

Université KASDI-MERBAH Ouargla

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie des Procédés



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies.

Filière : Génie des Procédés.

Spécialité : Génie Chimique.

Présenté par :

Harouna saddi Mahamadou Aminou & Bennaceur Zakaria

Thème :

**Modélisation du processus de décontamination
des sables de Ouargla contaminés par les
hydrocarbures par lavage en lit fluidisé.**

Soutenu publiquement le :

08 juin 2022

Devant le jury composé de :

Mr. Mohamed Lamine Sekirifa	Pr	Président	UKM Ouargla.
Mr. Nasreddine Chennouf	Pr	Examineur	UKM Ouargla.
Mr. DOUNIT Salah	Pr	Rapporteur	UKM Ouargla.

Année universitaire : 2021/2022

A mes parents

A mes frères et sœurs

A toute ma famille et mes ami(e)s

Remerciement

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce aux interventions de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance.

Nous voudrions tout d'abord commencer par remercier nos parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Nos frères et sœurs, pour leurs encouragements.

Ensuite, nous voudrions remercier notre directeur de mémoire M. Salah DOUNIT, professeur en génie des procédés à l'université Kasdi Merbah Ouargla et à l'Université Djillali LIABES de Sidi-Bel-Abbès, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Nous remercions le président de jury ainsi que les membres de jury pour leur attention et leurs observations très enrichissantes.

Nous remercions également le corps administratif de l'université Kasdi Merbah en particulier ceux du département de génie des procédés qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant notre formation.

Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Monsieur Mohammed AOUF, étudiant en doctorat à l'université Kasdi Merbah, il a partagé ses connaissances et expériences avec nous, tout en nous accordant sa confiance dans l'exécution de missions valorisantes.

Monsieur Ladjel Segni, professeur et directeur de laboratoire de génie de procédé à l'université Kasdi Merbah qui nous a accueilli à bras ouverts dans son laboratoire pour la réalisation d'une grande partie des expériences réalisées pour l'accomplissement de ce travail.

Monsieur Djamel Zerrouki, professeur à l'université Kasdi Merbah, pour nous avoir accordé un entretien et avoir répondu à nos questions sur les surfactants. Il a été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, nous remercions nos amis et collègues, qui ont toujours été là pour nous. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, nous vous présentons nos remerciements, nos respects et notre gratitude.

Résumé

Dans ce travail, on s'intéresse à la modélisation du processus de lavage des sables contaminé par des hydrocarbures en lit fluidisé. Le modèle élaboré prend en compte les effets combinés de trois paramètres qui influencent de façon important le rendement du lavage, à savoir le temps de l'opération, la température de la solution de lavage et la présence ou non de tensioactif ainsi que sa concentration. Le modèle est construit sur la base de mesures expérimentales effectuées sur un appareil de fluidisation disponible au niveau du laboratoire pédagogique de génie de procédé de l'université. La contamination du sable a été provoquée volontairement dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat. Le contaminant utilisé est du pétrole brut récupéré au niveau de la société nationale Algérienne des hydrocarbures SONATRACH. Le lavage se fait en mode continu avec recyclage de la solution de lavage après séparation par décantation des huiles extraites lors du lavage. Plusieurs expériences ont été réalisées en modifiant le temps de lavage, la température et la quantité de surfactant dans la solution de lavage. Les résultats des mesures expérimentales ont révélé qu'en l'absence de tensioactif, le rendement du lavage reste faible, autour de 20 %. Avec l'élévation de la température, ce rendement est amélioré et peut atteindre 50 % à 50 °C. L'ajout de tensioactif facilité la fluidisation et permet d'améliorer considérablement le rendement qui passe aux alentours de 80 %. L'élévation de la température dans ce cas augmente encore d'avantage le rendement. Sur la base de ces constants, on a élaboré et validé deux corrélations, d'une valable dans le cas du lavage sans tensioactif et l'autre en présence de tensioactif.

Mots clé : lavage, surfactant, décontamination, lit fluidisé, modélisation, sol, hydrocarbure.

