39,7	12	37
	juillet	30,5	47,4	9	22
	août	26,8	40,4	16	46
	septembre	24,7	38,5	17	49
	octobre	16,9	30,1	22	56
	novembre	10,4	24,1	27	68
	décembre	4,9	20,5	30	75

TAB. 1.3 : Données climatologiques enregistrées au niveau de la station météorologique d'Ouargla (AIT OUMERACI 2020)

TN : Température moyenne minimale en C°

TX : Température moyenne maximale en C°

UN : Humidité moyenne minimale en %

UX : Humidité moyenne maximale en %

1.4.4 Stratigraphie du champ Hassi Messaoud

La Figure1.9 présente la succession des couches géologiques dans la région du champ de Hassi Messaoud, illustrant leur composition et leur arrangement stratigraphique.

ERE	SYST	ETAGES		Ep moy	DESCRIPTION	
CENO-ZOIQUE	NEOGENE	MIO-PLIOCENE <i>discordance alpine</i>		240	Sable, calcaire, marne sableuse	
		EOCENE		120	Sable, calcaire à silex	
MESOZOIQUE	CRETACE	SENONIEN	CARBONATE	107	Calcaire, dolomie, anhydrite	
			ANHYDRITIQUE	219	Anhydrite, marne, dolomie	
			SALIFERE	140	Sel massif et traces d'anhydrite	
		TURONIEN	90	Calcaire crayeux avec quelques niveaux argileux		
		CE NOMANIEN	145	Anhydrite, marne, dolomie		
		ALBIEN	350	Grés, sable avec intercalations d'argile silteuse		
		APTIEN	25	Dolomie cristalline avec niveau argileux, calcaire		
		BARREMIEN	280	Argile, grés, dolomie		
		NEOCOMIEN	180	Argile, marne, dolomie, grés		
		JURASSIQUE	MALM		225	Argile, marne, calcaire, grés et traces d'anhydrite
	DOGGER		ARGILEUX	105	Argile silteuse, marne dolomitique avec fines passées de grés	
			LAGUNAIRE	210	Anhydrite, marne dolomitique, marne grise	
	LIAS		L.D 1	65	Dolomie, anhydrite, argile	
			L.S 1	90	Alternances sel, anhydrite et argile	
			L.D 2	55	Anhydrite et dolomie cristalline	
			L.S 2	60	Alternances sel et argile	
			L.D 3	30	Alternances de dolomie et de marne	
	TRIAS		SALIFERE	TS 1	46	Alternances de sel, d'anhydrite et de dolomie
				TS 2	189	Sel massif à intercalations d'anhydrite et argile gypsifère
		TS 3		202	Sel massif et traces d'argile	
		ARGILEUX	113	Argile rouge dolomitique ou silteuse injectée de sel et d'anhydrite		
		GRESEUX	35	Grés, argile		
		ERUPTIF <i>discordance hercynienne</i>	0-92	Andésites altérées		
		PALEOZOIQUE	ORDOVICIEN	QUARTZITES D'EL HAMRA	75	Quartzites fines avec traces de tigillites
	GRES D'EL ATCHANE			25	Grés fins à ciment argileux, bitumineux	
	ARGILES D'EL GASSI			50	Argiles schisteuses, vertes ou noires, glauconieuses à graptolithes	
	ZONE DES ALTERNANCES			20	Alternance de grés et argile. Présence de tigillites	
CAMBRIEN	Ri		50	Grés isométriques, fins, silteux		
	Ra		120	Grés à grés quartzitiques anisométriques à niveaux de silts		
	R2		100	Grés moyens à grossiers à ciment argileux illitique		
	R3		300	Grés grossier à ciment argileux, argile silteuse		
INFRA-CAMBRIEN	45		Grés argileux rouges			
S O C L E					Granite porphyroïde rose	

FIG. 1.9 : Colonne stratigraphique du champ hassi Messaoud (TEBIB et al. 2017).

1.4.5 Système de séparation entre le fluide de forage et les déblais au niveau de SLB

Lorsque le trépan de forage perce le sol, il réduit les roches en petits granulats, ces déblais sont entraînés dans le système de circulation de boue et remontent à la surface. Afin de recycler la boue et de pouvoir la réutiliser, les solides doivent être séparés de la boue à l'aide d'équipements de contrôle des solides ou d'équipements de séparation des solides (DAMOU 2007).

Le processus de séparation consiste à éliminer les plus grosses particules de la boue en faisant circuler le mélange de boue et de déblais sur des tamis appelés shale shakers (Figure1.10). Pendant ce temps, la boue et les particules fines passent à travers le tamis pour être collectées dans les bacs à boue dits bacs de décantation (Figure1.4). Les grosses particules continuent leur chemin vers un appareil appelé la vertigineuse (Figure1.12) afin de réduire le taux de gazole qu'elles contiennent, qui est compris entre 13% et 16% et qui varie selon la boue utilisée. Les bacs de décantation sont chargés avec de la boue semi-traitée (boue + des particules fines). Cette dernière doit encore subir un traitement pour pouvoir être réintégrée dans le système de boue en l'injectant dans les bacs de circulation, dits les bacs actifs. Souvent, un traitement mécanique supplémentaire est nécessaire dans le système des bacs de décantation afin d'éliminer autant de fines particules que possible, pour éviter toute perturbation de la performance de la boue de forage. Les équipements mécaniques utilisés pour cette étape peuvent être classés en trois types principaux :

- Des hydrocyclones pour la séparation des déblais fins et des sables ;
- Des nettoyeurs de boue (hydrocyclones déchargeant sur un tamis fin) ;
- Des centrifugeuses à décantation à bol rotatif.

Les hydrocyclones comme illustré dans la figure1.11. sont les plus souvent utilisés dans le processus de séparation des fines particules et de la boue de forage. Ils fonctionnent en utilisant la force centrifuge pour séparer les particules solides de la boue. La boue entre dans l'hydrocyclone qui va la faire tourner rapidement, créant une force centrifuge qui pousse les particules solides vers la paroi de l'hydrocyclone. Les particules solides sont ensuite collectées et évacuées du fond de l'hydrocyclone, tandis que la boue propre est récupérée par le haut et peut réintégrer les bacs actifs pour la réutiliser dans le processus de forage.

Quant aux particules fines vont rejoindre le circuit des grosses particules au niveau de la vertigineuse (Verti-G) Figure1.12 afin de réduire le taux de gasoil qu'elles contiennent à environ 4%, pour pouvoir les stocker au niveau du borbier.

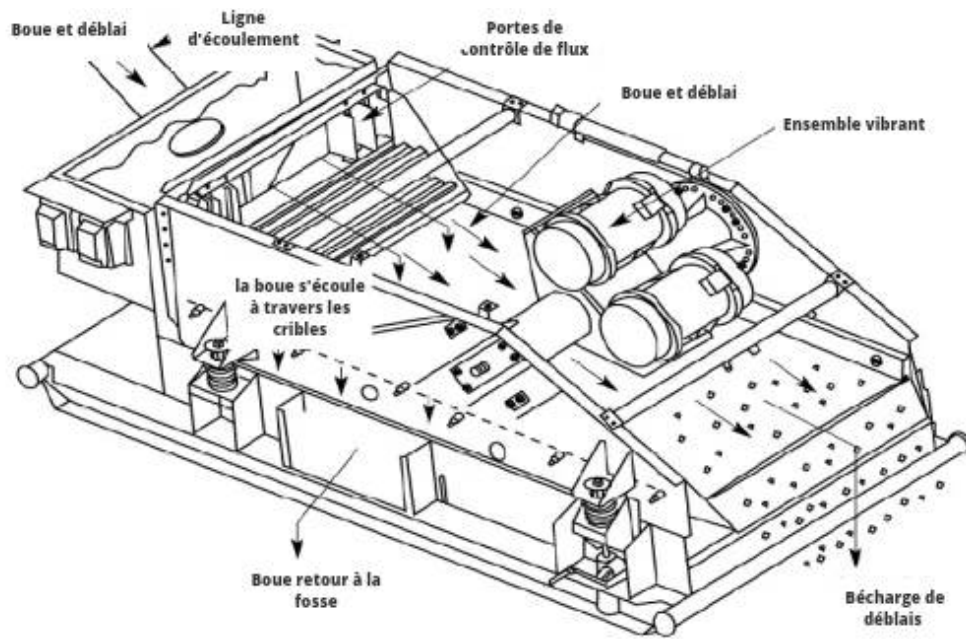


FIG. 1.10 : Shale shaker (swaco2001drilling).

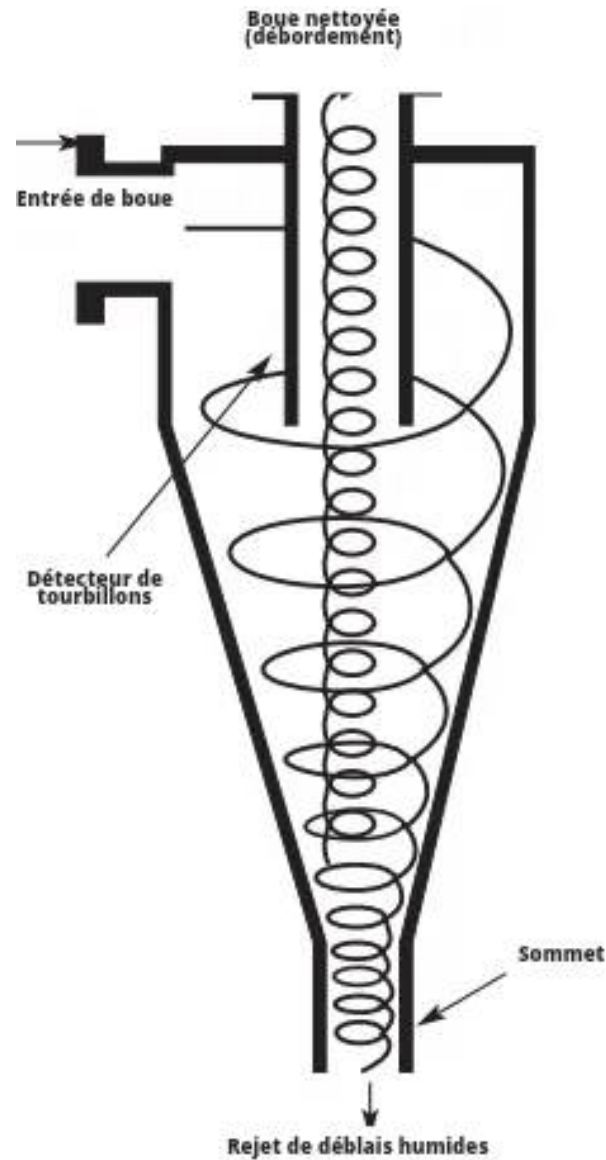


FIG. 1.11 : Schéma d'un hydrocyclone (swaco2001drilling).



FIG. 1.12 : Verti-G.

1.4.6 la station Thermal Phase Separation (TPS)

Malgré l'utilisation des procédés cités ci-dessus pour la séparation entre les déblais et la boue de forage, néanmoins les déblais contiennent encore des polluants, notamment des métaux lourds et des hydrocarbures. Ces polluants stockés dans des bourbiers Figure1.13 ne peuvent pas être relâchés dans l'environnement indéfiniment car ils ont un effet néfaste sur l'environnement.

L'utilisation de la station TPS (Thermal Phase System) Figure1.14 est donc recommandée pour la réduction du taux d'huile, ce processus applique de la chaleur indirectement aux déblais sans les incinérer, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de flamme qui touche les déblais. Contrairement aux technologies d'incinération qui oxydent (combustion) les déchets à des températures élevées, typiquement entre 1200°C et 1500°C, ce processus permet de réduire la teneur en huile des déblais de manière à les rendre moins dangereux. Il utilise également la condensation et la récupération des huiles et des eaux pour recycler ces matériaux (DAMOU 2007).



FIG. 1.13 : Photo d'un bourbier "ENF 29 well" (AIT OUMERACI 2020) .

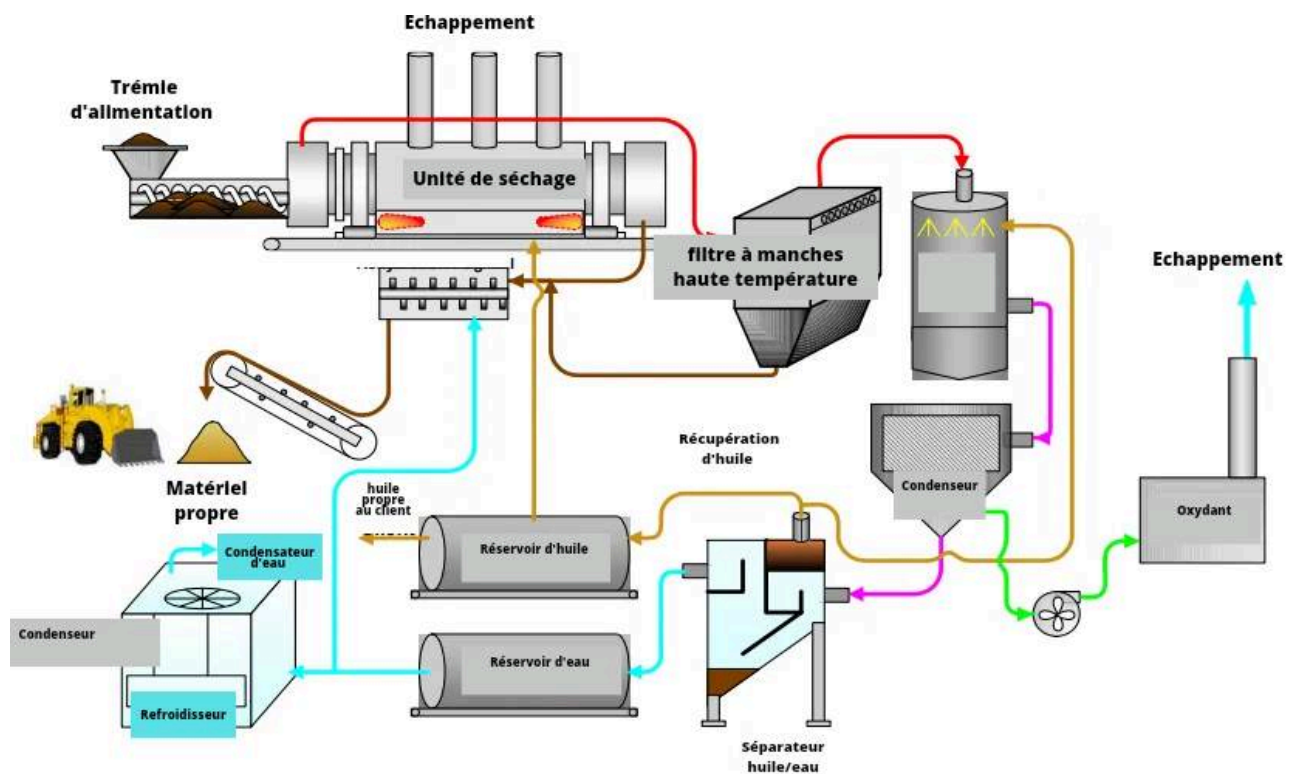


FIG. 1.14 : Processus de désorption thermique (TPS) (MiSwaco 2001).

1.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a jeté les bases nécessaires pour comprendre les aspects techniques du forage et du fluide de forage, ainsi que les particularités de la zone de Hassi Messaoud. Le système de séparation des déblais de forage mis en place par la société SLB a été souligné, constituant ainsi une base solide pour les recherches ultérieures.

Chapitre 2

Polluants présents dans les déblais de forage et techniques de décontamination

2.1 Introduction

Ce chapitre explore les polluants clés présents dans les déblais de forage ainsi que les méthodes de décontamination utilisées pour remédier à ces problèmes environnementaux. Les méthodes de décontamination examinées comprennent l'utilisation des micro-ondes, la solidification et stabilisation, ainsi que la bioremédiation. En comprenant en détail ces polluants spécifiques et les techniques de décontamination associées, nous pourrions contribuer à l'élaboration de stratégies efficaces pour minimiser les impacts environnementaux des déblais de forages à Hassi Messaoud.

2.2 Les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont classés en trois principales familles en raison de la tétravalence de l'atome de carbone et de la monovalence de l'atome d'hydrogène. La première famille est composée des hydrocarbures saturés, qui peuvent être des composés de chaîne linéaire (n-alcane), de chaîne ramifiée (iso alcane) ou de chaîne cyclique (Cyclo alcane). La seconde famille est celle des hydrocarbures insaturés, qui contiennent une double ou triple liaison (alcène ou alcyne) et sont obtenus à partir de la distillation de certains composés. Enfin, la dernière famille est celle des hydrocarbures aromatiques, qui sont des composés contenant un ou plusieurs noyaux benzéniques, et qui ont une odeur spécifique. Cette famille est divisée en deux sous-groupes : les hydrocarbures aromatiques monocycliques, tels que les BTEX, et les hydrocarbures aromatiques polycycliques, tels que les HAP.

Lorsqu'un déversement d'hydrocarbures se produit au sol, il est soumis à des processus d'altération physique, chimique et biologique qui affectent sa dynamique et son devenir dans l'environnement, selon les travaux de (HUBBE et al. 2013).

Toutefois, prévoir comment un polluant va interagir avec le sol est complexe, car le sol est un système dynamique et hétérogène dont les propriétés intrinsèques, ainsi que les propriétés physiques et chimiques des hydrocarbures, jouent un rôle crucial. Selon les recherches de (PERNOT 2013), il existe plusieurs processus naturels d'altération des hydrocarbures qui peuvent se produire, tels que la volatilisation, la biodégradation et l'adsorption. En somme, les interactions entre les hydrocarbures et le sol sont influencées par une multitude de facteurs qui rendent difficile la prédiction de leur comportement dans l'environnement.

Néanmoins, la libération d'hydrocarbures dans l'environnement engendre diverses formes de pollution touchant l'air, le sol, la nappe phréatique et la chaîne alimentaire des êtres vivants (BACHELIER 1973; ARAFA 2003; VANDERMEER et al. 2007; PALADINO et al. 2016; OUË et al. 2020). En outre, cela peut avoir des conséquences économiques, comme cela a été le cas de la marée noire provoquée par l'accident survenu dans le puits de Deepwater Horizon au Golfe du Mexique (20/04/2010).

mg/Kg de matière sèche	Seuil de référence	seuil de risque	seuil de danger
composés aromatiques			
Benzène	0,01	0,5	5
Ethylbenzène	0,05	5	50
Toluène	0,05	3	30
Xylène	0,05	5	50
Phénol	0,02	71	10
Total composés	0,1	20	70
Hydrocarbures Polycycliques (HAP)			

TAB. 2.1 : Normes hollandaises de qualité des sols (LE BISSONNAIS et al. 2005).

2.3 Le gasoil

Le gasoil est un combustible dérivé du pétrole brut, utilisé comme carburant pour les moteurs diesel. Tab2.2 Il est également appelé diesel en Amérique du Nord. D'après (VIEIRA et al. 2007), le gasoil est composé principalement de quatre classes structurales d'hydrocarbures :

- n-alcanes ou n-paraffines (hydrocarbures linéaires) ;
- isoalcanes ou isoparaffines (hydrocarbures ramifiés saturés) ;
- cycloalcanes ou naphtènes (alcanes cycliques saturés) ;
- Aromatique (hydrocarbures cycliques insaturés) mono, bi, et tri-aromatique.

Caractéristiques physico-chimiques	Gaolil Algérien	Spécifications du Gasoil Norme Algérienne NA 8110-1992
Masse volumique à 15°C, g/cm ³	0.8321	De 0.810 à 0.860
°API	38.4	/
Viscosité cinématique, cSt, à :		
20°C	4.615	9 Max
37,8°C	2.960	5
40°C	2.001	71
Point d'écoulement, °C	-29	10
Point de congélation, °C	-32	Hiver -12°C max Eté -7°C max
Point d'éclair	89.8	/
Indice d'acidité, mg KOH/g	0.859	/
Teneur en soufre	734 ppm	2500 ppm max
Teneur en eau et sédiments, BSW, %Vol	<0.1	Traces non dosables

TAB. 2.2 : Les caractéristiques physico-chimiques du Gasoil (KHODJA 2008).

2.4 Les métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments métalliques ayant une densité supérieure à 5 g/cm³. Ils peuvent être présents dans les rejets de forage pétrolier à des concentrations différentes sous forme de composés métalliques tels que le plomb, le mercure, le cadmium, le zinc, le cuivre et le nickel (HARITASH et al. 2009).

Lorsqu'ils dépassent un seuil limite (Tableau 2.3), ces métaux lourds sont très toxiques pour les êtres vivants et leur accumulation dans l'Environnement peut entraîner des effets néfastes sur la santé humaine, la faune et la flore, tels que la contamination des sols et de l'eau, la destruction de la biodiversité et la perturbation de la chaîne alimentaire. La quantité et la concentration de ces métaux dans les rejets de forage dépendent des propriétés géologiques de la zone de forage, des techniques utilisées pour extraire le pétrole et du traitement des eaux de production (REZANIA et al. 2015). Leur influence dépend principalement de leur concentration, du pH et de la température (MERCHICHI et al. 2022).

Métaux lourds	Seuil de référence (mg/kg de sol)	Seuil de risque (mg/kg de sol)	Seuil de danger (mg/kg de sol)
As	20	30	50
Cd	1	5	20
Co	20	50	300
Cr	100	250	800
Cu	50 ou 3Ppm	100	500
Hg	0.5	2	10
Ni	50 ou 5ppm	100	500
Pb	50	150	600
Zn	200	500	3000
Fe	5Ppm	/	/

TAB. 2.3 : Seuils de référence pour les métaux lourds (MERCHICHI et al. 2022)

2.5 Introduction sur les méthodes de décontamination

Le traitement de la pollution des sols est une préoccupation importante, mais les différentes méthodes de traitement ont été critiquées pour leur coût ou leur efficacité (KHODJA 2008; BENCHOUK 2017; FOKOU MBOGNE 2017).

Ainsi, le choix d'une méthode appropriée dépend de plusieurs paramètres, notamment le diagnostic initial de l'état du site, qui comprend l'identification des polluants et des conditions du site (THOMAS et al. 1997; GABET 2004).