Abstract

In this work, we are interested in the modeling of the washing process of sands contaminated by hydrocarbons in a fluidized bed. The model developed takes into account the combined effects of three parameters that significantly influence the washing performance, namely the time of the operation, the temperature of the washing solution and the presence or absence of surfactant as well as its concentration. The model is based on experimental measurements carried out on a fluidization device available at the educational laboratory of process engineering of the university. The contamination of the sand was done artificially. The contaminant used is crude oil provided by the Algerian national hydrocarbon company SONATRACH. Washing is made in continuous mode with recycling of the washing solution after separation of the oils extracted during the operation by decantation. Several experiments were performed by changing the washing time, the temperature and the concentration of surfactant in the washing solution. Results of the

experimental measurements revealed that in the absence of surfactant, the washing efficiency remains low, around 20%. When temperature increases, efficiency is improved and can reach 50% at 50°C. The addition of surfactant facilitates fluidization and considerably improves the yield, which attains 80%. Raising the temperature in this case further increases the efficiency. Based on these behaviors, two correlations were developed and validated using experimental data. The first one is valid in the case of washing without surfactant and the second one is valid in the presence of surfactant.

ملخص

هدفت هذه الدراسة إلى نمذجة عملية غسل الرمال الملوثة بالمواد الهيدروكربونية. حيث يأخذ النموذج الذي تم تطويره في الاعتبار التأثيرات المجمعة لثلاثة عوامل لها تأثير كبير على كفاءة الغسيل وهي وقت التشغيل ودرجة حرارة محلول الغسيل ووجود المادة المتفاعلة وتركيزها أو غيابها. يبني هذا النموذج على أساس القياسات التجريبية التي يتم تنفيذها على جهاز للتدفق متاح في المختبر التربوي التابع للجامعة. الملوث المستخدم هو النفط الخام المستخرج على مستوى الشركة الوطنية الجزائرية للهيدروكربون سوناطراك. يتم الغسيل في الوضع المستمر مع إعادة تدوير محلول الغسيل بعد إزالة الزيوت المستخرجة أثناء الغسيل. تم إجراء عدة تجارب بتغيير وقت الغسيل ودرجة الحرارة وكمية المادة المتفاعلة في محلول الغسيل، وكشفت نتائج القياسات التجريبية أنه في غياب المادة المتفاعلة، تظل كفاءة الغسيل منخفضة، نحو 20%. ومع ارتفاع درجة الحرارة، تتحسن هذه الكفاءة وقد تصل إلى 50% في درجة حرارة 50 درجة مئوية كما أن إضافة المادة المتفاعلة تسهل عملية التدفق وتسمح بتحسين الكفاءة بشكل كبير والتي تصل إلى 80%. يؤدي ارتفاع درجة الحرارة في هذه الحالة إلى زيادة الكفاءة. على أساس هذه الثوابت، تم تطوير منهجين، واحدة صالحة في حالة الغسل دون مادة متفاعلة والأخرى في وجود مادة متفاعلة.

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I. 1 : Caractérisation des différentes classes granulométriques.....	5
Tableau I. 2 : Quelques composés saturés.....	9
Tableau I. 3 : Quelques composés aliphatiques non saturés.	9

Chapitre II :

Tableau II. 1 : Caractéristiques du sable utilisé.	21
Tableau II. 2 : Valeurs du % TPH à différents temps de lavage.	26
Tableau II. 3 : Evolution du % TPH en fonction de la température.....	27
Tableau II. 4 : Valeurs du % TPH avec la variation de la concentration de la solution de lavage en tensioactif.	28
Tableau II. 5 : Evolution du débit extrait en fonction du temps de l'opération.	29
Tableau II. 6 : Valeurs des débits extraits globaux et ceux qui sont dus à la température.....	30
Tableau II. 7 : Calcul des erreurs relatives entre valeurs calculées et mesurés des	32
Tableau II. 8 : Débits d'huile extraits à différents temps de lavage en présence de tensioactif...32	
Tableau II. 9 : Valeurs de la fonction g(C) déterminées expérimentalement.	34
Tableau II. 10 : Débits extraits à différentes températures en présence de tensioactif.	35
Tableau II. 11 : Conditions opératoires des essais de test de la corrélation et erreurs relatives. .37	

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I. 1 : Schéma représentatif des différentes couches constituant le sol.....	4
Figure I. 2 : Structures chimiques de quelques hydrocarbures aromatiques polycycliques.....	8
Figure I. 3 : Quelques méthodes de décontamination	13
Figure I. 4 : Comportement des tensioactifs	16
Figure I. 5 : Structures des différents types de tensioactifs.....	17
Figure I. 6 : Répartition des contaminants organiques hydrophobes et des agents tensioactifs dans un système sol/eau.	18
Figure I. 7 : représentation schématique de l'adsorption de surfactant sur un sol	18