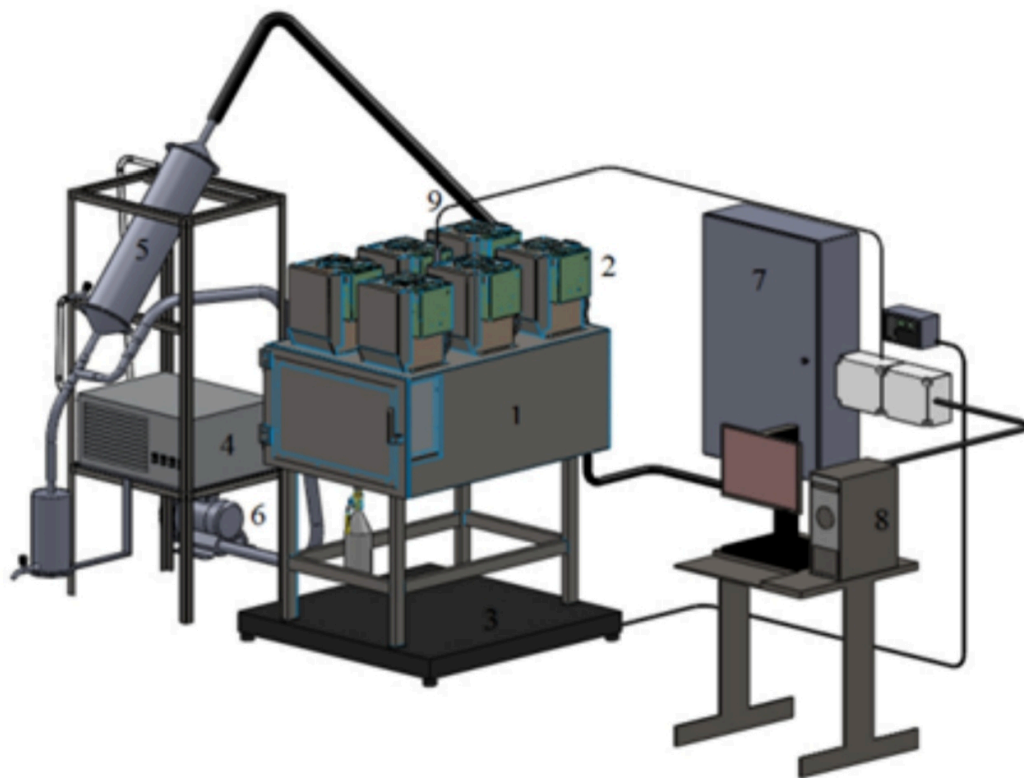
Il convient ensuite d'évaluer les risques pour la population et l'écosystème avant de sélectionner une méthode de traitement appropriée qui soit à la fois économique et rapide. Une fois la méthode de traitement mise en œuvre, un suivi du traitement est nécessaire (THOMAS et al. 1997).

2.6 Les micro-ondes

La technique de traitement des déblais de forage par micro-ondes consiste à utiliser des micro-ondes pour chauffer les déblais de forage et les décomposer en éléments plus simples (Figure 2.1), tels que de l'eau, du gaz et des solides résiduels. Le processus peut remédier aux déblais de forage avec un taux d'huile inférieur à 0,1%. Les mécanismes de chauffage uniques obtenus grâce au traitement par micro-ondes signifient que l'huile récupérée n'est pas dégradée comme c'est le cas avec la désorption thermique conventionnelle ou les processus mécaniques (ROBINSON et al. 2010).

Cette technique présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles de traitement des déblais de forage. Certes, elle est plus rapide et plus efficace que les méthodes traditionnelles. En plus, ce traitement est plus respectueux de l'environnement car il utilise moins d'énergie et produit moins de déchets.

Cependant, le traitement nécessite des équipements spécifiques et peut être coûteux. De plus, la qualité des déblais de forage traités par micro-ondes peut être inférieure à celle des déblais traités par d'autres méthodes. La figure 2.2 illustre l'unité expérimentale avec ses principaux composants (PEREIRA et al. 2013).



Cavité du four (1), sources de micro-ondes (2), échelle (3), refroidisseur d'eau (4), condenseur (5), système d'évacuation (6), panneau de contrôle (7), système d'acquisition de données (8), PT-100 (9).

FIG. 2.1 : Prototype d'unité de chauffage.



FIG. 2.2 : Unité expérimentale(PEREIRA et al. 2013).

2.7 solidification et stabilisation

La solidification/stabilisation au ciment est une méthode couramment utilisée pour le traitement, la gestion et la réutilisation sûre de déchets contaminés par les hydrocarbures (Figure 2.3). Cette méthode permet de se conformer aux réglementations environnementales en mélangeant les déblais avec un réactif (principalement le ciment) qui piège les contaminants dans une matrice solide, réduisant ainsi leur mobilité et leur capacité de lixiviation dans l'environnement. (MESSAOUD et al. 2013).

L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans le fait qu'elle nécessite un contrôle régulier après l'achèvement du processus (BALL et al. 2012)



FIG. 2.3 : Unité de solidification et stabilisation(MISWACO 2001).

2.8 la bioremédiation

2.8.1 Les micro-organismes

Les micro-organismes jouent un rôle essentiel dans la bioremédiation des hydrocarbures, en particulier les bactéries hétérotrophes.

Les bactéries sont des micro-organismes présents dans divers environnements, tels que le sol, l'eau, l'air, ainsi que dans le corps humain et animal. On estime qu'il y a en moyenne 10^8 bactéries par gramme de sol, avec la présence d'environ 10^4 espèces différentes (BONNEAU et al. 1994 ; ELLIS et al. 2000).

Parmi les bactéries, les actinomycètes jouent également un rôle important dans la bioremédiation. Les actinomycètes sont des bactéries filamenteuses et aérobies qui se trouvent principalement dans le sol et les environnements aquatiques. Ils forment des colonies caractéristiques appelées *mycélium*, qui ressemblent aux champignons. Les actinomycètes sont très diversifiés et jouent un rôle crucial dans la décomposition de la matière organique (DE SIMEIS et al. 2021).

Dans le contexte de la bioremédiation des hydrocarbures, les bactéries hétérotrophes, notamment certaines espèces de bactéries appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Bacillus* et *Alcanivorax*, sont particulièrement efficaces. Les bactéries hétérotrophes utilisent des composés organiques complexes, tels que les hydrocarbures, comme source de carbone et d'énergie. Elles ont la capacité de dégrader et de métaboliser les hydrocarbures, contribuant ainsi à leur élimination de l'environnement contaminé.

Par exemple, certaines souches de *Pseudomonas aeruginosa* et *Pseudomonas putida* sont connues pour leur capacité à dégrader divers hydrocarbures, y compris les composés pétroliers. *Bacillus subtilis* est une autre espèce de bactérie hétérotrophe qui est souvent utilisée dans la bioremédiation des hydrocarbures. *Alcanivorax borkumensis* est une bactérie marine spécialisée dans la dégradation des hydrocarbures pétroliers dans les environnements côtiers.

2.8.2 Cinétique de croissance bactériennes

La cinétique de croissance bactérienne décrit comment la population bactérienne évolue au fil du temps. Elle peut être divisée en plusieurs phases : (Figure 2.4) (ROSSET et al. 2003 ; CORNU et al. 2004)

- La phase de latence est caractérisée par une absence apparente de croissance pendant que les bactéries s'adaptent aux nouvelles conditions de leur environnement. Cette phase peut durer de quelques minutes à plusieurs heures, selon les conditions environnementales et la santé des bactéries.
- La phase de croissance exponentielle est marquée par une croissance rapide et exponentielle des bactéries en raison d'une disponibilité suffisante de nutriments et d'un environnement favorable. Cette phase est souvent considérée comme la phase de croissance active des bactéries.
- La phase stationnaire est caractérisée par une population bactérienne constante où les bactéries se divisent à un rythme équivalent à leur mort cellulaire, ce qui donne lieu à une population globalement stable. Les nutriments sont limitants et les déchets métaboliques peuvent commencer à s'accumuler.
- La phase de mort cellulaire se produit lorsque les bactéries commencent à mourir plus rapidement qu'elles ne se multiplient, souvent due à un manque de nutriments ou à des toxines accumulées dans l'environnement.

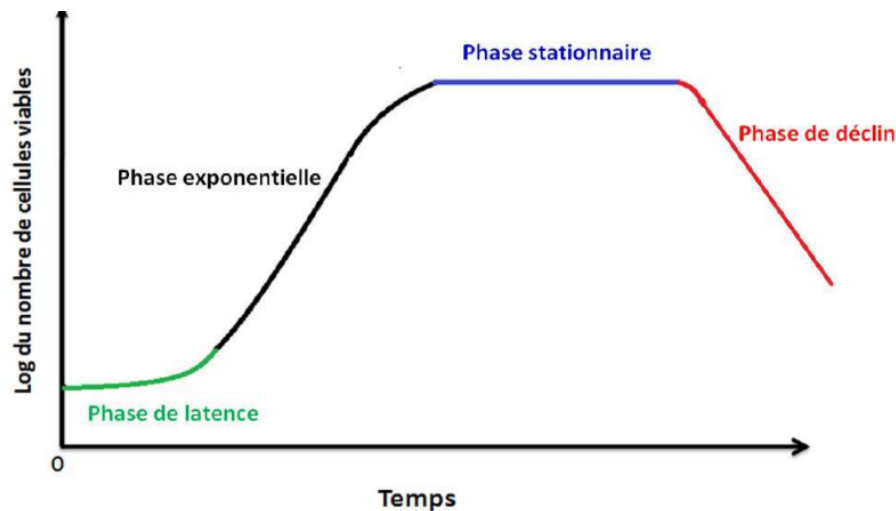


FIG. 2.4 : La Cinétique de la croissance bactériennes.

2.8.3 Différentes techniques de bioremédiation

L'atténuation naturelle

Selon (KULKARNI et al. 2012 ; RIKE et al. 2003 ; AGARRY et al. 2015), la dégradation naturelle des sols contaminés par des hydrocarbures est un processus lent dans l'environnement arctique, pouvant prendre plus de 20 ans selon (NASERI et al. 2014 ; PRINCE et al. 2013). Afin d'accélérer efficacement la biodégradation, d'autres stratégies peuvent être mises en œuvre, telles que la bioaugmentation et la biostimulation. (KALANTARY et al. 2014).

La bioaugmentation

La bioaugmentation est une méthode consistant à introduire des micro-organismes spécifiques dans un sol contaminé par des hydrocarbures, en provenance soit du site contaminé lui-même, soit d'un site historique ou sélectionnés et génétiquement modifiés à cet effet (MIR et al. 2022). Ces micro-organismes peuvent être soit allochtones soit autochtones (VOGEL 1996). Cette technique consiste à inoculer des souches de micro-organismes exogènes dans le sol, afin de renforcer l'activité microbienne endogène responsable de la biodégradation des polluants organiques (XU et al. 2017).

La biostimulation

La biostimulation est une technique qui vise à stimuler l'activité microbienne endogène du sol grâce à l'utilisation d'adjuvants chimiques ou biochimiques tels que des nutriments, notamment l'azote, le phosphore, le potassium, ainsi que des conditions environnementales favorables telles que le potentiel d'oxydoréduction et l'humidité MAZZIOTTI 2017 ; MIYASAKA et al. 2006.

Cette technique est largement utilisée en raison de son faible coût. Cependant, il est important de contrôler et d'optimiser certains paramètres pour assurer une biodégradation efficace. En effet, une dégradation partielle ou la formation de produits intermédiaires toxiques peut se produire si ces paramètres ne sont pas correctement contrôlés (SOTERIOU et al. 2021). Le choix du substrat organique utilisé dépend principalement de son ratio

C :N, qui doit être équilibré pour nourrir les microorganismes de manière optimale. Ainsi, les auteurs tels que (TYAGI et al. 2011) recommandent un ratio C :N optimal compris entre 25-30.

Combinaison Biostimulation et Bioaugmentation

La combinaison de la biostimulation et de la bioaugmentation peut être une approche efficace pour la dégradation des sols contaminés par des hydrocarbures en ajoutant des nutriments (Phosphore, Azote et carbone) qui ne sont pas nocifs pour les souches bactériennes (ADAMS et al. 2015). D'après plusieurs chercheurs, il a été démontré que l'utilisation de la biostimulation avec ajout de nutriments augmente le taux de consommation des hydrocarbures.

2.8.4 Types de bioremédiation

Le compostage

Le compostage consiste à mélanger des sols excavés avec des amendements organiques appelés compost, afin de stimuler la croissance des micro-organismes. (RHBAL et al. 2020 ; SHARMA et al. 2018)

La biopile

Cette technique est une variante élaborée du compostage appliqué aux sols excavés. Elle implique la création de drains légèrement inclinés, d'une hauteur de 2 à 4m, qui sont recouverts d'une membrane imperméable. Les paramètres physicochimiques, biologiques sont contrôlés et des nutriments, des micro-organismes sont ajoutés pour améliorer le processus de dégradation. (SINGH et al. 2012 ; DIAS et al. 2015), cette technique peut prendre entre 8 et 56 jour. (SHARMA et al. 2018).

Le landfarming

La technique de landfarming consiste à excaver le sol contaminé et à le placer sur une surface plane imperméable, telle qu'une géomembrane, afin de prévenir la pollution des sols et des eaux souterraines. (LUKIĆ et al. 2017). Cette méthode est efficace et relativement peu coûteuse pour le traitement des sols arctiques contaminés. (LUKIĆ et al. 2017 ; PAUDYN et al. 2008 ; MAILA et al. 2004 ; MCCARTHY et al. 2004).

Facteurs influençant la biodégradabilité des hydrocarbures

Les micro-organismes tels que les bactéries, les actinomycètes et les champignons sont abondants et jouent un rôle crucial dans le processus de biodégradation des hydrocarbures pétroliers (FERNÁNDEZ-LUQUEÑO et al. 2010).

Cependant, plusieurs facteurs affectent la biodégradabilité des hydrocarbures, notamment la température, comme le souligne (CHANDRA et al. 2013) qui indique que le taux de biodégradation augmente avec l'augmentation de la température et ralentit avec la diminution de la température. Le pH affecte également l'activité bactérienne car chaque

micro-organisme possède un pH pour lequel sa croissance est maximale. (BISSAAD 1999). L'oxygène, le taux d'humidité, les nutriments tels que N, P, K, S, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn et Cu sont également des facteurs importants qui influencent la biodégradabilité des hydrocarbures.

L'apport d'azote et de phosphore doit être suffisant pour établir des rapports C/N et C/P optimaux, (MILLER et al. 2004).

2.9 Conclusion

La compréhension approfondie des polluants spécifiques et des techniques de décontamination associées constitue un élément essentiel pour élaborer des stratégies de gestion durable des déblais de forages pétroliers. En intégrant nos connaissances sur ces polluants et en explorant les méthodes de décontamination, nous sommes mieux préparés pour formuler des recommandations précises et efficaces en vue de réduire les conséquences néfastes sur l'environnement. À mesure que nous progressons dans notre étude, nous espérons apporter une contribution significative à l'avancement des pratiques de bioremédiation dans le contexte spécifique de Hassi Messaoud, en veillant à protéger l'écosystème local et à préserver les ressources naturelles pour les générations futures.

Chapitre 3

Matériels et méthodes utilisées

3.1 Introduction

La méthode de bioremédiation a été choisie dans le cadre de ce projet de fin d'études. Des échantillons de la région de Bir Seba, située à 130 km au nord-est de Hassi Messaoud (TP-222) dans la wilaya de Touggourt, ont été prélevés. Trois méthodes de biotraitement différentes ont été sélectionnées pour être étudiées dans le chapitre suivant. L'objectif est de déterminer la méthode la plus appropriée à proposer à SLB pour la mettre en œuvre à HMD.

3.2 Prélèvement des échantillons

Les échantillons ont été prélevés sur le chantier de Mi-Swaco, une filiale de la SLB, à partir du puits TP-222 section du ($8''_{1/2}$), en deux points différents. Le premier point de prélèvement est situé sur les déblais de forage avant le traitement avec le verti-G. Le deuxième point a été prélevé après le traitement avec le verti-G (Figure 1.4).

Cotes(m)	3596	3631	3649	3670	3677	3692
----------	------	------	------	------	------	------

TAB. 3.1 : Prélèvements réalisés sur différents côtés pour les deux points d'échantillonnage

Afin d'assurer une représentativité des échantillons, un prélèvement a été effectué sur plusieurs côtés (Figure 3.1). Un échantillon composite a été préparé en mélangeant une quantité égale de chaque côté prélevé. Cette méthode a été utilisée pour les deux points d'échantillonnage, à savoir le prélèvement avant le traitement avec le verti-G et celui effectué après le traitement avec le verti-G.



FIG. 3.1 : Échantillons prélevés.

3.3 Caractérisation et mesures effectuées sur les échantillons

3.3.1 Teneur en eau

Afin de déterminer la teneur en eau des échantillons, une série d'étapes a été suivie. Tout d'abord, l'échantillon a été placé dans un creuset et sa masse initiale m_1 a été

notée. Ensuite, il a été mis dans un four préchauffé à une température de 105°C pendant 24 heures (Figure 3.2). Après avoir retiré l'échantillon du four, il a été laissé refroidir à température ambiante jusqu'à atteindre une température constante. Ensuite, il a été pesé à nouveau après séchage, et cette nouvelle masse m_2 a été enregistrée. De plus, le creuset vide a également été pesé, et cette masse m_0 a été enregistrée. Pour calculer la teneur en eau de l'échantillon, la formule suivante a été utilisée :

$$W = \frac{(m_1 - m_0) - (m_2 - m_0)}{(m_2 - m_0)} \times 100$$

où

- W représente la teneur en eau en pourcentage (%) ;
- m_0 est la masse du creuset vide (g) ;
- m_1 est la masse du creuset contenant l'échantillon avant séchage (g) ;
- m_2 est la masse du creuset contenant l'échantillon sec après avoir été chauffé dans un four (g) ;



FIG. 3.2 : Échantillons dans le four pour déterminer la teneur en eau.

3.3.2 Dosage des Hydrocarbures

Distillation

La distillation est une méthode utilisée pour déterminer la teneur en huile et en eau de constitution du sol. Cette méthode est effectuée à l'aide d'un distillateur(Fig3.3).



FIG. 3.3 : Distillateur.

La méthode utilisée pour mesurer ces paramètres est la suivante :

Tout d'abord, la masse totale de la cellule vide m_1 est mesurée et notée. Ensuite, un échantillon représentatif des déblais humides est prélevé et refroidi à environ 27 °C. La tasse de la cellule est partiellement remplie avec cet échantillon, puis la cellule est fermée et la masse totale m_2 est mesurée. Ensuite, le condenseur est attaché et l'ensemble de la cellule est placé dans le distillateur, en fermant le couvercle isolant. Une éprouvette propre et sèche m_3 est pesée avant d'être placée sous la sortie du condenseur. Pour améliorer la précision des mesures, il est possible de pré-humidifier l'intérieur de l'éprouvette avec du PNP, un solvant utilisé pour briser l'émulsion de l'huile lors de la titration chimique. Ensuite, le chauffeur est allumé et le montage du distillateur est laissé en fonctionnement pendant au moins une heure, collectant le condensat dans l'éprouvette. La cellule est ensuite retirée, laissée refroidir, puis pesée et sa masse m_5 est notée. Le volume total d'eau collecté dans l'éprouvette, noté VW, est enregistré, et l'éprouvette avec son contenu liquide (huile et eau) est pesée m_4 . Enfin, le distillateur est éteint et les calculs suivants sont effectués :

$$m_{WC} = m_2 - m_1 \quad (3.1)$$

où

- m_{WC} est la masse des déblais humides, exprimée en grammes ;
- m_2 est la masse de l'ensemble de la cellule remplie avec échantillon, exprimée en grammes ;
- m_1 est la masse de l'ensemble de la cellule vide, exprimée en grammes.

$$m_d = m_5 - m_1 \quad (3.2)$$

où

- m_d est la masse des déblais séchés dans la cellule, exprimée en grammes ;
- m_5 est la masse de la cellule refroidie, exprimée en grammes ;

- m_1 est la masse de la cellule vide, exprimée en grammes ;

$$m_o = m_4 - (m_3 + V_w) \quad (3.3)$$

où

- m_o est la masse d'huile, exprimée en grammes ;
- m_4 est la masse de l'éprouvette refroidi contenant les liquides condensés, exprimée en grammes ;
- m_3 est la masse d'éprouvette vide et sec, exprimée en grammes ;
- V_w est le volume d'eau exprimé en millilitres ou la masse d'eau exprimée en grammes (1 ml = 1 g) ;

Répéter la procédure si cette exigence n'est pas respectée :

$$0.95 < \frac{m_d + m_o + v_w}{m_{wc}} < 1.05 \quad (3.4)$$

Le taux de gasoil dans les déblais est exprimé par la relation suivante :

$$R_{oc} = \frac{M_o}{M_d} \times 100 \quad (3.5)$$

Teneur en hydrocarbures Totaux (TPH : Total Petroleum Hydrocarbons)(méthode de Soxhlet modifiée)

Principe

La méthode de Soxhlet modifiée est une technique d'extraction utilisée pour mesurer la quantité de matière organique dans un échantillon. Elle implique l'utilisation d'un solvant extracteur, tel que le dichlorométhane, qui dissout graduellement la matière organique présente dans l'échantillon. Après l'extraction, le solvant est éliminé et les hydrocarbures extraits sont pesés pour obtenir une mesure gravimétrique de leur quantité.

Extraction des hydrocarbures

Pour réaliser l'extraction des hydrocarbures, nous avons utilisé du dichlorométhane comme solvant. Les échantillons ont été placés dans un bain à ultrasons pendant 20 minutes afin de favoriser l'extraction des hydrocarbures (Figure3.4). Ensuite, les échantillons ont été centrifugés et la solution résultante (Figure4.10) a été récupérée pour être dosée.



FIG. 3.4 : Ultrason.



FIG. 3.5 : Solutions résultantes.

Dosage

Le dosage des hydrocarbures a été réalisé au laboratoire de l'environnement à l'aide d'un rota-vapor (Figure 3.6). Cette étape consiste à vaporiser le dichlorométhane utilisé pour la quantification des hydrocarbures. Le ballon contenant les hydrocarbures a ensuite été pesé afin de déterminer le TPH.



FIG. 3.6 : Rota-vapeur.

La teneur en hydrocarbures totaux s'exprime en % selon la formule suivante :

$$(3.6) \quad TPH(\%) = \frac{(p_1 - p_0) \times 100}{p_1}$$

où :

- P_0 : Poids de ballon vide ;
- P_1 : Poids de ballon rempli.

3.3.3 Détermination des paramètres pH et potentiel redox

Pour déterminer ces paramètres, un rapport L/S de 10/90 a été utilisé. Le mélange a été placé sous agitation pendant 30 secondes puis laissé en repos pendant 20 minutes afin de permettre la sédimentation des particules. Cette opération d'agitation et de repos a été répétée trois fois. Enfin, les paramètres tels que le potentiel redox et le pH ont été mesurés à l'aide d'électrodes appropriées.

pH

Placer l'électrode de mesure dans l'échantillon et attendre que la valeur se stabilise pour obtenir une mesure précise.

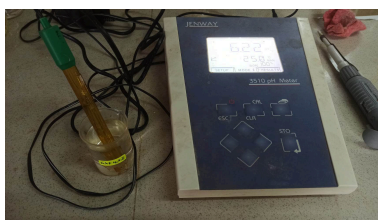


FIG. 3.7 : Mesure du pH.

Potentiel redox

Placer l'électrode de mesure dans l'échantillon et attendre que la valeur se stabilise pour obtenir une mesure précise.

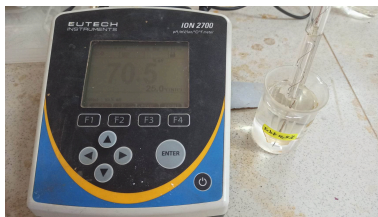


FIG. 3.8 : Mesure du Potentiel redox.

3.3.4 Dénombrement bactérien par densité optique

Cette méthode est utilisée pour estimer la concentration de bactéries dans un échantillon. Les étapes de cette méthode comprennent la préparation de l'échantillon en diluant 1 mL de l'échantillon bactérien dans 9 mL d'eau distillée. Ensuite, l'absorbance de l'échantillon a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible JENWAY 6705 (Figure 3.9) à une longueur d'onde de 600 nm (BERGERE et al. 1968). Avant de procéder à la mesure, le spectrophotomètre a été calibré en utilisant une solution étalon d'absorbance connue (eau distillée), garantissant ainsi des mesures précises et reproductibles. L'échantillon a ensuite été placé dans une cuvette en quartz, en éliminant soigneusement les bulles d'air, et inséré dans le spectrophotomètre pour enregistrer l'absorbance.

En utilisant les données d'absorbance, la densité optique a été calculée. Enfin, en utilisant des équations ou des courbes d'étalonnage spécifiques, la densité optique a été convertie en concentration bactérienne, fournissant ainsi une évaluation quantitative de la population bactérienne dans les échantillons. Cette méthode offre une approche fiable et pratique pour estimer la concentration de bactéries, ce qui est essentiel dans de nombreux domaines de recherche et d'application. Finalement, la concentration bactérienne a été calculée. Sachant que :

$$0.1\text{DO} \equiv 2 \times 10^8 \text{ bactéries/ml} \quad (3.7)$$

où

DO : densité optique.



FIG. 3.9 : Spectrophotomètre UV-visible.

3.3.5 Préparation des lixiviats

Afin de caractériser nos échantillons, une préparation de lixiviats a été réalisée conformément à la norme **NFX 31 160**. L'extraction a été effectuée selon le protocole suivant : tout d'abord, 30 g d'échantillon ont été introduits dans un bécher contenant 300 ml d'eau distillée. Ensuite, le mélange a été agité pendant 24 heures à une vitesse de 150 tr/min, puis il a été laissé à décanter. Pour obtenir un liquide clair, le mélange a été filtré à l'aide d'un papier filtre de 0.45 μ m (Figure 3.10). Enfin, le liquide obtenu, c'est-à-dire le lixiviat, a été transféré dans des tubes à essais en vue d'une analyse ultérieure (Figure 3.11).



FIG. 3.10 : Filtration des solutions



FIG. 3.11 : Le lixiviat

Calcium, Sodium et Potassium

Les mesures de calcium, sodium et potassium ont été effectuées à l'aide d'un photomètre à flamme de marque Jenway PFP7.

Pour ce faire, il faut préparer des solutions étalons de 10 ppm, 20 ppm, 30 ppm et 40 ppm pour chaque composé que nous souhaitons analyser. Ces solutions étalons sont préparées à partir d'une solution mère fournie par le fabricant du photomètre.

Le filtre correspondant à chaque composé a été réglé sur le photomètre à flamme. Le réglage du blanc a été effectué en utilisant un bécher d'eau distillée afin de compenser les interférences et d'ajuster le détecteur de l'appareil (Figure 3.12). Les solutions étalons ont ensuite été introduites dans le photomètre à flamme et les résultats fournis par l'appareil ont été enregistrés pour chacune d'entre elles. Ces données ont été utilisées pour construire une courbe d'étalonnage, où les concentrations des solutions étalons ont été représentées sur l'axe des abscisses et les mesures de l'appareil (intensités lumineuses, absorbances, etc.) sur l'axe des ordonnées. Par la suite, une projection de la courbe d'étalonnage a été réalisée afin de déterminer la concentration exacte des composés chimiques dans l'échantillon à analyser. Le lixiviat (échantillon) a ensuite été passé à travers le photomètre à flamme et la mesure obtenue a été enregistrée. En utilisant la projection de la courbe d'étalonnage, la concentration exacte du composé chimique dans l'échantillon a pu être déterminée en se basant sur la mesure obtenue.



FIG. 3.12 : Réglage du blanc dans le photomètre à flamme.

Phosphore

Préparation de la solution mère : (BOUMEDIENE et al. 2016)

La préparation de la solution mère a suivi les étapes suivantes : 0,381 g de dihydrogénophosphate de potassium KH_2PO_4 ont été précisément pesés. Ensuite, le KH_2PO_4 a été dissous dans 1 L d'eau distillée. Pour calculer la concentration massique de la solution mère (C_m), la formule suivante a été utilisée :

$$C_m = m/V$$

où

m est la masse de KH_2PO_4 dissoute.

V est le volume de la solution.

Calcul de la concentration molaire de la solution mère (CM) : Convertir la concentration massique en concentration molaire en utilisant la masse molaire du KH_2PO_4 .

$$CM = \frac{C_m}{M_{KH_2PO_4}} = \frac{0.381}{136.1} = 0.0028 \text{ mol/L} \quad (3.8)$$

Calcul de la concentration molaire en phosphore de la solution mère $C_{m(p)}$:

La masse molaire du phosphore $M_{(p)}$, ainsi que la masse molaire du KH_2PO_4 ($M_{KH_2PO_4}$) ont été utilisées. En utilisant la formule suivante :

$$C_{m(p)} = \frac{M_{(p)} \times CM}{M_{KH_2PO_4}} = 6.38 \times 10^{-4} \quad (3.9)$$

Préparation des solutions filles pour la courbe d'étalonnage : La préparation des solutions filles à partir de la solution mère de concentration CM a suivi la procédure suivante. Tout d'abord, de l'eau distillée et un volume égal du réactif vanadomolybdique ont été ajoutés à la solution mère. Les solutions filles doivent avoir un volume total VT de 7,5 mL. Pour calculer les concentrations C_i des solutions filles, la formule suivante a été utilisée :

$$C_i = \frac{CM \times VM}{VT} \quad (3.10)$$

Mesure de l'absorbance des solutions filles :

Pour mesurer l'absorbance des solutions filles, le spectrophotomètre a été réglé à une longueur d'onde de 470 nm (BOUMEDIENE et al. 2016) (Figure 3.13). Ensuite, chaque solution fille a été introduite dans le spectrophotomètre et les valeurs d'absorbance correspondantes à leurs concentrations en phosphore ont été enregistrées. À l'aide de ces données, une courbe d'étalonnage a été tracée en représentant les valeurs d'absorbance sur l'axe des y et les concentrations en phosphore des solutions filles sur l'axe des x.



FIG. 3.13 : Analyse du phosphore par spectrométrie.

Mesure de l'absorbance de l'échantillon : Pour mesurer l'absorbance de l'échantillon, la procédure suivante a été mise en place : 1 mL de la solution d'échantillon (S), 6,5 mL d'eau distillée et 2,5 mL du réactif vanadomolybdique ont été mélangés dans un tube à essai. Ensuite, le spectrophotomètre a été utilisé pour lire l'absorbance de l'échantillon à une longueur d'onde de 470 nm. Enfin, pour estimer la concentration en phosphore de l'échantillon, la courbe d'étalonnage précédemment établie a été utilisée en projetant les valeurs d'absorbance de l'échantillon sur la courbe. Cette projection a permis de déterminer la concentration en phosphore de l'échantillon analysé.

Calcul de la concentration molaire en phosphore (S) :

La concentration C_2 de l'échantillon a été mesurée en utilisant la courbe d'étalonnage préalablement établie. Ensuite, le volume de l'échantillon V_2 , qui est de 7,5 mL et a été obtenu par dilution de la solution initiale (S) avec un volume initial V_1 de 1 L, a été pris en compte. Pour calculer la concentration molaire en phosphore de la solution d'échantillon (S), la formule suivante a été utilisée :

$$C_1 = \frac{C_2 \times V_2}{V_1} \quad (3.11)$$

Métaux

Pour la caractérisation des métaux (Fe, Cu et Ni), la méthode utilisée était la Spectrophotométrie d'Absorption Atomique (SAA) (Figure 3.14).

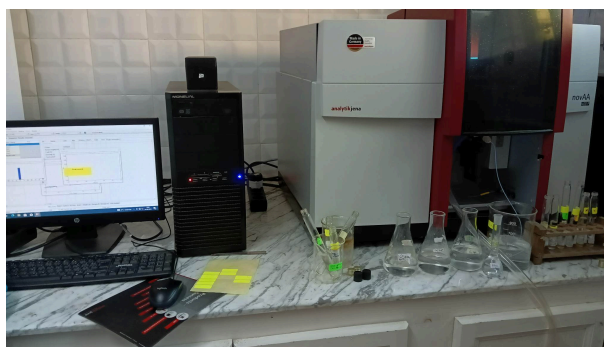


FIG. 3.14 : Spectrophotométrie d'Absorption Atomique.

Le principe de la Spectrophotométrie d'Absorption Atomique (SAA) repose sur l'absorption de la lumière par les atomes d'un élément spécifique présent dans un échantillon.

Lorsqu'un faisceau de lumière monochromatique traverse l'échantillon, les atomes de l'élément absorbent la lumière à une longueur d'onde caractéristique. La quantité de lumière absorbée est directement proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon (Figure 3.15). En mesurant l'intensité de la lumière transmise à travers l'échantillon et en comparant cette mesure à celle d'un blanc de référence.



FIG. 3.15 : Étalons utilisés pour la SAA.

3.3.6 Analyse de la composition élémentaire

L'analyse de la composition élémentaire des échantillons a été réalisée en utilisant la technique de Fluorescence des Rayons X (FRX). Cette méthode nous a permis de déterminer les éléments présents dans les échantillons et d'évaluer leur concentration respective. Les mesures de FRX ont été effectuées au Centre de Cétim, un centre spécialisé dans l'analyse et la caractérisation des matériaux.

Principe de XRF

L'analyse par Fluorescence des Rayons X (XRF) a été utilisée pour caractériser les échantillons en termes de composition élémentaire. La technique XRF est basée sur le principe de l'émission de rayons X caractéristiques par les atomes d'un matériau lorsqu'ils sont excités par une source d'énergie telle qu'un tube à rayons X.

Lorsque les rayons X sont dirigés vers l'échantillon, les atomes présents dans celui-ci sont stimulés et émettent des rayons X spécifiques correspondant à leur composition élémentaire (Figure 3.16). Ces rayons X sont ensuite détectés et analysés pour déterminer les éléments présents dans l'échantillon et leur concentration (THIRION-MERLE 2014).

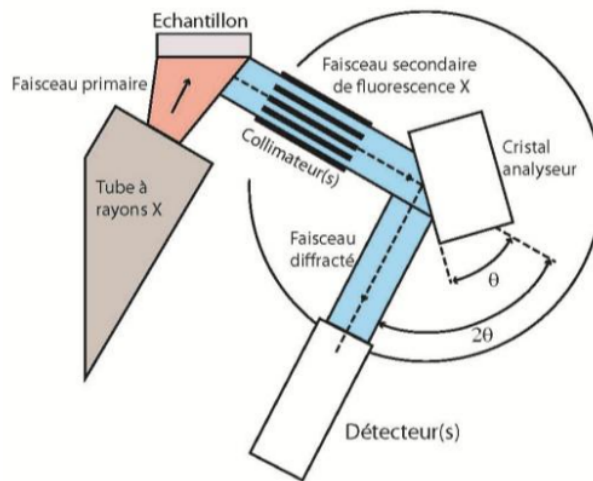


FIG. 3.16 : Principe de la fluorescence des Rayons X (XRF) (THIRION-MERLE 2014).

3.4 Codification des essais

0	Echantillon 1 (14%)
1	Terreaux + échantillon 1
2	Foin + feuilles + échantillon 1
3	Sciure de bois + échantillon 1
4	Fumier + échantillon 1
5	Argile activée + terreaux + échantillon 1
6	Argile + terreaux + échantillon 1
7	Cendres de bois + échantillon 1
8	Bactéries autochtones + échantillon 1
9	Bactéries Acidophiles + échantillon 1
10	Echantillon 2 (4.5%)
11	Terreaux + échantillon 2
12	Foin + feuilles + échantillon 2
13	Sciure de bois + échantillon 2
14	Fumier + échantillon 2
15	Argile activée + terreaux + échantillon 2
16	Argile + terreaux + échantillon 2
17	Cendres de bois + échantillon 2
18	Bactéries autochtones + échantillon 2
19	Bactéries Acidophiles + échantillon 2

TAB. 3.2 : Codification des essais

3.5 Choix des méthodes de traitement

La méthode de bioremédiation a été choisie en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de l'absence de besoin d'un équipement encombrant et de la réduction de l'intervention humaine requise (DAMOU 2007 ; KHODJA 2008 ; FOKOU MBOGNE 2017 ; AIT OUMERACI 2020). Les essais ont été subdivisés en trois sous-méthodes :

La première consiste à réaliser des mélanges avec différents matériaux.

La deuxième sous-méthode consiste à incuber les bactéries autochtones (préexistantes dans nos échantillons) et à les mélanger avec l'échantillon.

La troisième sous-méthode consiste à incubation des bactéries acidophiles (présentes dans un échantillon acide provenant d'une mine "Kef Oum Tboul"), puis récupérer l'inoculum et le mélanger avec l'échantillon (Figure3.17)

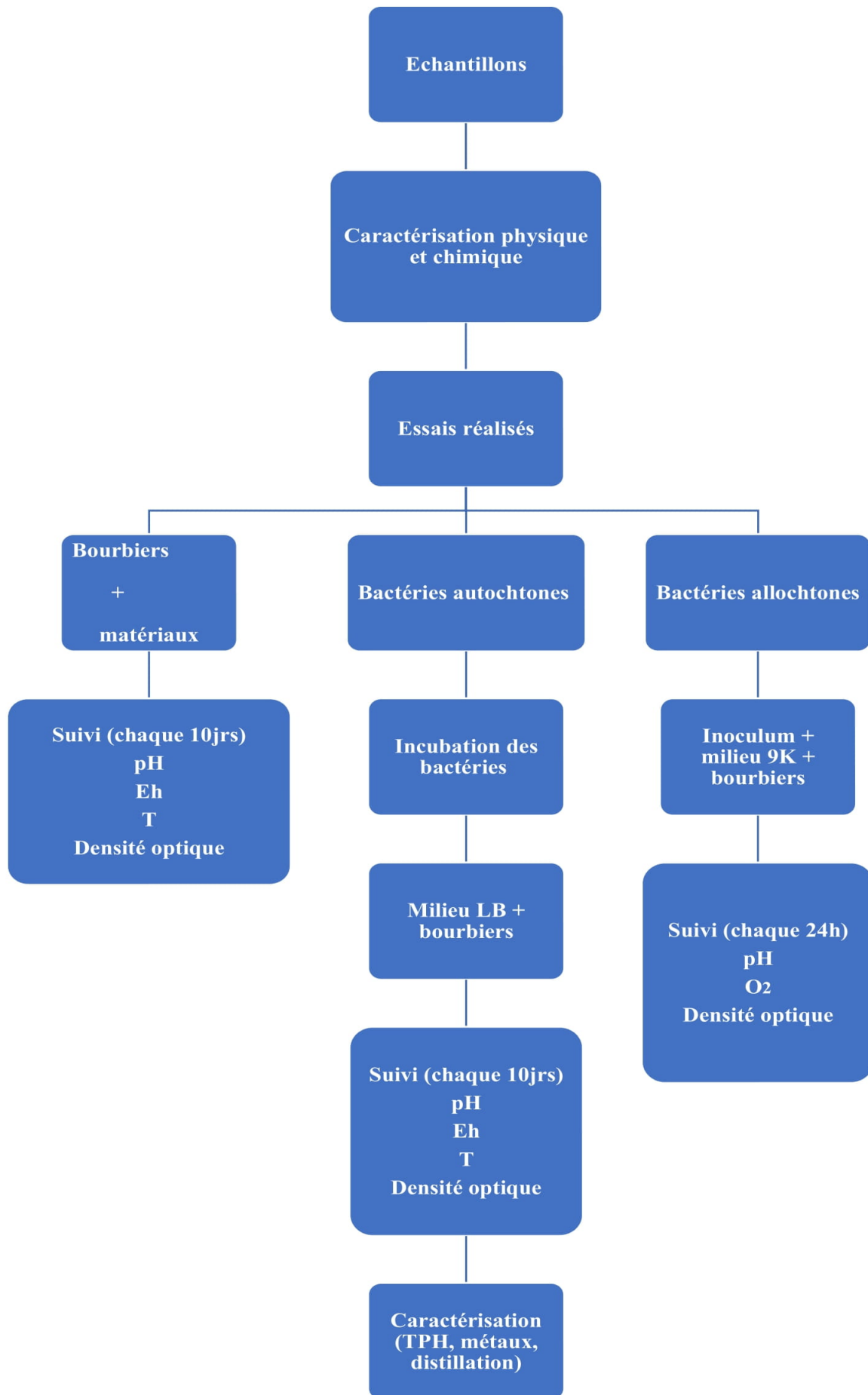


FIG. 3.17 : Schéma des trois méthodes explorées dans les essais.

3.5.1 Première méthode

L'essai a été réalisé en utilisant la méthode du landfarming en raison de sa conception aisée (KHODJA 2008 ; AIT OUMERACI 2020).

Préparation des échantillons et des bacs de traitement

Sept mélanges ont été préparés afin d'évaluer l'efficacité de la dégradation des hydrocarbures présents dans les rejets de forage. Cette préparation permettra de les comparer ultérieurement en fonction de leur rendement.

- **Bac 1:** Terreaux (50g) (**Figure3.18**) + Échantillons 1 (500g).

Le terreau a été tamisé pour obtenir une granulométrie inférieure à 1,25 mm

- **Bac 2:** Foin (25g) (**Figure3.19**) + Feuilles mortes (25g) (**Figure3.20**) + Échantillons 1 (500g).

Le foin a été coupé en petits morceaux

- **Bac 3:** Sciure de bois (50g) (**Figure3.21**) + Échantillons 1 (500g).

- **Bac 4:** Fumier de vaches et de moutons (25g+25g) (**Figure3.22**) + Échantillons 1 (500g).

Nous nous sommes procuré cela dans une ferme à Bordj El Kiffan, en Algérie

- **Bac 5:** Argile activée (25g) (**Figure3.23**) + Terreaux (25g) + Échantillons 1 (500g).

Pour obtenir une argile activée, nous l'avons placée dans un four à 350 °C pendant quatre heures afin d'augmenter sa surface spécifique (Figure3.26).

- **Bac 6:** Argile (25g) (**Figure3.24**) + Terreaux (25g) (**Figure3.18**) + Échantillons 1 (500g).

- **Bac 7:** Cendre de bois (50g) (**Figure3.25**) + Échantillons 1 (500g).

Cendre de bois tamisée a 800 µm.

- **Bac 11:** Terreaux (50g) (**Figure3.18**) + Échantillons 2 (500g).

Le terreau a été tamisé pour obtenir une granulométrie inférieure à 1,25 mm

- **Bac 12:** Foin (25g) (**Figure3.19**) + Feuilles mortes (25g) (**Figure3.20**) + Échantillons 2 (500g).

Le foin a été coupé en petits morceaux

- **Bac 13:** Sciure de bois (50g) (**Figure3.21**) + Échantillons 2 (500g).

- **Bac 14:** Fumier de vaches et de moutons (25g+25g) (**Figure3.22**) + Échantillons 2 (500g).

Nous nous sommes procuré cela dans une ferme à Bordj El Kiffan, en Algérie

- **Bac 15:** Argile activée (25g) (**Figure3.23**) + Terreaux (25g) (**Figure3.18**) + Échantillons 2 (500g).

Pour obtenir une argile activée, nous l'avons placée dans un four à 350 °C pendant quatre heures afin d'augmenter sa surface spécifique (Figure3.26).

- **Bac 16:** Argile (25g) (**Figure3.24**) + Terreaux (25g) (**Figure3.18**) + Échantillons 2 (500g).
- **Bac 17:** Cendre de bois (50g) (**Figure3.25**) + Échantillons 2 (500g).
Cendre de bois tamisée a 800 µm



FIG. 3.18 : Terreaux.



FIG. 3.19 : Foin.



FIG. 3.20 : Feuilles mortes.



FIG. 3.21 : Sciure de bois.



FIG. 3.22 : Fumier de vache et moutons.



FIG. 3.23 : Argile activée.



FIG. 3.24 : Argile.



FIG. 3.25 : Cendre de bois.



FIG. 3.26 : Préparation de l'argile activée.

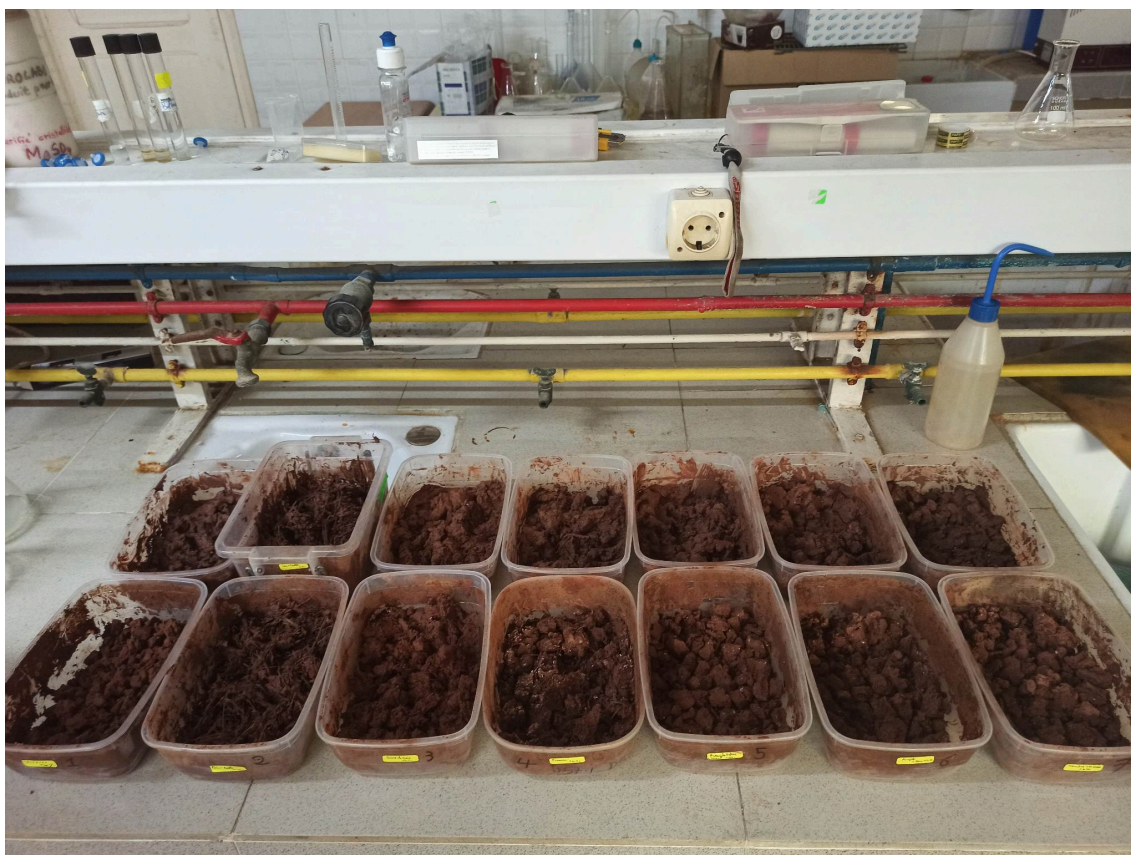


FIG. 3.27 : Les bacs des mélanges.

Suivi de l'essai

Le contenu des bacs est malaxé toutes les 48 heures pour améliorer l'aération et l'homogénéisation et sont arrosés avec de l'eau du robinet.

Dans le but de reproduire les conditions climatologiques de HMD, une humidité de 40% a été sélectionnée. Cette valeur représente la moyenne entre les valeurs UX et UM, telles qu'indiquées sur le (graphique 3.28).

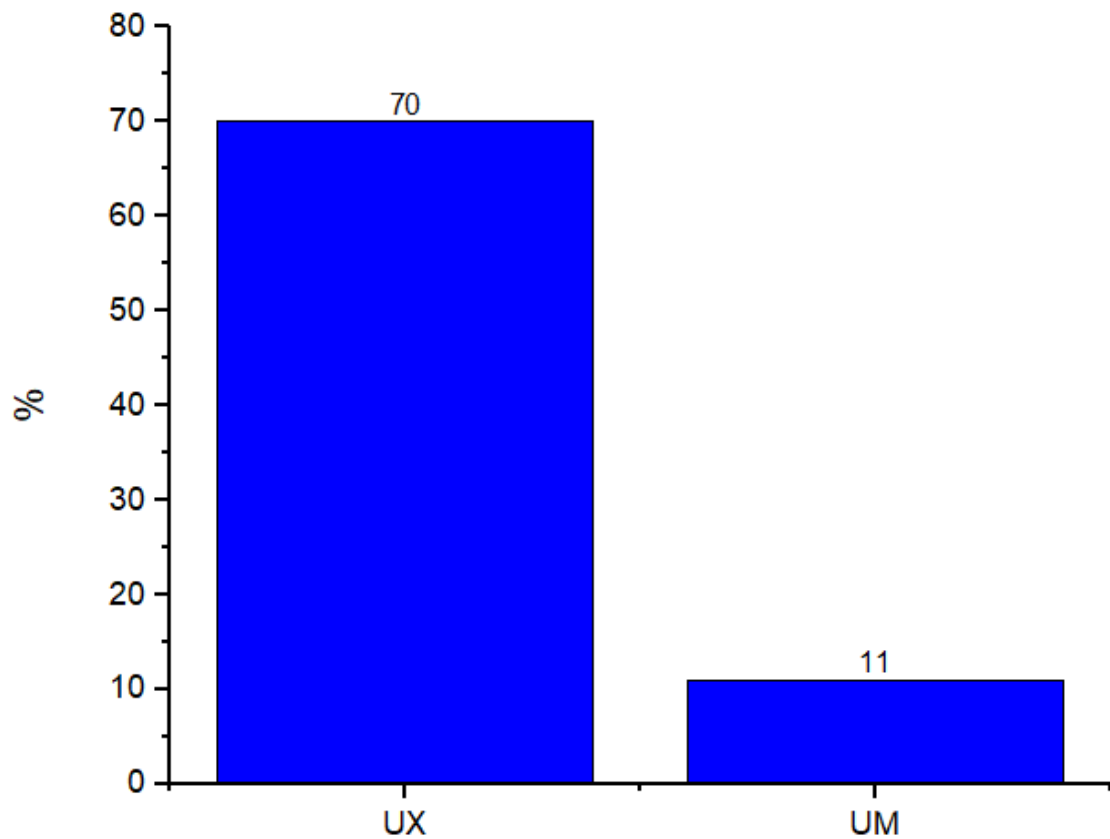


FIG. 3.28 : Résultat d'une analyse de hotspot (AIT OUMERACI 2020).

Le taux d'humidité dans les bacs est mesuré à l'aide de l'appareil MAC 50/1 (Figure3.29). Un échantillon est prélevé dans le bac et l'appareil détermine le taux d'humidité. Ensuite, la quantité d'eau à ajouter est déterminée en utilisant la formule mentionné ci-dessous.

$$\frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 = W \quad (3.12)$$

$$W = \frac{E}{P_s} \quad (3.13)$$

- P_h : Poids du matériaux humide.
- P_s : Poids du matériaux sec.
- W : Taux d'humidité.
- E : Poids d'eau dans le matériaux.



FIG. 3.29 : Appareil pour la mesure d'humidité.

Chaque semaine, un échantillon est prélevé de chaque bac afin de déterminer le pH, le potentiel redox, la température et le dénombrement bactérien (par la densité optique).

Les détails de ces mesures sont décrits dans le titre 5.3.4 , et les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre qui suit.

A la fin des essais une caractérisation détaillée de chaque bac est nécessaire afin d'obtenir les résultats.

3.5.2 Deuxième méthode

Dans cette expérience, les bactéries autochtones présentes dans nos échantillons ont été utilisées. La méthodologie suivante a été mise en œuvre :

Préparation des dilutions

Pour préparer les dilutions nécessaires, la procédure suivante a été suivie : dans un premier temps, un échantillon de 10 g a été préparé en dissolvant 4,25 g de NaCl dans 100 mL d'eau physiologique, préalablement dissous dans 500 mL d'eau distillée. Ensuite, l'échantillon a été agité à une température de 30°C pendant 30 minutes afin d'assurer une dissolution complète. Par la suite, une série de dilutions a été réalisée en prélevant 1 mL de l'échantillon et en ajoutant 9 mL d'eau physiologique, couvrant ainsi une gamme de dilutions allant de 10^{-1} à 10^{-20} . La (figure 3.30) illustre la procédure de dilution utilisée.



FIG. 3.30 : Préparation des dilutions.

Préparation du milieu nutritif (Figure3.31)

La préparation de la gélose a été effectuée en suivant les étapes suivantes : dans un premier temps, une pesée précise de 14 g de gélose et de 10,2 mL de gasoil (source de C) a été réalisée, puis les deux composants ont été placés dans un erlenmeyer. Ensuite, de l'eau distillée a été ajoutée progressivement jusqu'à ce que le volume total atteigne 500 mL. Le mélange a été agité et chauffé à une température de 105°C. Par la suite, la solution obtenue a été stérilisée en utilisant un autoclave à 121°C pendant 15min, comme illustré dans la Figure 3.32, pour assurer sa stérilité et la préparer pour la culture des micro-organismes.

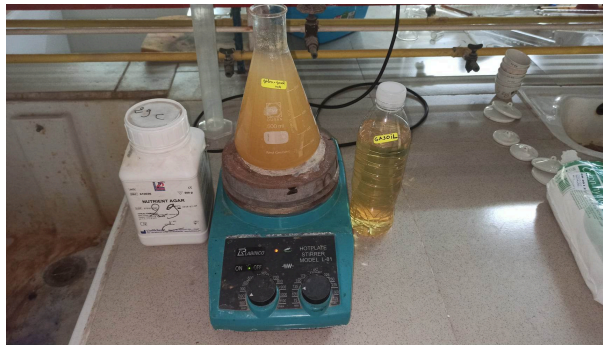


FIG. 3.31 : Préparation du milieu nutritif.



FIG. 3.32 : Autoclavage.

Préparation des boîtes de petri

Dans un environnement stérile et en utilisant un bec bunsen, la gélose a été versée dans chaque boîte de Petri de manière à couvrir uniformément le fond, comme illustré dans la (Figure 3.33). Ensuite, un volume de 0,1 mL de chaque échantillon a été prélevé et ensemencé dans chaque boîte de Petri, conformément à la (Figure 3.34). Cette opération a été répétée pour chaque boîte. Enfin, les boîtes de Petri ont été placées dans un incubateur à une température de 30°C pendant 48 heures, permettant ainsi le développement des bactéries, comme indiqué dans la (Figure 3.35).



FIG. 3.33 : Remplissage des boîtes de petri.



FIG. 3.34 : Ensemencement.



FIG. 3.35 : Incubation.

Incubation d'une souche bactérienne

Après la période d'incubation illustrée dans la (figure3.36), une souche bactérienne a été sélectionnée pour poursuivre les analyses à partir de la dilution 10^{-10} en utilisant un outil d'ensemencement. Cette souche sélectionnée a ensuite été ensemencée dans une boîte de Petri conformément aux instructions présentées dans la (figure3.34) . La boîte de Petri contenant la souche a été placée dans l'incubateur pendant 48 heures afin de permettre le développement ultérieur de la souche bactérienne. À la fin de l'incubation, nous avons prélevé la dernière ligne de la boîte de Petri (C) comme indiqué dans la (figure3.38).

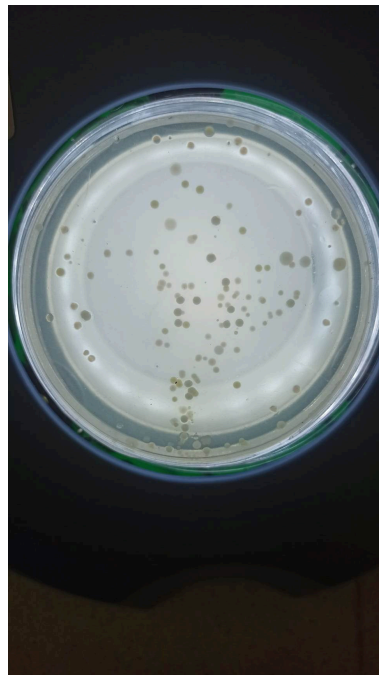


FIG. 3.36 : Les souches bactériennes après incubation de 48h.

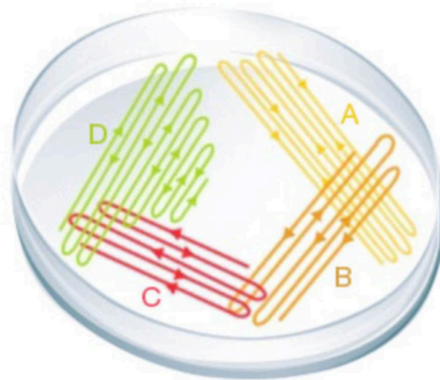


FIG. 3.37 : Ensemencement de la souche choisie.

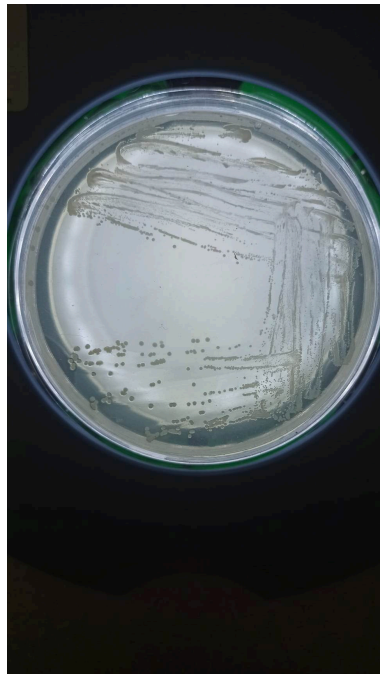


FIG. 3.38 : Incubation de la souche choisie.

Préparation du milieu LB

Pour préparer le milieu LB, le protocole indiqué dans le (Tableau 3.3) a été suivi. Une quantité de 500 mL de milieu LB a été préparée en respectant les différentes proportions des ingrédients requis. Après l'ajout des ingrédients, le milieu a été agité pour assurer une dissolution homogène, et son pH a été ajusté à 7, comme illustré dans la (Figure 3.40). Les bactéries obtenues précédemment ont ensuite été prélevées et ajoutées au milieu LB, en veillant à un mélange minutieux du milieu et des bactéries.

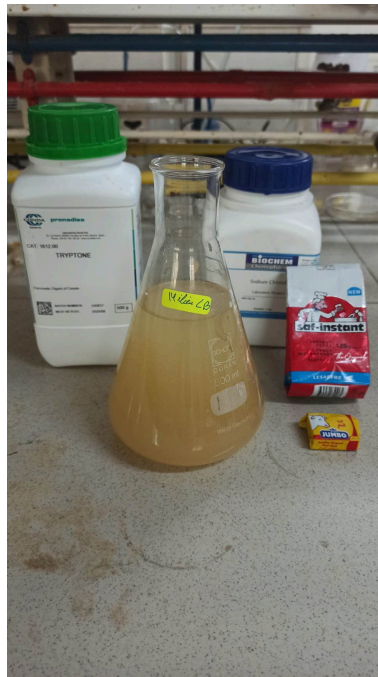


FIG. 3.39 : Préparation du milieu LB.

Composition	Tryptone	Extrait de levure	Extrait de boeuf	NaCl
Quantité(g)	10	2	1	5

TAB. 3.3 : Préparation pour 1L de milieu LB



FIG. 3.40 : Milieu LB.

Lancement de l'essai

Afin de démarrer l'essai, une préparation de 500 mL a été réalisée pour chaque échantillon dans un bac dédié. Par la suite, 100 mL du milieu LB préparé antérieurement, contenant les bactéries sélectionnées, ont été ajoutés à chaque échantillon. Un mélange soigneux de chaque échantillon a été effectué afin d'assurer une répartition uniforme des bactéries dans le milieu, comme illustré dans la (Figure 3.41) et la (Figure 3.42).



FIG. 3.41 : Bac de l'échantillon 1.



FIG. 3.42 : Bac de l'échantillon 1.

Le suivi de cette méthode est identique à celui de la première méthode sauf qu'il faut ajuster avec le milieu LB au lieu de l'eau du robinet.

Les résultats sont présentés dans le chapitre suivant.

3.5.3 Troisième méthode

Au cours de cette étude, des bactéries acidophiles ont été utilisées et incubées dans un minerai acide provenant de la mine de Kef Oum Tboul. La méthodologie suivante a été suivie :

Préparation du minerai KOT

Pour préparer le minerai KOT, deux étapes ont été suivies. La première consistait à concasser et broyer le minerai pour obtenir une granulométrie inférieure à 200 μ m, ce qui permettait d'obtenir une taille uniforme des particules. Ensuite, le pH du minerai a été mesuré et s'est révélé être de 2,82 (Figure 3.43).

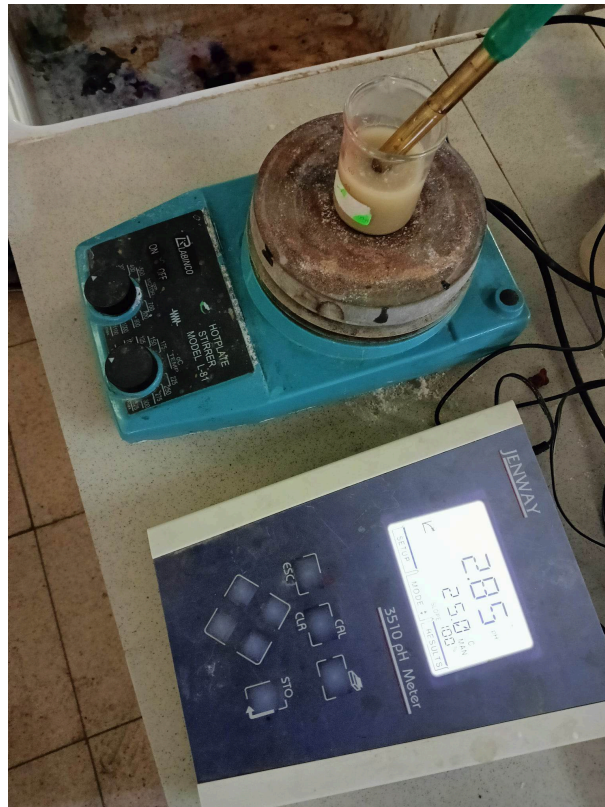


FIG. 3.43 : Mesure de pH du KOT.

Préparation du milieu de culture 9k pour l'isolement des bactéries

Pour préparer le milieu de culture 9k utilisé pour l'isolement des bactéries acidophiles, plusieurs étapes ont été suivies. Dans un premier temps, un Erlenmeyer d'un litre a été rempli avec 500 mL d'eau distillée. Ensuite, tous les composants nécessaires, tels que spécifiés dans le (Tableau 3.4), ont été ajoutés, à l'exception des sulfates de fer, puis le mélange a été stérilisé à l'autoclave à 121°C pendant 15min. Parallèlement, dans un autre Erlenmeyer, la quantité requise de sulfate de fer a été dissoute dans 500 mL d'eau distillée, puis la solution $FeSO_4$ a été filtrée à l'aide d'un filtre seringue de 0.45 μ m (Figure 3.44). Ensuite, les deux solutions obtenues ont été mélangées et le pH de la solution résultante a été ajusté à l'aide d'acide sulfurique 10N. En suivant ces étapes, le milieu de culture 9k a été préparé dans des conditions stériles et équilibrées, prêt à être utilisé pour l'isolement des bactéries dans l'étude.

Sels	$(NH_4)_2SO_4$	KH_2PO_4	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	KCl	$Ca(NO_3)_2$	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	pH
C en (g/l)	3	0.5	0.5	0.1	0.01	44.2	1.8

TAB. 3.4 : Composition chimique du milieu 9K (SILVERMAN et al. 1959).

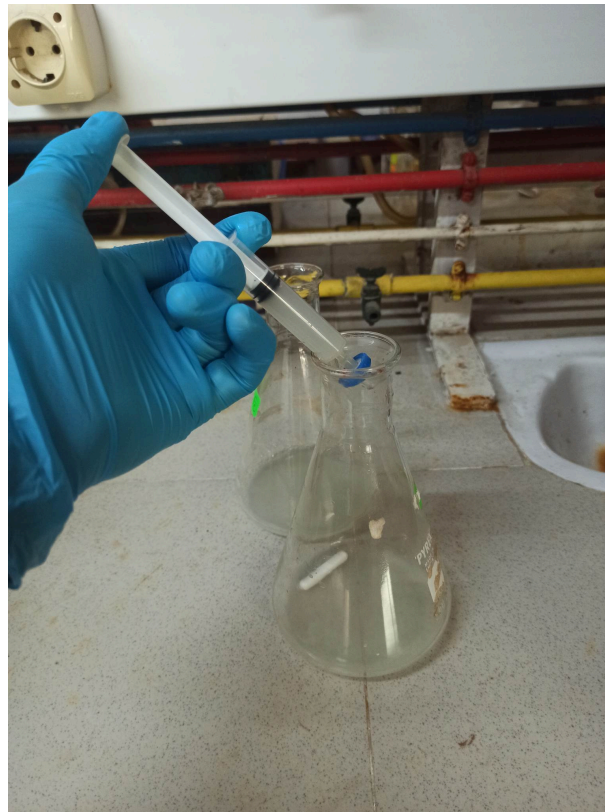


FIG. 3.44 : Filtration du Fer.

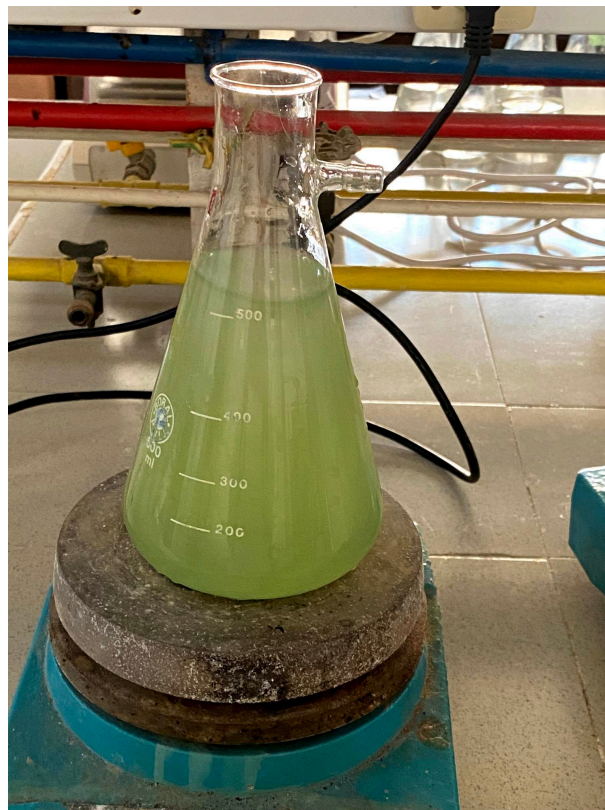


FIG. 3.45 : Milieu 9k.

Isolement des bactéries

Pour l'isolement des bactéries, les étapes suivantes ont été suivies. Dans un Erlenmeyer, un mélange de 90 mL du milieu 9K et de 10 g de l'échantillon KOT a été préparé. Ce

mélange a été placé sous agitation à 160 rpm à une température de 30°C (Figure 3.46). Des mesures quotidiennes de pH, de potentiel redox, d'oxygène dissous et de densité optique ont été effectuées pour évaluer la quantité de bactéries présentes. Les résultats de ces mesures ont été analysés pour déterminer la phase exponentielle de croissance des bactéries.

Après 11 jours, des modifications significatives des paramètres mesurés ont été observées, ce qui indique que les bactéries sont en phase exponentielle de croissance. Ces résultats témoignent du développement et de la multiplication des bactéries dans le milieu de culture 9K à partir de l'échantillon KOT, confirmant ainsi la présence de microorganismes actifs dans cette étude.



FIG. 3.46 : Incubation des bactéries acidophiles.

Lancement des essais

Pour initier les expériences, les étapes suivantes ont été suivies. Tout d'abord, le mélange a été soumis à une centrifugation (Figure 3.47) pendant 30 minutes à une vitesse de rotation de 3600 rpm afin de recueillir le culot. Ce dernier, a été ajouté à un erlenmeyer contenant 100 ml du milieu 9K. La solution a été incubée à une température de 30°C pendant 30 minutes, puis filtrée pour obtenir une taille de particules inférieure à 0,45 micron. Par la suite, dans un autre erlenmeyer, 5 ml du filtrat récupéré ont été mélangés avec 10 g de l'échantillon et 100 ml du milieu 9K. Le mélange a été agité à une vitesse de

rotation de 160 rpm à une température de 30°C (Figure3.49). Ces étapes permettent de préparer le milieu de culture et de maintenir des conditions favorables à la croissance des bactéries dans cette étude.



FIG. 3.47 : Centrifugation.

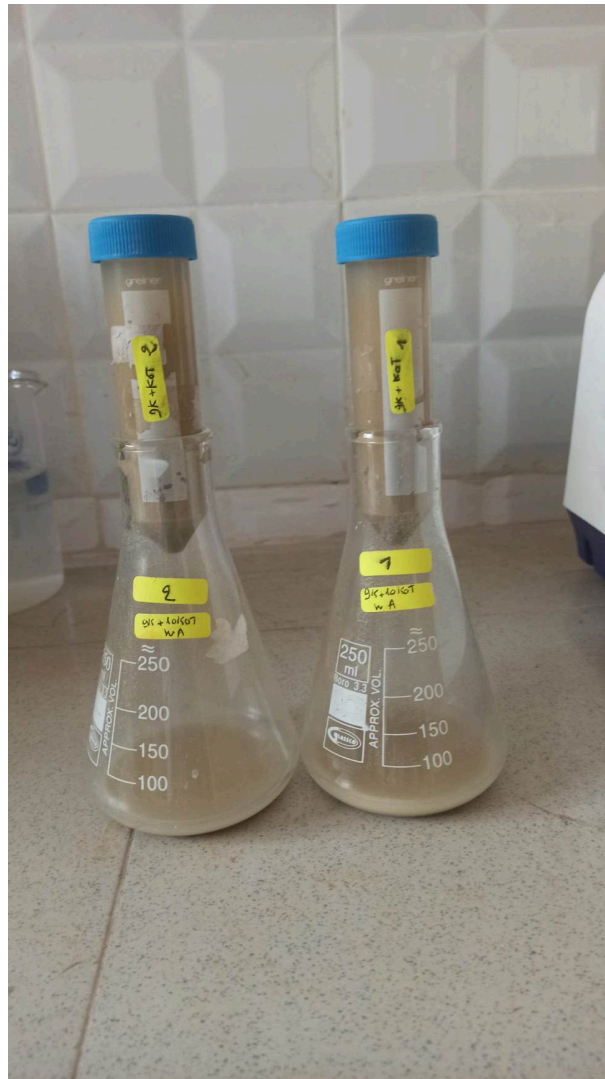


FIG. 3.48 : Le passage à la centrifugeuse.



FIG. 3.49 : Lancement de l'essai.

Suivi de l'essai

Pour assurer le suivi de l'essai, différentes mesures ont été réalisées chaque 24 heures, comprenant le pH, le potentiel redox et la densité optique. Ces mesures permettent de surveiller l'évolution des paramètres dans le milieu de culture et d'évaluer la croissance des bactéries. À la fin de l'essai, une caractérisation approfondie sera effectuée pour analyser les résultats obtenus, évaluer l'efficacité de l'expérience et tirer des conclusions significatives. Les résultats complets de ces mesures et de la caractérisation seront présentés dans le chapitre suivant de notre étude, fournissant ainsi une analyse détaillée de notre essai.

3.6 Conclusion

Grâce aux outils et aux procédures exposés dans ce chapitre, une caractérisation approfondie de nos échantillons a été réalisée, accompagnée de mesures essentielles permettant d'évaluer leur composition et leur niveau de contamination. De plus, les choix méthodologiques qui ont guidé notre travail ont été exposés, notamment les méthodes de bioremédiation employées, à savoir le landfarming, les bactéries autochtones et les bactéries allochtones. Ces méthodes ont été sélectionnées en fonction de leur pertinence et de leur applicabilité pour atteindre notre objectif de décontamination.

Chapitre 4

Résultats et Interprétation

4.1 Introduction

Le chapitre des résultats et de l'interprétation joue un rôle central dans la compréhension globale de notre projet de recherche. En examinant attentivement les données collectées, nous pourrions tirer des conclusions solides et formuler des recommandations pour l'amélioration des pratiques de réduction des polluants dans les déblais de forage pétrolier.

4.2 Résultats de la caractérisation physique et chimique des échantillons avant traitement

Echantillon	1	2
Teneur en eau (%)	3,88	2,56
pH	6,9	6,22
Potentiel redox (mV)	46	70,6
Distillation (%)	eau (4,49) huile (14,57) solide (80,94)	eau (4,49) huile (4,43) solide (91,08)
TPH (g/kg)	107,22	34,66
Phosphore (Ppm)	24	22
Calcium (Ppm)	135	275
Potassium (Ppm)	30	30
Sodium (Ppm)	53	160
Fer (Ppm)	1,901	1,848
Cuivre (Ppm)	1,1	1,109
Nickel (Ppm)	1,506	1,465

TAB. 4.1 : Caractérisation de l'échantillon 1 et 2

Le tableau présenté ci-dessus expose les résultats des analyses physico-chimiques des échantillons collectés à Hassi Messaoud. Pour le premier échantillon, le taux de TPH s'élève à 107,22 g/Kg, dépassant ainsi la norme algérienne de 20 g/Kg. De même, pour l'échantillon 2 prélevé après le traitement au Verti-G, la valeur de TPH atteint 34,66 g/Kg.

En outre, la concentration en sels est également significative, ce phénomène étant attribué à la salinité des fluides de forage ou à la composition même de la formation géologique.

4.2.1 Résultats des analyses complémentaire par XRF

Echantillon	1(%)	2(%)
Perte au feu	21,57	20,43
SiO ₂	36,98	28,44
Al ₂ O ₃	11,51	8,55
Fe ₂ O ₃	5,1	3,92
CaO	12,23	22,49
MgO	6,33	5,4
SO ₃	0,85	5,93
K ₂ O	3,68	2,32
Na ₂ O	1,12	1,88
P ₂ O ₅	0,06	0,11
TiO ₂	0,57	0,53

TAB. 4.2 : Résultats de la XRF

Les résultats de l'analyse XRF des échantillons prélevés à HMD révèlent une composition chimique principalement siliceuse, avec des taux de 37% et 28% respectivement. Ces résultats sont cohérents avec les analyses antérieures réalisées en 2006 par (DAMOU 2007 ; KHODJA 2008). De plus, on observe une présence relativement importante d'oxyde de calcium dans les échantillons.

Les analyses confirment également la présence d'une teneur significative d'oxyde d'aluminium, avec des pourcentages de 11,51% et 8,55%. De plus, une teneur en oxyde de fer de l'ordre de 5% et 3,98% est détectée, bien que ces valeurs restent inférieures aux normes fixées par le gouvernement algérien.

4.3 Présentation et interprétation des résultats relatifs aux développement des microorganismes

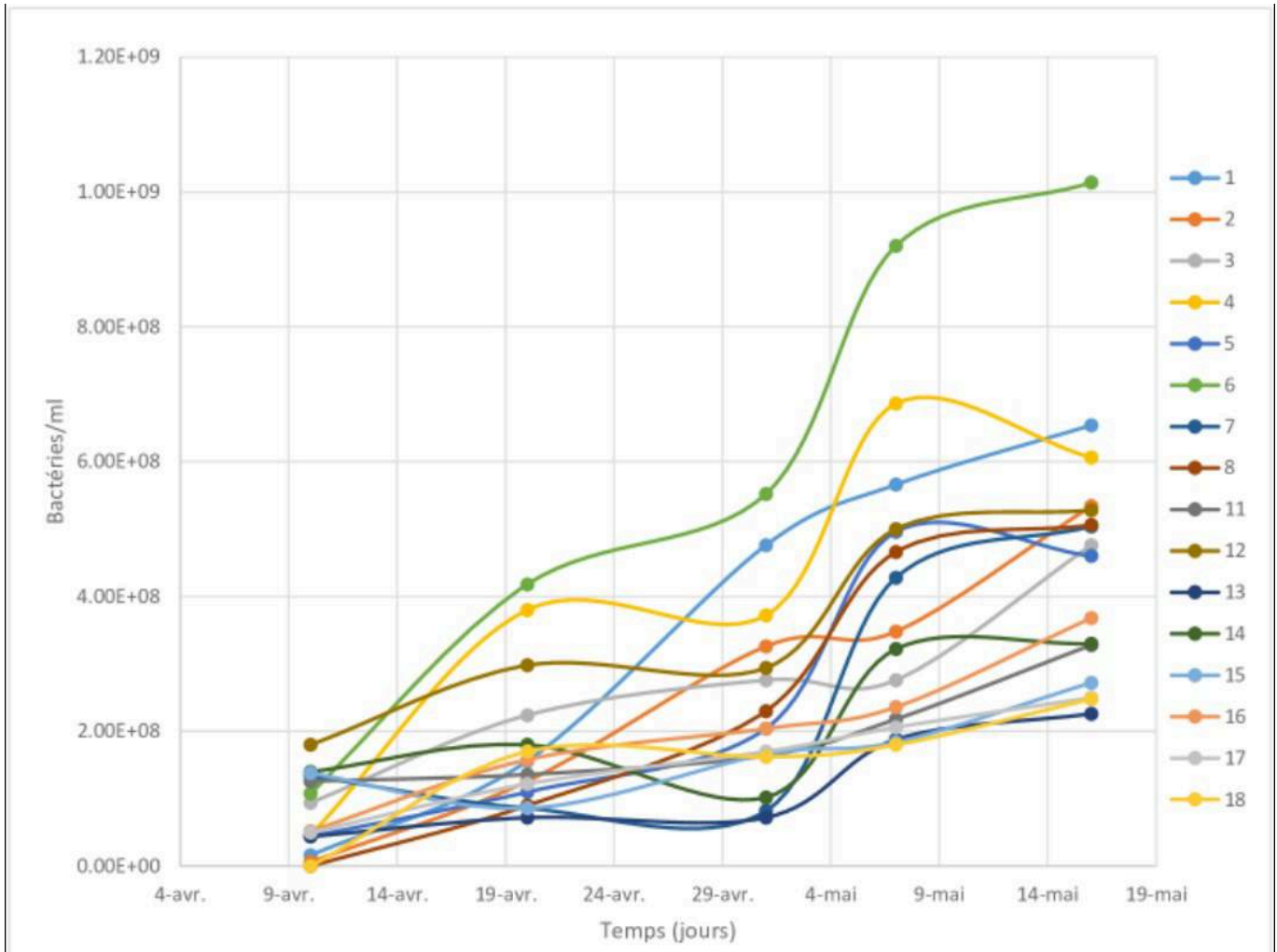


FIG. 4.1 : Résultats du dénombrement bactérien.

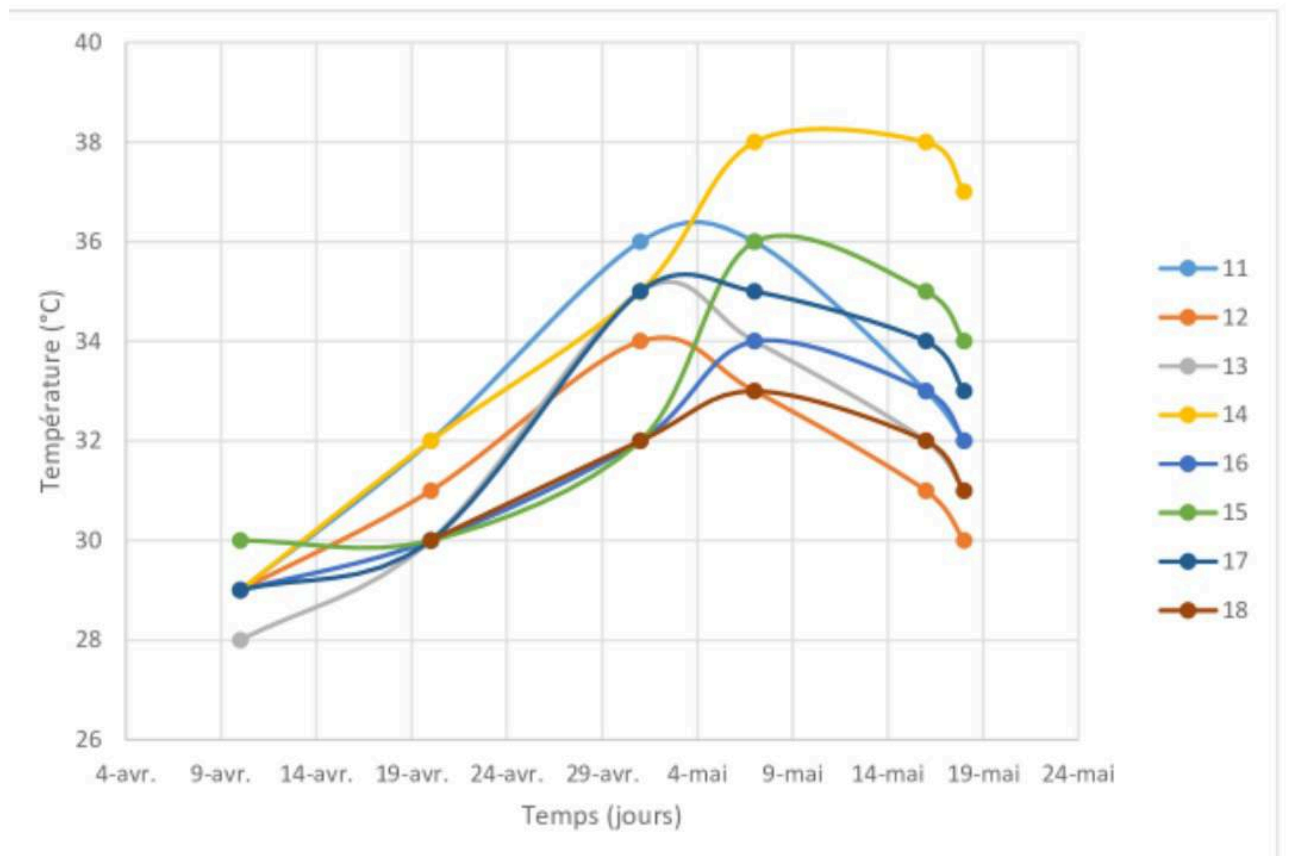
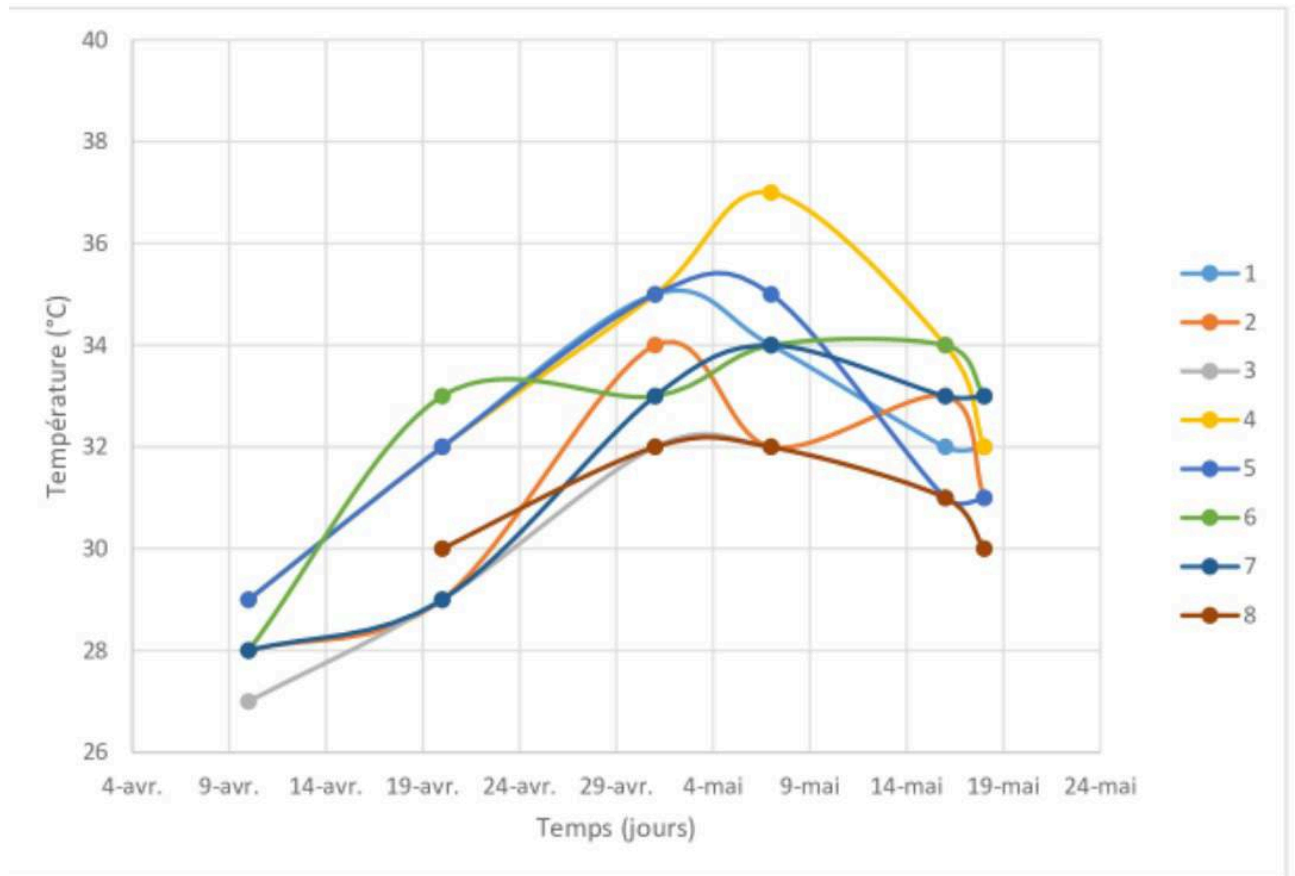


FIG. 4.2 : Suivi de la température sur les bacs.

Les résultats obtenus du dénombrement bactérien montrent une augmentation de la biomasse dans tous les bacs pendant les 48 jours de l'essai, passant d'une valeur initiale de 6×10^6 bactéries/ml à une valeur de 10^9 bactéries/ml. Cette augmentation est attribuée à la présence de nutriments, tels que le phosphore (Figure 4.9), qui parvient des mélanges ajoutés. Cette observation est en accord avec les recherches de (ATAGANA 2008 ; AMIR et al. 2005). On note cependant l'absence de la phase de latence des bactéries, ce qui peut être attribué au fait que les bactéries utilisées dans la bioremédiation sont des bactéries du sol lui-même.

Les courbes de croissance montrent que la concentration microbienne dans le traitement biologique augmente jusqu'à atteindre des valeurs maximales atteignant 10^9 Bactéries/mL après 40 jours. Cette augmentation correspond à la phase exponentielle, au cours de laquelle la dissolution du substrat (hydrocarbure) et les nutriments ajoutés répondent aux besoins métaboliques.

Les résultats confirment une corrélation positive entre la concentration des hydrocarbures et la présence d'une microflore importante, ce qui est en accord avec les observations d'(ATLAS et al. 1992) qui ont noté une augmentation de la population microbienne après l'apport d'hydrocarbures dans le sol. L'importance de la microflore autochtone du sol suggère sa capacité à assurer la biodégradation des hydrocarbures, avec une concentration minimale de 10^6 germes par gramme de sol selon (MARGESIN et al. 2001). Ces résultats indiquent que les échantillons étudiés pourraient être traités par des procédés biologiques en utilisant les microorganismes déjà présents, bien que cela puisse prendre un certain temps, environ 5 mois selon (KHODJA 2008).

De plus, une augmentation de la température est observée, passant de 29°C à 38°C dans certains bacs. Exemple : bacs N°4 et N°14 (fumier). Cette variation de température est influencée par l'intensité métabolique des microorganismes, les nutriments et l'humidité. Cependant, le gradient de changement de température dans le bac contenant les bactéries autochtones est moins important que dans les autres bacs, probablement en raison de l'absence de nutriments nécessaires (azote et phosphore) au développement de la biomasse.

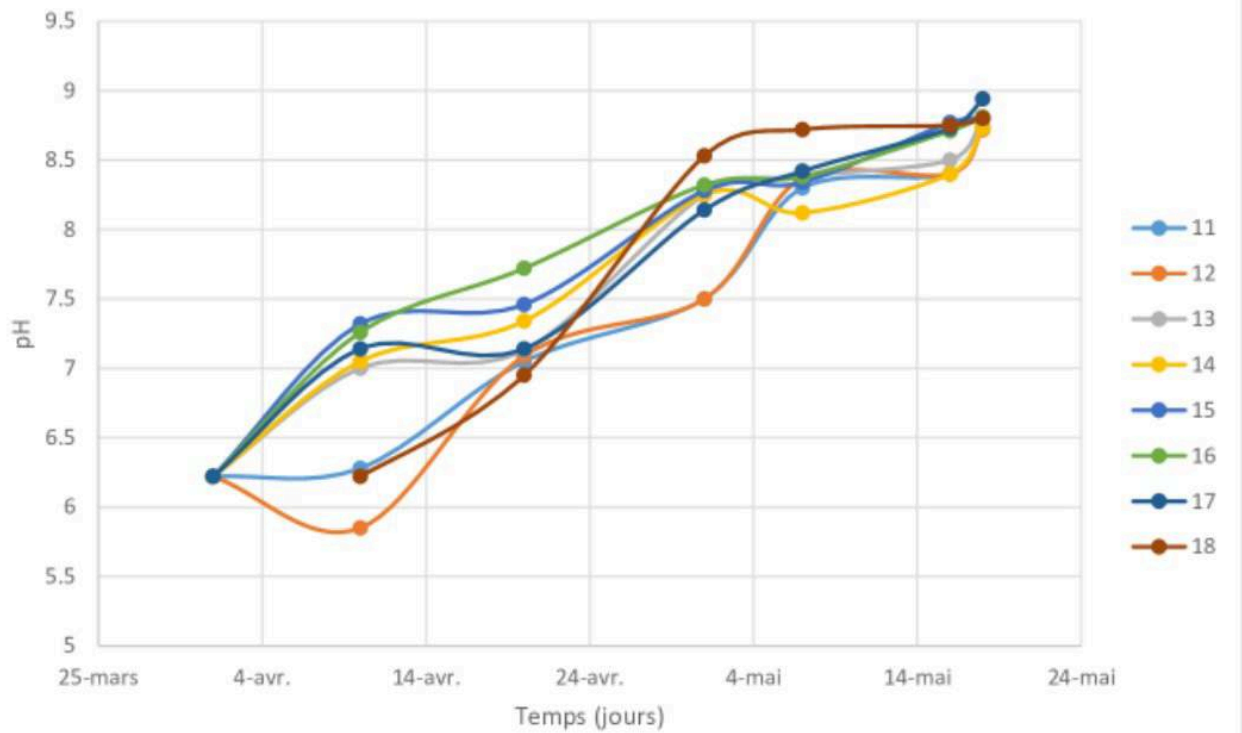
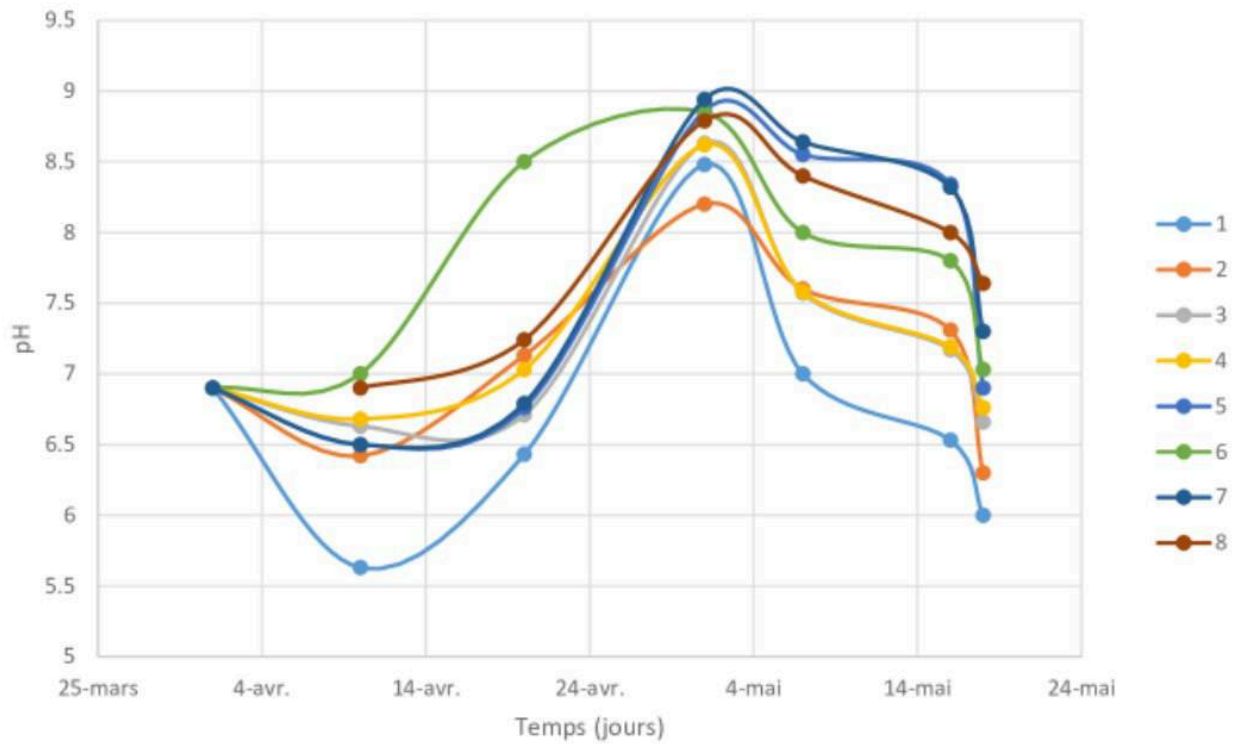


FIG. 4.3 : Résultats du suivie du pH dans les bacs.

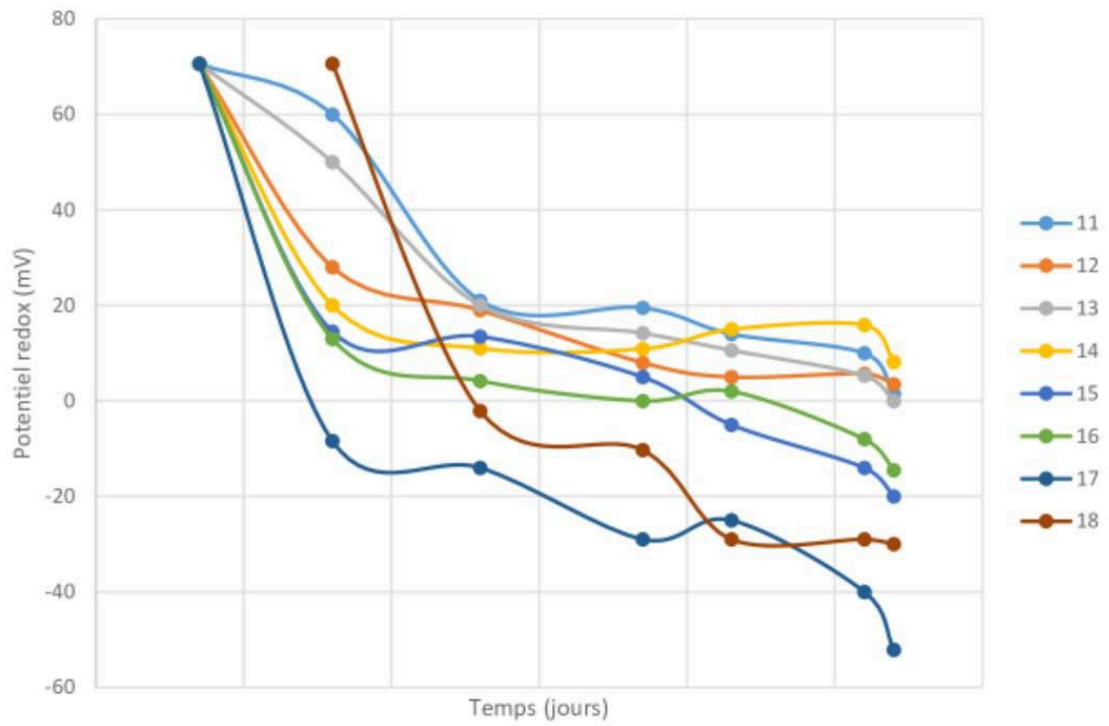
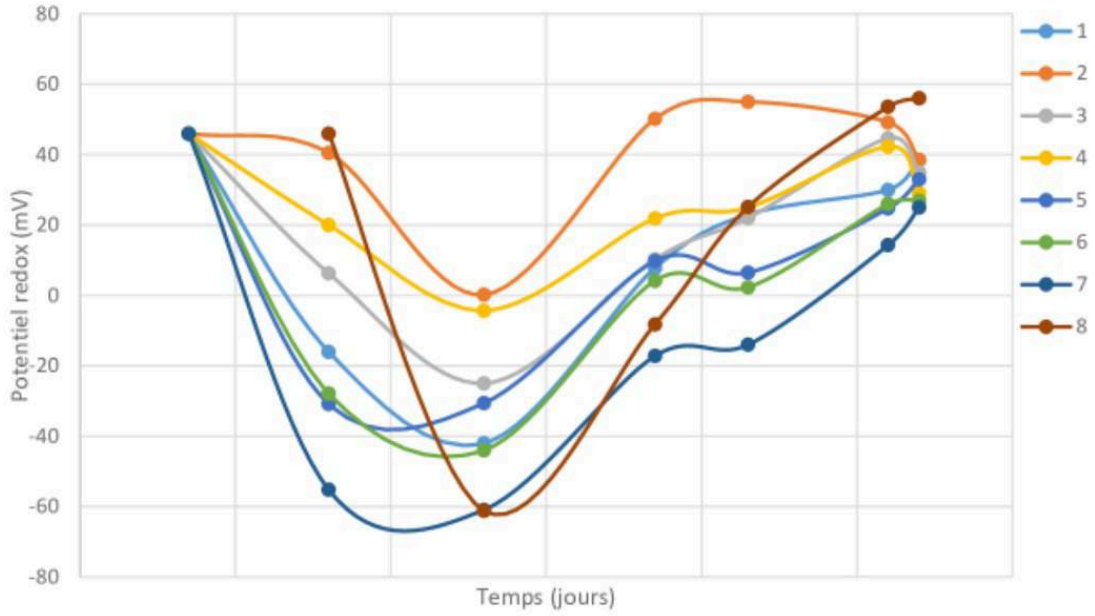


FIG. 4.4 : Résultats du suivi du potentiel redox dans les bacs.

Les courbes obtenues lors des mesures du pH ont révélé une variation allant de 5,5 à 9. Ce changement de pH est dû à divers facteurs, notamment les processus biologiques et l'activité des bactéries hétérotrophes (FOKOU MBOGNE 2017), qui se développent mieux à un pH alcalin qui oscille entre 5,5 à 9.

Il est intéressant de noter que cette variation correspond également à la réglementation algérienne concernant le pH dans le sol, qui est comprise entre 5,5 et 9. Quant aux courbes donnant l'évolution du potentiel d'oxydoréduction au cours du temps, elles présentent une corrélation avec la variation du pH dans les bacs (entre -50 mV et 70 mV), car ces deux paramètres sont inversement proportionnels.

Cette relation inverse entre le pH et le potentiel redox indique l'interaction complexe entre les processus chimiques et biologiques qui influencent ces mesures. Ces résultats soulignent l'importance de surveiller et de contrôler le pH dans les systèmes environnementaux, car il joue un rôle clé dans les processus biologiques et peut avoir un impact significatif sur la santé des écosystèmes.

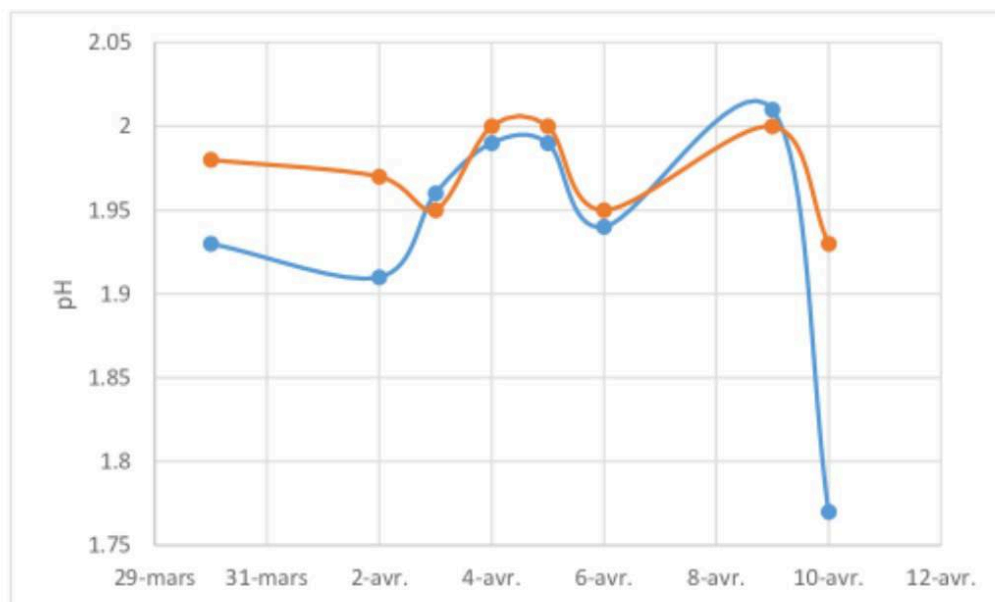


FIG. 4.5 : Résultats lors de l'isolement des bactéries.

Au cours des 4 premiers jours, le pH diminue graduellement pour la souche bactérienne 1 allant d'un pH initial de 6.9, il heurte une valeur minimale de 2.81 au 4ème jour. Pour la souche bactérienne 2, le pH initial est de 6.22. Ce dernier diminue lors des 4 premiers jours jusqu'à atteindre un pH minimal de 1,76. La diminution du pH est liée à l'acide sulfurique généré par les bactéries acidophyles après l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique.

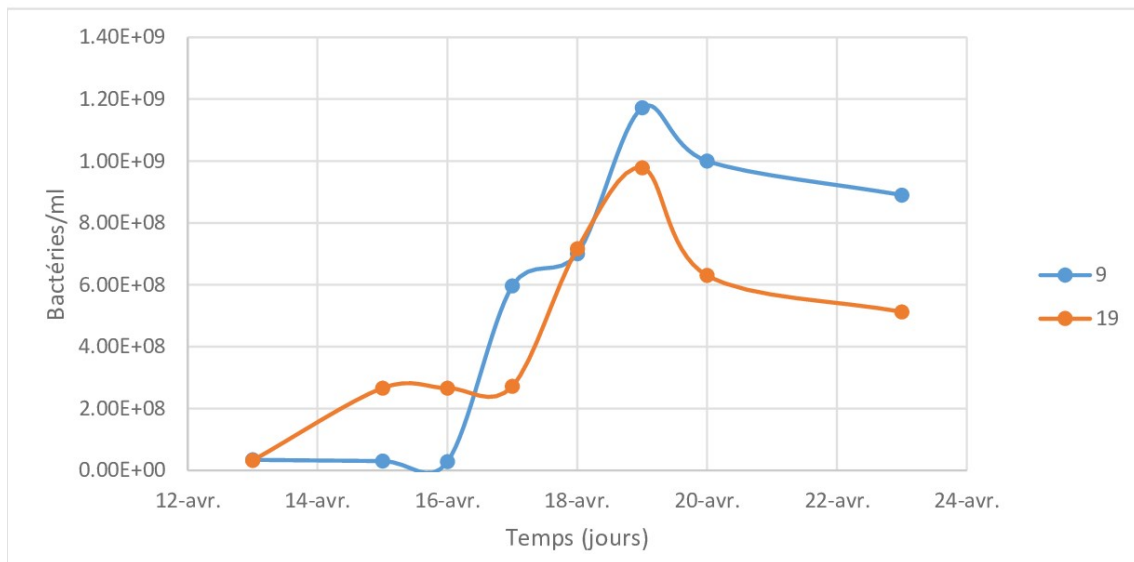
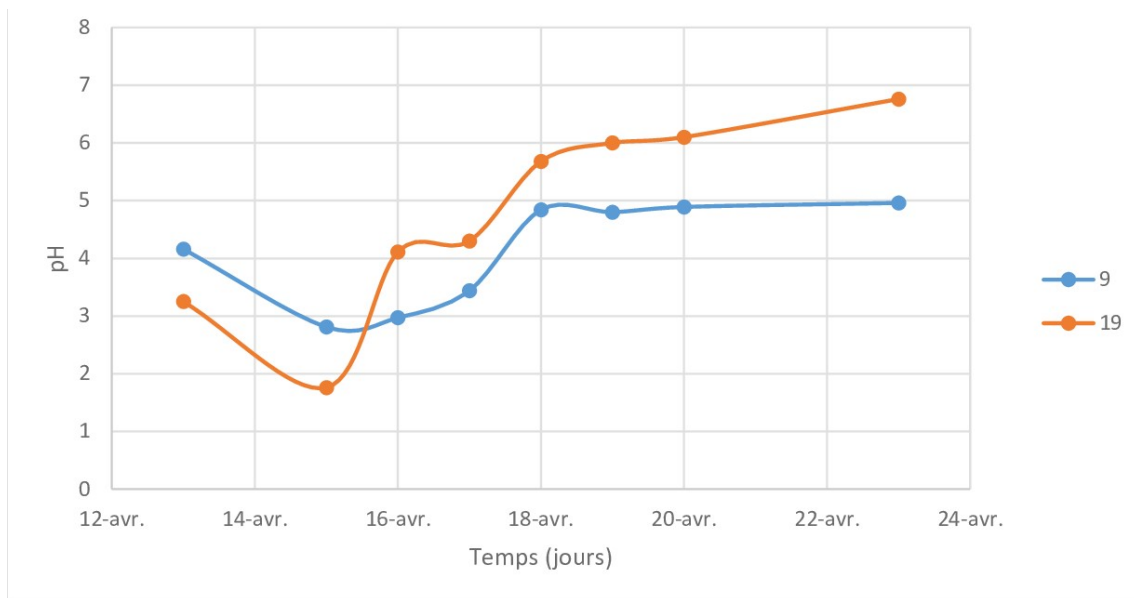


FIG. 4.6 : Résultats du suivie dans l'essais 9 et 19 (Bactéries acidophiles).

Les essais 9 et 19 ont été menés pour évaluer l'efficacité et le comportement des bactéries acidophiles, en particulier la bactérie *Bacillus ferrooxidans*, qui oxyde le fer ferreux en fer ferrique, produisant ainsi de l'acide sulfurique (H_2SO_4). Cela entraîne une baisse du pH.

Le nombre de bactéries est stable pour les 2 essais durant les 3 premiers jours correspondant à la phase de latence de la croissance bactérienne, suivie d'une phase d'augmentation exponentielle atteignant 1.17×10^9 bactéries/mL pour l'essai 9, et 9.78×10^8 bactéries/mL pour l'essai 19.

4.4 Présentation et interprétation des résultats relatifs aux Hydrocarbures

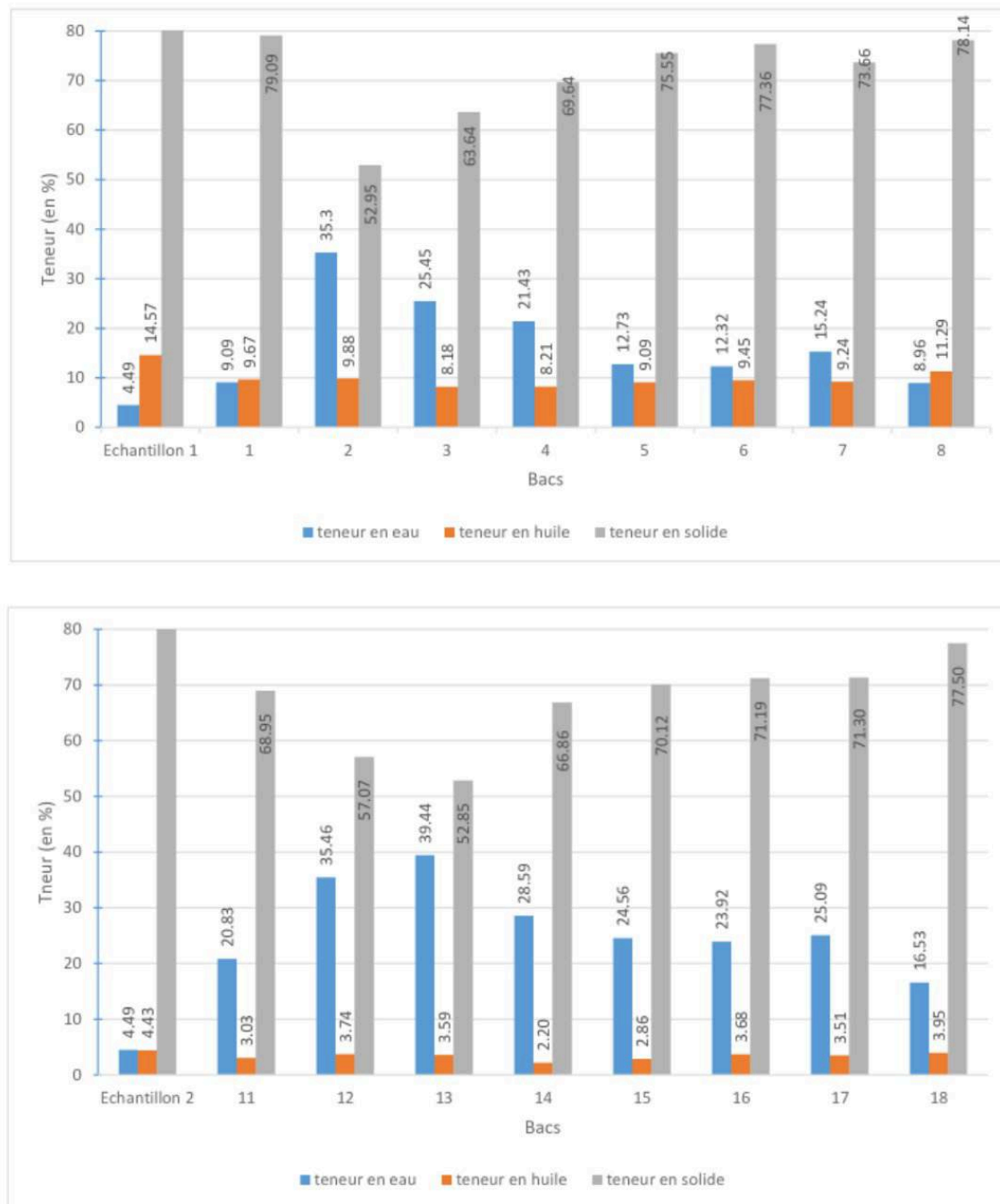


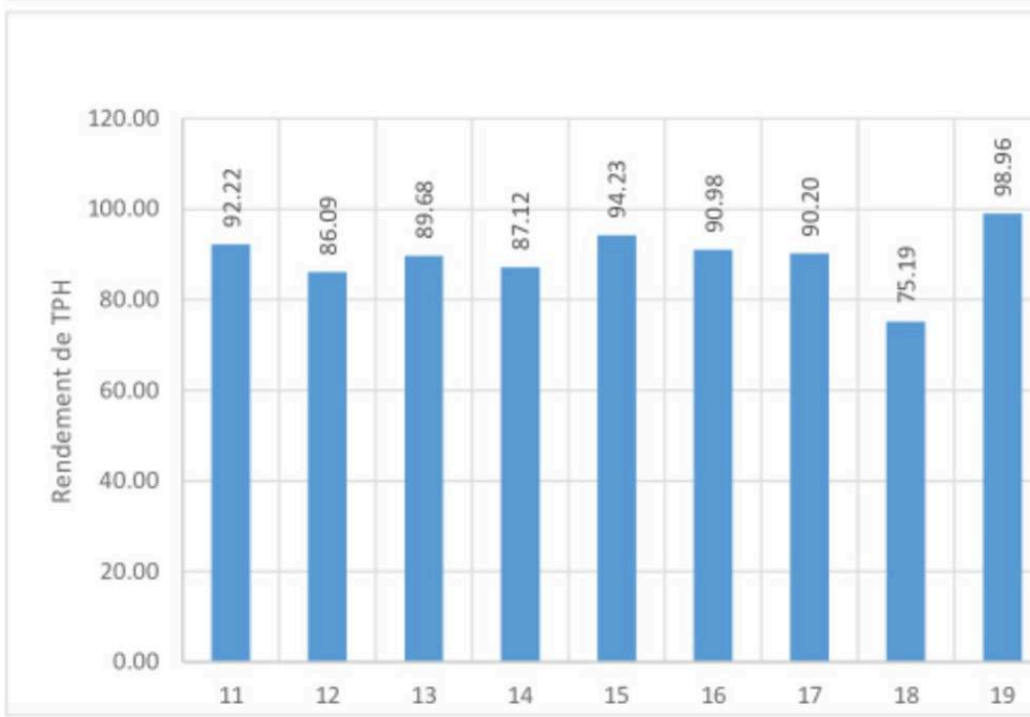
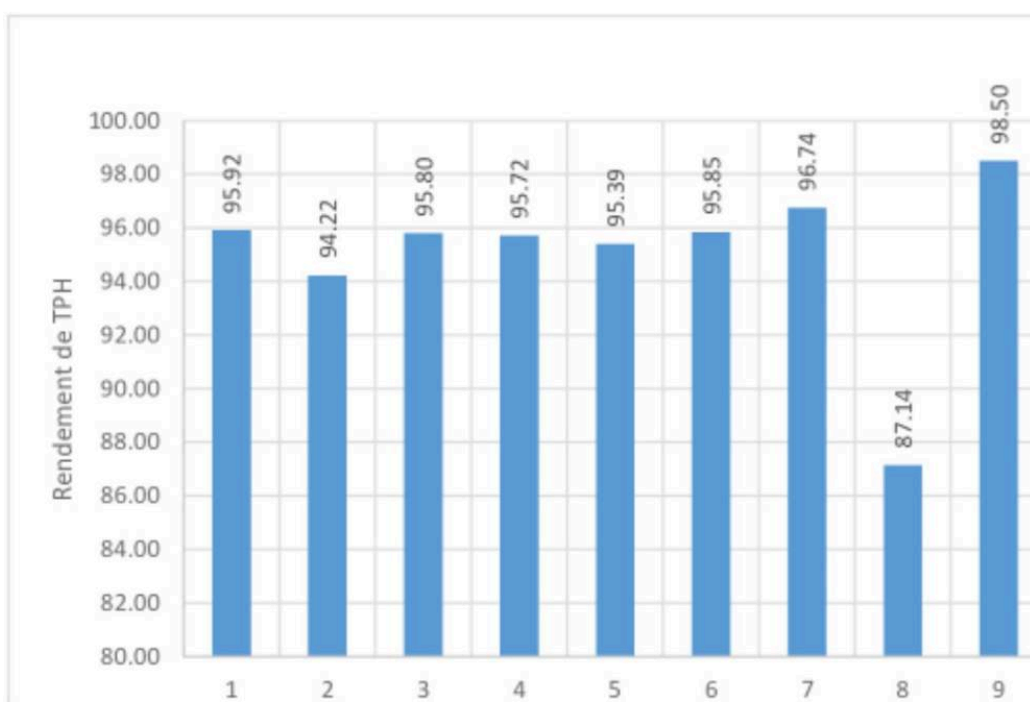
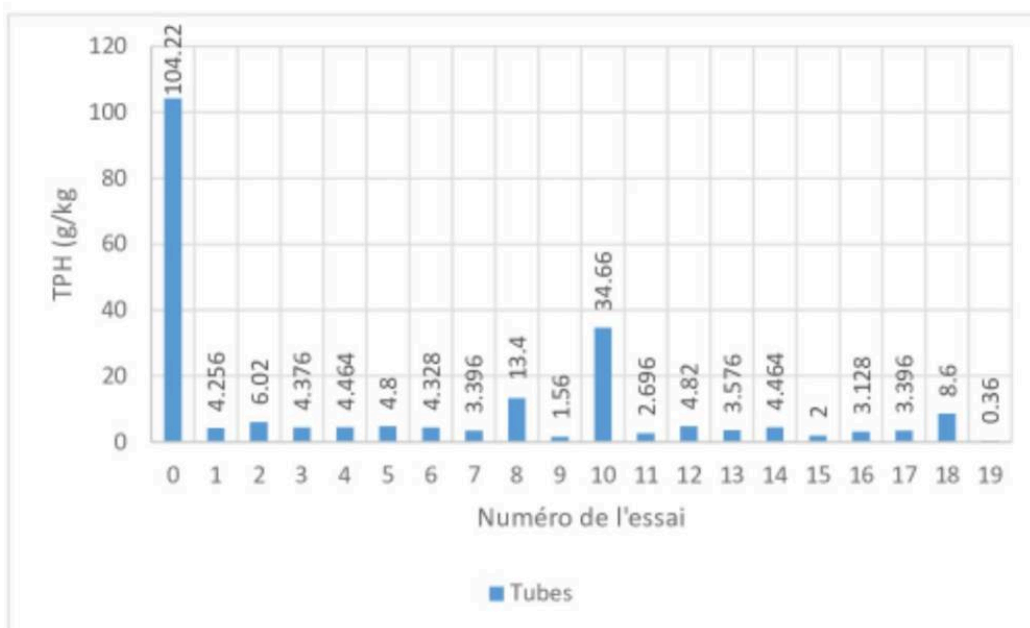
FIG. 4.7 : Résultats de la distillation.

D'après la Figure 4.7, nous avons observé une diminution du taux d'huile dans les bacs, parallèlement à une augmentation du taux d'eau. Ces observations sont en accord avec les travaux de (KHODJA 2008) qui ont souligné que, en plus de la biodégradation aérobie, il existe une biodégradation anaérobie qui est plus lente. Dans ce processus, les hydrocarbures peuvent subir une série de modifications telles que la photo-oxydation, l'évaporation, la solubilisation, l'émulsion et la décantation.

Dans la Figure 4.10, on remarque une diminution significative des hydrocarbures, atteignant une valeur presque nulle pour l'essai des bactéries acidophiles. Tous les résultats des essais sont inférieurs au seuil fixé par l'État algérien, qui est de 20 g/kg.

Afin d'interpréter la divergence entre les résultats du distillateur et du TPH, il serait nécessaire de se pencher davantage sur le mécanisme de dégradation des hydrocarbures par les microorganismes. Certains d'entre eux développent un système de signalisation, appelé chimiotactisme, qui favorise l'accès aux hydrocarbures polaires (SAMANTA et al. 2002). Le chimiotactisme permet aux microorganismes de se déplacer vers les zones du sol où les polluants sont moins accessibles. Les microorganismes s'accumulent alors à l'interface entre le polluant hydrophobe et le milieu hydrophile, ce qui entraîne une augmentation du taux de dégradation des composés et souvent une augmentation de leur désorption (LAW et al. 2003). D'autres microorganismes, en revanche, ont la capacité de s'adsorber aux particules riches en polluants organiques grâce à leur paroi hydrophobe et de former des biofilms ou des biosurfactants. Les biosurfactants ont la propriété d'augmenter la solubilité des composés hydrophobes et d'améliorer leur accessibilité.

En outre, la présence de matériaux dans les bacs de mélange, tels que l'argile ou la sciure de bois, qui ont un fort pouvoir d'adsorption, a favorisé l'adsorption des hydrocarbures à leur surface. Cette hypothèse a été confirmée en comparant les bacs 5 et 15 contenant de l'argile activée et du terreau, et les bacs 6 et 16 contenant de l'argile non activée et du terreau. L'argile activée possède une surface spécifique plus grande que l'argile non activée ($<100\text{m}^2/\text{g}$), ce qui lui confère un pouvoir d'adsorption plus élevé. Cette théorie est en accord avec les résultats obtenus, car on observe que le bac contenant de l'argile activée a mieux adsorbé les hydrocarbures.



Avant de commencer le traitement, les concentrations de TPH étaient de 104 g/kg (pour l'échantillon 1), ce qui correspond à 5 fois la norme algérienne, et de 34 g/kg (pour l'échantillon 2), soit 2 fois la norme algérienne. Ces valeurs ont diminué progressivement au cours de la période d'essai dans les différents bacs.

En comparant les rendements d'élimination des hydrocarbures, on constate que l'essai utilisant les bactéries acidophiles a donné les meilleurs résultats, avec un rendement de 98,5% pour l'échantillon 1 et de 98,6% pour l'échantillon 2.

Les bacs de mélange ont également montré des rendements élevés, avec un taux record de 96% dans le bac 7 (contenant des cendres de bois) et un taux minimal de 87% dans le bac 14 (contenant du fumier de vache et de volaille). Cependant, les essais 8 et 18 (utilisant les bactéries autochtones) ont montré des rendements inférieurs, avec un taux de 75% dans le bac 18 et un taux de 87% dans le bac 8.

Ces résultats confirment l'efficacité de l'utilisation de la méthode biologique pour le traitement des déblais contaminés par les hydrocarbures.

4.5 Présentation et interprétation des résultats relatifs aux analyses en éléments complémentaire

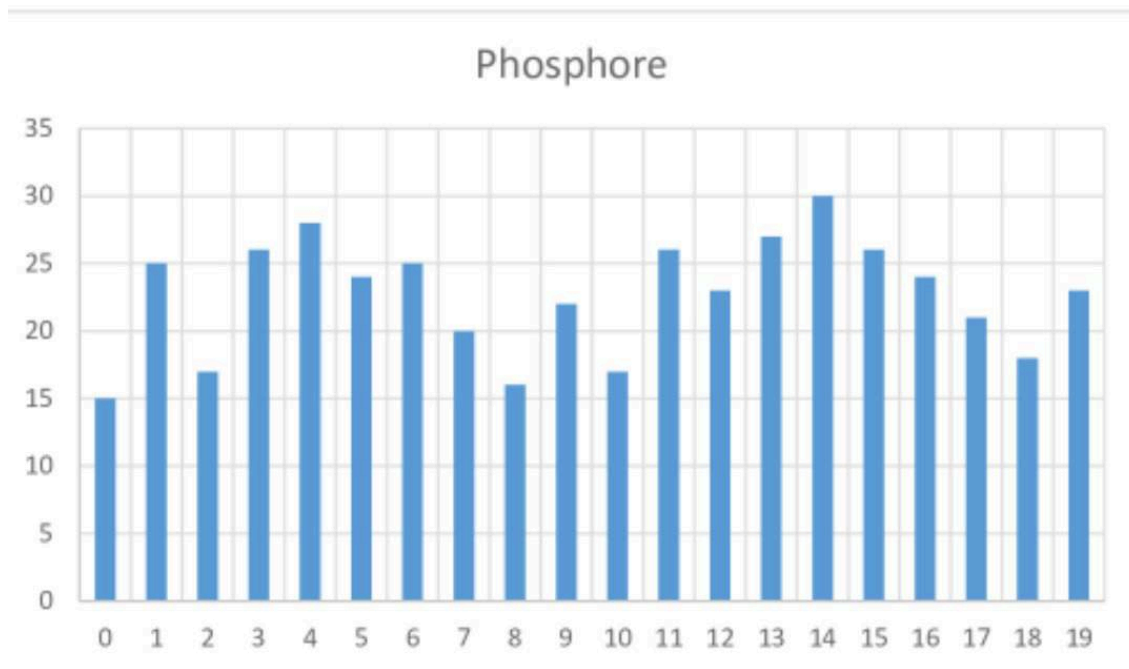


FIG. 4.9 : Résultats de l'analyse du Phosphore.

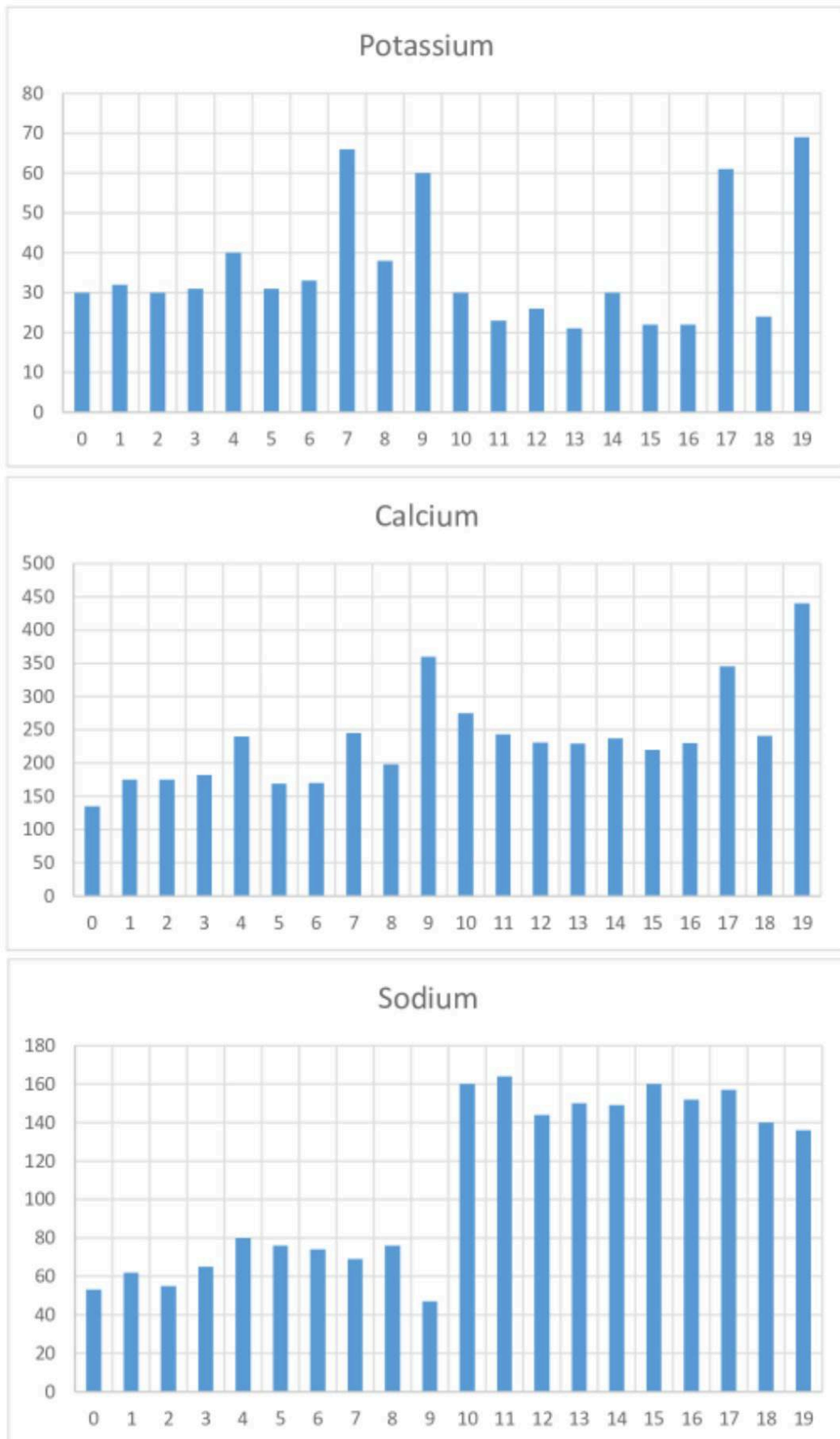


FIG. 4.10 : Résultats des analyses réalisées par photomètre à flamme.

Les résultats de l'analyse réalisée à l'aide du photomètre à flamme ont permis de

caractériser la présence des sels dans nos échantillons ainsi que dans nos bacs d'expérimentation. Nous avons observé une concentration relativement élevée en sels, ce qui peut s'expliquer par l'utilisation de fluides de forage contenant une salinité importante ou par la présence de sels dans les formations géologiques traversées pendant le forage.

Ces sels sont nécessaires au métabolisme bactérien. En effet, ces oligo-éléments peuvent agir comme activateurs d'enzymes, facilitant ainsi les réactions biochimiques nécessaires au fonctionnement des bactéries (FOKOU MBOGNE 2017).

La présence de ces oligo-éléments dans nos échantillons et bacs peut jouer un rôle crucial dans le développement et l'activité des microorganismes. Leur disponibilité peut influencer la croissance, la reproduction et les processus métaboliques des bactéries présentes, et donc avoir un impact sur l'efficacité des processus de biodégradation des hydrocarbures.

Les concentrations de phosphore (P) varient de 16 ppm (bac 13) à 26 ppm (bac 3).

Les concentrations de calcium (Ca) se situent entre 110 ppm (bac 9) et 440 ppm (bac 19).

Les concentrations de potassium (K) varient de 21 ppm (bac 13) à 69 ppm (bac 19).

Les concentrations de sodium (Na) se situent entre 47 ppm (bac 9) et 164 ppm (bac 11).

4.6 Présentation et interprétation des résultats relatifs aux analyses des métaux (SAA)

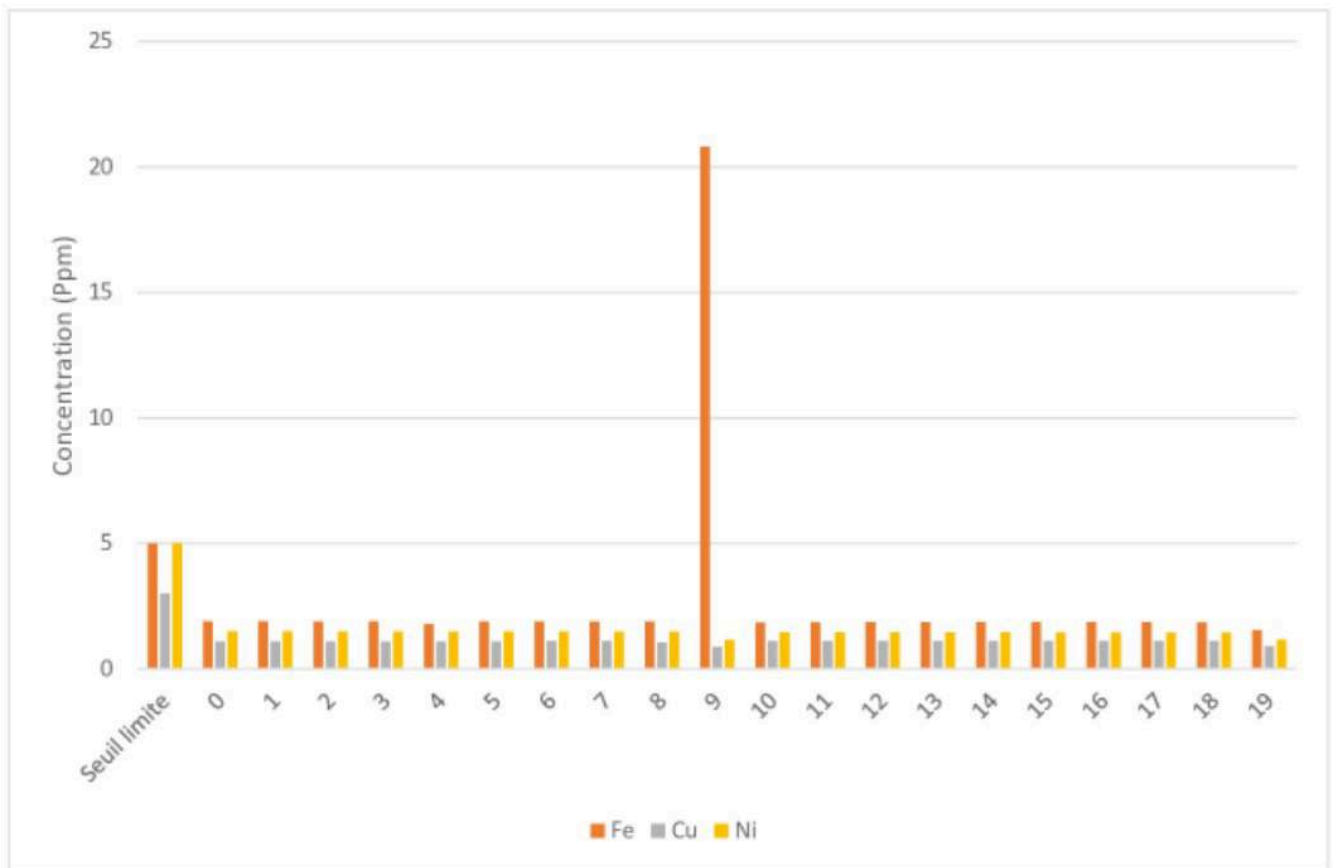


FIG. 4.11 : Résultats des analyses des métaux.

Le seuil de cuivre le plus élevé est observé dans le bac 17, avec une concentration de 1,114 ppm. Cependant, les autres valeurs des bacs restent proches de celle-ci. En ce qui concerne le nickel, le seuil le plus élevé est trouvé dans le bac 1, avec une concentration de 1,495 ppm. Les autres valeurs sont également proches de cette concentration. Pour le fer, le seuil le plus élevé est observé dans l'essai 9, avec une concentration de 20,81 ppm, tandis que les autres essais ont un seuil inférieur à 2 ppm.

Il est important de noter que toutes les valeurs restent en dessous du seuil limite fixé par la réglementation algérienne, à l'exception de l'essai 9 concernant le fer. En effet, la concentration de fer dans cet essai est quatre fois supérieure au seuil limite. Cependant, il convient de souligner que cela est logique dans le contexte de la biolixiviation, car cette méthode favorise la solubilisation des métaux. Contrairement à l'utilisation de matériaux naturels tels que les cendres, le fumier ou l'argile, qui éliminent les métaux par le biais de mécanismes tels que l'adsorption, l'absorption, la complexation, la coagulation et la floculation.

Après l'application de cette méthode, il est nécessaire de procéder à la valorisation de ces métaux en utilisant des techniques telles que l'extraction par solvant et l'électrolyse.

Conclusion générale

4.7 Conclusion générale

L'objectif de ce travail est la réduction des polluants dans les déblais de forage de SLB dans la région de Hassi Messaoud, en utilisant la méthode de bioremédiation. Nous avons utilisé des bactéries autochtones et des bactéries acidophiles provenant du minerai de la mine de Kef Oum Tboul, ainsi que la méthode du landfarming.

Dans un premier temps, nous avons effectué l'échantillonnage d'un puits situé à Hassi Messaoud pour la section de forage du (8''_{1/2}). Le premier échantillon a été prélevé avant que les déblais ne subissent le traitement par le Verti-G, avec un taux d'hydrocarbures de 104 g/kg. Le deuxième échantillon a été prélevé après le traitement du Verti-G, présentant un taux d'hydrocarbures de 34 g/kg.

Ensuite, nous avons procédé à une caractérisation physico-chimique de ces échantillons, pour évaluer leur composition et confirmer la présence de polluants, notamment des hydrocarbures.

Dans la troisième partie de notre travail, nous avons réalisé des essais de bioremédiation sur une durée de 48 jours. La diversité de nos essais nous a permis de comparer les différentes méthodes utilisées, notamment la première méthode, avec l'ajout de fumier, de foin, de feuilles mortes, d'argile activée, de terreau, de cendres de bois. ainsi que la deuxième méthode en utilisant les bactéries déjà présentes sur site sans ajout d'autres matières ; et la troisième en utilisant des bactéries acidophiles.

Nous avons constaté que la stimulation de la biodégradation en ajoutant certains mélanges a conduit aux meilleurs rendements en termes d'élimination des hydrocarbures.

Pour l'échantillon 1, le mélange de cendres de bois a donné le meilleur résultat avec un taux d'élimination de 96,74 %.

Pour l'échantillon 2, le mélange d'argile activée et de terreau a montré le meilleur rendement avec un taux de 94 %. Les autres mélanges ont présenté des rendements variant entre 85 % et 96 %.

L'utilisation des bactéries autochtones a donné des rendements moins importants par rapport aux mélanges, atteignant un taux de 75 % pour l'échantillon 2 et un taux de 87 % pour l'échantillon 1. Le meilleur rendement global est obtenu en utilisant des bactéries acidophiles, avec un taux d'élimination de 98 %.

Malgré ces différences de rendement, l'ensemble des résultats obtenus se situent dans les limites des seuils réglementaires Algériens (la part maximale d'hydrocarbures dans le sol est fixée à 20 g/kg).

Ainsi, notre étude démontre que la méthode de traitement biologique est une solution prometteuse pour lutter contre la pollution causée par les fluides de forage. Cette technique de dépollution présente un double avantage, elle est à la fois écologique en rédui-

sant la contamination des sols par les hydrocarbures et en valorisant les résidus industriels.

En conclusion, ce travail est une proposition de solution concrète pour résoudre le problème de pollution environnementale lié aux hydrocarbures dans les sols contaminés. Pour approfondir ces résultats, il serait souhaitable de mener des études complémentaires en modifiant plusieurs facteurs tels que le rapport C :N :P, le pH, la température, le rapport entre l'échantillon et le mélange ajouté, ainsi que l'humidité. Cela permettrait d'optimiser davantage les performances de la bioremédiation et d'explorer de nouvelles voies pour la décontamination des sites pollués.

Il est conseillé de réaliser des essais à grande échelle sur des sites contaminés réels. Ces essais devraient impliquer une évaluation rigoureuse des performances de la bioremédiation en utilisant différentes formulations de mélanges et en adaptant les paramètres environnementaux aux conditions locales spécifiques. De plus, il serait utile de suivre attentivement l'évolution des concentrations d'hydrocarbures et des indicateurs de la qualité des sols au fil du temps.

La bioremédiation offre une perspective prometteuse et présente des avantages économiques pour le traitement des déblais de forages pétroliers. Comparée aux méthodes traditionnelles telles que l'utilisation de produits chimiques et de procédés thermiques, la bioremédiation utilise des microorganismes naturels pour décomposer les contaminants, réduisant ainsi l'impact environnemental et les coûts associés.

De plus, la bioremédiation offre la possibilité de valoriser les hydrocarbures dégradés, ouvrant ainsi la voie à une gestion plus durable des ressources et à de potentielles sources de revenus. Avec des perspectives futures prometteuses et des avantages économiques significatifs, l'adoption de la bioremédiation dans le traitement des déblais de forages pétroliers constitue une approche favorable pour les entreprises pétrolières.

L'engagement d'une collaboration entre les parties prenantes, telles que les autorités environnementales, les entreprises pétrolières et gazières, ainsi que les chercheurs et les experts en bioremédiation, serait également bénéfique. Cette collaboration faciliterait la mise en place de projets pilotes à grande échelle, la collecte de données pertinentes et l'échange d'expériences pour évaluer l'efficacité et la faisabilité de la bioremédiation dans des contextes réels.

Bibliographie

- ADAMS, Godleads Omokhagbor et al. (2015). "Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation : a review". In : *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation* 3.1, p. 28-39.
- AGARRY, Samuel et Ganiyu K LATINWO (2015). "Biodegradation of diesel oil in soil and its enhancement by application of bioventing and amendment with brewery waste effluents as biostimulation-bioaugmentation agents". In : *Journal of Ecological Engineering* 16.2.
- AIT OUMERACI, Mohamed (2020). "Bioremédiation d'un sol contaminé par les hydrocarbures : recherche des modes de la biostimulation (site de forage Hassi Messaoud)". Thèse de doct.
- AMIR, Soumia et al. (2005). "Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of lagooning sewage sludge". In : *Chemosphere* 58.4, p. 449-458.
- ARAFA, Mohamed A (2003). "Biodegradation of some aromatic hydrocarbons (BTEXs) by a bacterial consortium isolated from polluted site in Saudi Arabia". In : *Pakistan Journal of Biological Sciences (Pakistan)*.
- ARPORNONG, Noulkamol et al. (2020). "Formulation of bio-based washing agent and its application for removal of petroleum hydrocarbons from drill cuttings before bioremediation". In : *Frontiers in bioengineering and biotechnology* 8, p. 961.
- ATAGANA, Harrison Ifeanyiichukwu (2008). "Compost bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil inoculated with organic manure". In : *African Journal of Biotechnology* 7.10.
- ATLAS, Ronald M et Richard BARTHA (1992). "Hydrocarbon biodegradation and oil spill bioremediation". In : *Advances in microbial ecology*, p. 287-338.
- BACHELIER, Georges (1973). "Activité biologique des sols et techniques simples qui en permettent l'évaluation". In : *Cahiers de l'ORSTOM, XI/1*, p. 65-77.
- BALL, Andrew S, Richard J STEWART et Kirsten SCHLIEPHAKE (2012). "A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings". In : *Waste Management & Research* 30.5, p. 457-473.
- BELHAOUA, Abdelkader et Amine Med-Nordine BENSARI (2003). "Réduction des coûts dans les opérations de forage par la gestion des temps de connexion : méthode de Gantt". Thèse de doct.
- BENCHOUK, Amina (2017). "Bioremédiation des sols pollués de pétrole par les microorganismes indigènes et amélioration génétique de leur pouvoir de dégradation des hydrocarbures". Thèse de doct. Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis.
- BERGERE, J-L et A LACOURT (1968). "Production massive de cellules de streptocoques lactiques. I.-Méthodes générales d'étude et facteurs de la croissance de" *Streptococcus lactis*" souche C10". In : *Le Lait* 48.471-472, p. 1-11.
- BISSAAD, Nassima (1999). "Contribution à la biorémédiation dans un bioréacteur d'un sol contaminé par les hydrocarbures". Thèse de doct.

- BONNEAU, M et B SOUCHIER (1994). *Pedologie : 2 Constituants et propriétés du sol*. T. 2. Masson.
- BOUMEDIENE, Mohamed El Bachir et Manel OUELLABI (2016). “Mise au point d’un procédé de fabrication du superphosphate à partir du phosphate de Djebel Onk”. Thèse de doct.
- CAENN, Ryen, Henry CH DARLEY et George R GRAY (2011). *Composition and properties of drilling and completion fluids*. Gulf professional publishing.
- CHANDRA, Subhash et al. (2013). “Application of bioremediation technology in the environment contaminated with petroleum hydrocarbon”. In : *Annals of microbiology* 63.2, p. 417-431.
- CORNU, Marie et Philippe ROSSET (2004). “Appréciation quantitative de la croissance bactérienne potentielle à partir de profils temps/température : Exemples d’application pour la croissance de Salmonella Typhimurium dans un steak haché”. In : *Bulletin de l’Académie vétérinaire de France* 157.1, p. 93-100.
- DAMOU, F (2007). “The adaptability study for the use of thermal desorption and solidification/stabilization processes for the treatment of drill cuttings in HASSI MESSAOUD Field”. In : *Faculty of Design and Technology, School of Engineering, The Robert Gordon University, Aberdeen*.
- DE SIMEIS, Davide et Stefano SERRA (2021). “Actinomycetes : A never-ending source of bioactive compounds—An overview on antibiotics production”. In : *Antibiotics* 10.5, p. 483.
- DIAS, Romina L et al. (2015). “Hydrocarbon removal and bacterial community structure in on-site biostimulated biopile systems designed for bioremediation of diesel-contaminated Antarctic soil”. In : *Polar biology* 38, p. 677-687.
- ELLIS, Lynda BM, C Douglas HERSHBERGER et Lawrence P WACKETT (2000). “The University of Minnesota Biocatalysis/Biodegradation database : microorganisms, genomics and prediction”. In : *Nucleic Acids Research* 28.1, p. 377-379.
- FERNÁNDEZ-LUQUEÑO, F et al. (2010). “Effect of different nitrogen sources on plant characteristics and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)” In : *Bioresource technology* 101.1, p. 396-403.
- FOKOU MBOGNE, Pascal Martial (2017). “Biorémediation augmentée de sols contaminés aux hydrocarbures lourds par ajout de substrats organiques”. Thèse de doct. École de technologie supérieure.
- GABET, Sophie (2004). “Remobilisation d’Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) présents dans les sols contaminés à l’aide d’un tensioactif d’origine biologique”. Thèse de doct. Limoges.
- HARITASH, AK et CP KAUSHIK (2009). “Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) : a review”. In : *Journal of hazardous materials* 169.1-3, p. 1-15.
- HUBBE, Martin A et al. (2013). “Cellulosic Substrates for Removal of Pollutants from Aqueous Systems : A Review. 3. Spilled Oil and Emulsified Organic Liquids.” In : *BioResources* 8.2.
- KALANTARY, Roshanak Rezaei et al. (2014). “Effectiveness of biostimulation through nutrient content on the bioremediation of phenanthrene contaminated soil”. In : *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 12, p. 1-9.
- KHODJA, Mohamed (2008). “Les fluides de forage : étude des performances et considérations environnementales”. Thèse de doct.
- KULKARNI, SV, AS PALANDE et MV DESHPANDE (2012). “Bioremediation of petroleum hydrocarbons in soils”. In : *Microorganisms in environmental management : microbes and environment*, p. 589-606.

- LANDRIOT, G (1968). "Fluide de forage". In : *édition Technip* 6.
- LAW, Aaron MJ et Michael D AITKEN (2003). "Bacterial chemotaxis to naphthalene desorbing from a nonaqueous liquid". In : *Applied and Environmental Microbiology* 69.10, p. 5968-5973.
- LE BISSONNAIS, Yves et al. (2005). "Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion". In : *Catena* 62.2-3, p. 111-124.
- LUKIĆ, Borislava et al. (2017). "A review on the efficiency of landfarming integrated with composting as a soil remediation treatment". In : *Environmental Technology Reviews* 6.1, p. 94-116.
- MAILA, Mphekgo P et Thomas E CLOETE (2004). "Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming : are simplicity and cost-effectiveness the only advantages?" In : *Reviews in Environmental science and bio/Technology* 3, p. 349-360.
- MARGESIN, R et F SCHINNER (2001). "Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments". In : *Applied microbiology and biotechnology* 56, p. 650-663.
- MAZZIOTTI, Mélanie (2017). "Impact des exsudats racinaires de *Miscanthus x giganteus* sur les microorganismes impliqués dans la bioremédiation d'un sol contaminé au benzo (a) anthracène". Thèse de doct. Université de Lorraine.
- MCCARTHY, Kathleen et al. (2004). "Remediation of spilled petroleum hydrocarbons by in situ landfarming at an arctic site". In : *Cold Regions Science and Technology* 40.1-2, p. 31-39.
- MERCHICHI, Amira et al. (2022). "Passive treatment of acid mine drainage from the Sidi-Kamber mine wastes (Mediterranean coastline, Algeria) using neighbouring phosphate material from the Djebel Onk mine". In : *Science of the Total Environment* 807, p. 151002.
- MESSAOUD, Hocini et al. (2013). "Les bourbiers de forages pétroliers et des unités de production : Impact sur l'environnement et technique de traitement". Thèse de doct.
- MILLER, MN, GW STRATTON et G MURRAY (2004). "Effects of nutrient amendments and temperature on the biodegradation of pentachlorophenol contaminated soil". In : *Water, Air, and Soil Pollution* 151, p. 87-101.
- MIR, Mohammad Yaseen, Saima HAMID et Gulab Khan ROHELA (2022). "Bioaugmentation : A Way Out for Remediation of Polluted Environments". In : *Environmental Biotechnology*. Apple Academic Press, p. 137-156.
- MISWACO, MI (2001). "Drilling fluids engineering manual". In : *MI SWACO : Houston, TX, USA*.
- MIYASAKA, Tomomichi, Hiroki ASAMI et Kazuya WATANABE (2006). "Impacts of bioremediation schemes on bacterial population in naphthalene-contaminated marine sediments". In : *Biodegradation* 17, p. 227-235.
- NASERI, Masoud, Abbas BARABADI et Javad BARABADY (2014). "Bioremediation treatment of hydrocarbon-contaminated Arctic soils : influencing parameters". In : *Environmental Science and Pollution Research* 21, p. 11250-11265.
- NGUYEN, Jean-Paul (1993). *Forage (Le)*. Editions OPHRYS.
- OUÃ, Wendlassida Pauline et al. (2020). "Pilot bioremediation of contaminated soils by hydrocarbons, from an electricity production and distribution site in Ouagadougou, Burkina Faso". In : *Scientific Research and Essays* 15.4, p. 69-77.
- PALADINO, G et al. (2016). "Bioremediation of heavily hydrocarbon-contaminated drilling wastes by composting". In : *International journal of environmental science and technology* 13, p. 2227-2238.

- PAUDYN, Krysta et al. (2008). "Remediation of hydrocarbon contaminated soils in the Canadian Arctic by landfarming". In : *Cold Regions Science and Technology* 53.1, p. 102-114.
- PEREIRA, MS et al. (2013). "Microwave heating : a feasible alternative for drilled cuttings drying in offshore environments". In : *SPE/IADC Drilling Conference*. OnePetro.
- PERNOT, Audrey (2013). "Réactivité des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans une terre de cokerie : influence de la répartition des contaminants et de l'introduction de matière organique fraîche". In : *Université de Lorraine, Nancy*, p. 286.
- PRINCE, Roger C et al. (2013). "The primary biodegradation of dispersed crude oil in the sea". In : *Chemosphere* 90.2, p. 521-526.
- REIS, DR John C (1996). *Environmental control in petroleum engineering*. Elsevier.
- REZANIA, Shahabaldin et al. (2015). "Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater". In : *Journal of environmental management* 163, p. 125-133.
- RHBAL, Hicham et al. (2020). "DECONTAMINATION DES SOLS POLLUES PAR LES HYDROCARBURES". In : *Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry* 21.1, p. 1-16.
- RIKE, Anne Gunn et al. (2003). "In situ biodegradation of petroleum hydrocarbons in frozen arctic soils". In : *Cold Regions Science and Technology* 37.2, p. 97-120.
- ROBINSON, JP et al. (2010). "Microwave pyrolysis of wood pellets". In : *Industrial & Engineering Chemistry Research* 49.2, p. 459-463.
- ROSSET, Philippe et al. (2003). "Intégration des profils temps-température et appréciation de la croissance bactérienne". In : *Revue Générale du Froid* 1038, p. 27-34.
- SAMANTA, Sudip K, Om V SINGH et Rakesh K JAIN (2002). "Polycyclic aromatic hydrocarbons : environmental pollution and bioremediation". In : *TRENDS in Biotechnology* 20.6, p. 243-248.
- SHARMA, Manan et Russell REYNNELLS (2018). "Importance of soil amendments : survival of bacterial pathogens in manure and compost used as organic fertilizers". In : *Preharvest food safety*, p. 159-175.
- SILVERMAN, Melvin P et Donald G LUNDGREN (1959). "Studies on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans* : I. An improved medium and a harvesting procedure for securing high cell yields". In : *Journal of bacteriology* 77.5, p. 642-647.
- SINGH, Ajay, Brajesh SINGH et Owen WARD (2012). "Potential applications of bioprocess technology in petroleum industry". In : *Biodegradation* 23, p. 865-880.
- SOTERIOU, Georgios A et al. (2021). "Biostimulatory action of vegetal protein hydrolysate and the configuration of fruit physicochemical characteristics in grafted watermelon". In : *Horticulturae* 7.9, p. 313.
- TEBIB, Mahdi, Fares NOUIS et Abdeslam CHAITER (2017). "Descente et cimentation du liner 4"1/2 dans le champ Hassi Messaoud". Thèse de doct.
- THOMAS, M, A FLORION et D CHRÉTIEN (1997). "The effect of pH and conductivity on the electric behaviour of *Apterionotus albifrons* (family apteronotidae) in a pollution monitoring system". In : *Environmental technology* 18.11, p. 1069-1083.
- TRABELSI, Abdesselam et al. (2019). "Caractérisation Pétro-physique d'un Réservoir cambroordovicien de la zone 13 du champ HMD Par l'utilisation de Diagraphies et des Mesures sur Carottes". Thèse de doct.
- TYAGI, Meenu, M Manuela R da FONSECA et Carla CCR de CARVALHO (2011). "Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes". In : *Biodegradation* 22, p. 231-241.

- VANDERMEER, Krista D et Andrew J DAUGULIS (2007). “Enhanced degradation of a mixture of polycyclic aromatic hydrocarbons by a defined microbial consortium in a two-phase partitioning bioreactor”. In : *Biodegradation* 18, p. 211-221.
- VIEIRA, PA et al. (2007). “Biodegradation of effluent contaminated with diesel fuel and gasoline”. In : *Journal of Hazardous Materials* 140.1-2, p. 52-59.
- VOGEL, Timothy M (1996). “Bioaugmentation as a soil bioremediation approach”. In : *Current opinion in biotechnology* 7.3, p. 311-316.
- XU, Ying et Ning-Yi ZHOU (2017). “Microbial remediation of aromatics-contaminated soil”. In : *Frontiers of Environmental Science & Engineering* 11, p. 1-9.

Annexes

Annexe A

Tableaux des résultats

A.1 Tableau des valeurs du suivi

A.1.1 Résultats du dénombrement des bactéries

Bacs	10/04/2023	20/04/2023	01/05/2023	07/05/2023	16/05/2023
1	1,60E+07	1,56E+08	4,76E+08	5,66E+08	6,54E+08
2	6,00E+06	1,26E+08	3,26E+08	3,48E+08	5,34E+08
3	9,40E+07	2,24E+08	2,76E+08	2,76E+08	4,76E+08
4	4,60E+07	3,80E+08	3,72E+08	6,86E+08	6,06E+08
5	4,40E+07	1,10E+08	2,04E+08	4,96E+08	4,60E+08
6	1,08E+08	4,18E+08	5,52E+08	9,20E+08	1,01E+09
7	1,34E+08	8,60E+07	8,20E+07	4,28E+08	5,04E+08
8	/	9,00E+07	2,30E+08	4,66E+08	5,06E+08
11	1,26E+08	1,36E+08	1,64E+08	2,18E+08	3,28E+08
12	1,80E+08	2,98E+08	2,94E+08	5,00E+08	5,28E+08
13	4,40E+07	7,20E+07	7,20E+07	1,88E+08	2,26E+08
14	1,40E+08	1,80E+08	1,02E+08	3,22E+08	3,30E+08
15	1,38E+08	8,60E+07	1,66E+08	1,84E+08	2,72E+08
16	5,20E+07	1,58E+08	2,04E+08	2,36E+08	3,68E+08
17	5,00E+07	1,22E+08	1,70E+08	2,06E+08	2,50E+08
18	/	1,70E+08	1,62E+08	1,80E+08	2,48E+08

TAB. A.1 : Dénombrement bactériens du bac 1 à 7 et de 11 à 18

Bacs	9	19
13/04/2023	3,40E+07	3,20E+07
15/04/2023	3,00E+07	2,66E+08
16/04/2023	2,80E+07	2,66E+08
17/04/2023	5,96E+08	2,72E+08
18/04/2023	7,00E+08	7,16E+08
19/04/2023	1,17E+09	9,78E+08
20/04/2023	1,00E+09	6,30E+08
23/04/2023	8,90E+08	5,12E+08

TAB. A.2 : Dénombrement bactériens du 9 et 19

A.1.2 Résultats de la température

Bacs	10/04	20/04	01/05	07/05	16/05	18/05
1	29	32	35	34	32	32
2	28	29	34	32	33	31
3	27	29	32	32	31	30
4	29	32	35	37	34	32
5	29	32	35	35	31	31
6	28	33	33	34	34	33
7	28	29	33	34	33	33
8		30	32	32	31	30
11	29	32	36	36	33	32
12	29	31	34	33	31	30
13	28	30	35	34	32	31
14	29	32	35	38	38	37
15	30	30	32	36	35	34
16	29	30	32	34	33	32
17	29	30	35	35	34	33
18		30	32	33	32	31

TAB. A.3 : Suivi de la température

A.1.3 Résultats du pH

Bacs	01/04	10/04	20/04	01/05	07/05	16/05	18/05
1	6,9	5,63	6,43	8,48	7	6,53	6
2	6,9	6,42	7,13	8,2	7,6	7,31	6,3
3	6,9	6,63	6,71	8,63	7,57	7,17	6,66
4	6,9	6,68	7,03	8,62	7,58	7,19	6,76
5	6,9	6,5	6,76	8,86	8,55	8,34	6,9
6	6,9	7	8,5	8,85	8	7,8	7,03
7	6,9	6,5	6,79	8,94	8,64	8,32	7,3
8		6,9	7,24	8,79	8,4	8	7,64
11	6,22	6,28	7,05	7,5	8,3	8,4	8,74
12	6,22	5,85	7,09	7,5	8,37	8,4	8,72
13	6,22	7	7,13	8,25	8,38	8,5	8,8
14	6,22	7,05	7,34	8,25	8,12	8,4	8,73
15	6,22	7,32	7,46	8,28	8,34	8,77	8,8
16	6,22	7,26	7,72	8,32	8,38	8,71	8,81
17	6,22	7,14	7,14	8,14	8,42	8,73	8,94
18		6,22	6,95	8,53	8,72	8,75	8,8

TAB. A.4 : Résultats du pH pour le bacs de 1 à 8 et de 11 à 18

Essais	9	19
12/04/2023	6,9	6,22
13/04/2023	4,16	3,25
15/04/2023	2,81	1,76
16/04/2023	2,97	4,11
17/04/2023	3,44	4,3
18/04/2023	4,84	5,68
19/04/2023	4,8	6
20/04/2023	4,89	6,1
23/04/2023	4,96	6,76

TAB. A.5 : Résultats du pH pour les essais 9 et 19

A.1.4 Résultats du potentiel redox

Bacs	01/04	10/04	20/04	01/05	07/05	16/05	18/05
1	46	-16	-42	7,8	23	30	38,5
2	46	40,5	0,2	50,2	55	49,2	38,5
3	46	6,3	-25	10,3	22	44,7	35
4	46	20,03	-4,3	21,9	25	42,3	29
5	46	-30,8	-30,6	9,8	6,5	24,7	33
6	46	-27,8	-44	4,2	2,3	26	27
7	46	-55,2	-60,9	-17,2	-14	14,3	25
8		46	-61,2	-8,2	25,2	53,6	56
11	70,6	60	21	19,5	14	10	1,5
12	70,6	28	19	8	5	5,7	3,5
13	70,6	50	20	14,2	10,6	5,3	0
14	70,6	20	11	10,9	15	15,9	8,2
15	70,6	14,5	13,5	5	-5	-14	-20
16	70,6	13	4,2	0	2	-8	-14,5
17	70,6	-8,4	-14	-29	-25	-40	-52,1
18		70,6	-2,1	-10,3	-29	-29	-30

TAB. A.6 : Résultats du potentiel redox dans les bacs

Bacs	9	9	19	19
Date	potentiel redox	o2	potentiel redox	O2
13/04/2023	246	0,31	296	1,52
15/04/2023	312	6,67	370	7,3
16/04/2023	316,6	6,8	240,8	0,28
17/04/2023	270	8,89	213	0,94
18/04/2023	182	0,46	135	0,19
19/04/2023	210	6,75	118	2,13
20/04/2023	187,6	0,36	105	0,43
23/04/2023	184	0,33	103,5	0,76

TAB. A.7 : Résultats du potentiel redox et de l'oxygène dissous dans les essais 9 et 19

A.1.5 Résultats de l'analyse du Phosphore, potassium, sodium et calcium

BACS	Phosphore (Ppm)	Ca (Ppm)	K (Ppm)	Na (Ppm)
0	24	135	30	53
1	23	175	32	62
2	17	175	30	55
3	26	182	31	65
4	24	240	40	80
5	24	169	31	76
6	23	170	33	74
7	18	245	66	69
8	20	198	38	76
9	20	110	60	47
10	22	275	30	160
11	22	243	23	164
12	23	231	26	144
13	16	229	21	150
14	20	237	30	149
15	21	220	22	160
16	20	230	22	152
17	21	345	61	157
18	22	241	24	140
19	17	440	69	136

TAB. A.8 : Résultats du Phosphore, calcium, sodium et potassium

A.1.6 Résultats du distillateur

	Echantillon 1	1	2	3	4	5	6	7	8
teneur en eau	4,49	9,09	35,3	25,45	21,43	12,73	12,32	15,24	8,96
teneur en huile	14,57	9,67	9,88	8,18	8,21	9,09	9,45	9,24	11,29
teneur en solide	80,94	79,09	52,95	63,64	69,64	75,55	77,36	73,66	78,14

TAB. A.9 : Résultats du distillateur pour les bacs de l'échantillon 1

	Echantillon 2	11	12	13	14	15	16	17	18
teneur en eau	4,49	20,83	35,46	39,44	28,59	24,56	23,92	25,09	16,53
teneur en huile	4,43	3,03	3,74	3,59	2,20	2,86	3,68	3,51	3,95
teneur en solide	91,08	68,95	57,07	52,85	66,86	70,12	71,19	71,30	77,50

TAB. A.10 : Résultats du distillateur pour les bacs de l'échantillon 2

A.1.7 Résultats du TPH

Essais	TPH (g/kg)
0	104,22
1	4,256
2	6,02
3	4,376
4	4,464
5	4,8
6	4,328
7	3,396
8	13,4
9	1,56
10	34,66
11	2,696
12	4,82
13	3,576
14	4,464
15	2
16	3,128
17	3,396
18	8,6
19	0,36

TAB. A.11 : Résultats du TPH

A.1.8 Résultats de l'analyse des métaux

N de l'essai	Fe (Ppm)	Cu (Ppm)	Ni (Ppm)
Seuil limite	5	3	5
0	1,901	1,1	1,506
1	1,9	1,096	1,5
2	1,889	1,096	1,495
3	1,892	1,092	1,491
4	1,789	1,09	1,487
5	1,889	1,091	1,492
6	1,887	1,113	1,491
7	1,883	1,112	1,485
8	1,884	1,056	1,482
9	20,81	0,8797	1,152
10	1,848	1,109	1,465
11	1,862	1,113	1,463
12	1,875	1,113	1,463
13	1,876	1,114	1,464
14	1,865	1,113	1,456
15	1,871	1,113	1,455
16	1,868	1,113	1,454
17	1,87	1,114	1,454
18	1,856	1,105	1,446
19	1,541	0,9021	1,166

TAB. A.12 : Résultats de l'analyse des métaux