Chapitre II :

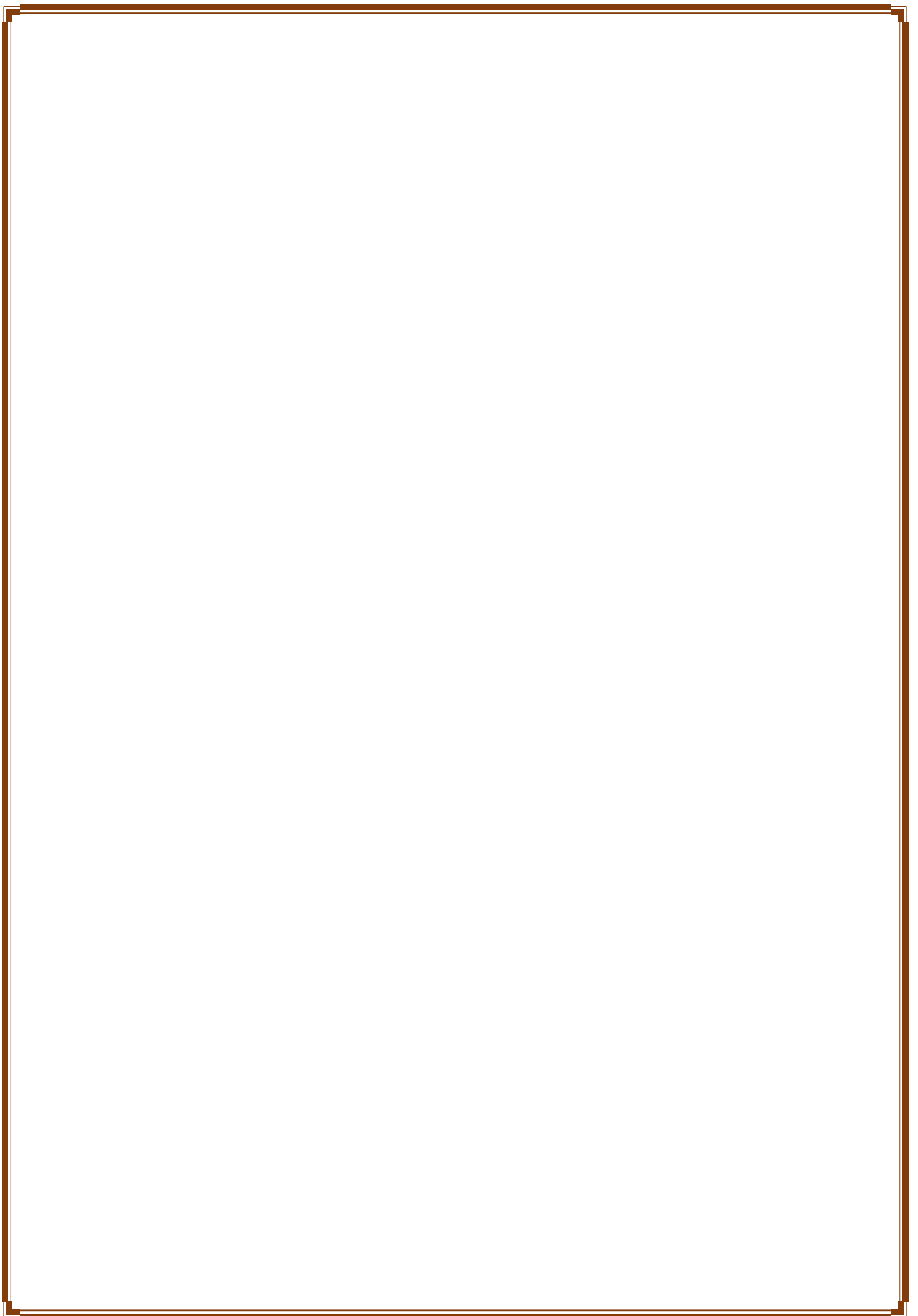
Figure II. 1 : structure chimique du texapon	20
Figure II. 2 : Appareil de fluidisation.....	22
Figure II. 3 : Montage de l'extraction Soxhlet.	23
Figure II. 4 : Montage du rota-vapeur.	24
Figure 2. 5 : Schéma du montage expérimental employé.	25
Figure 2. 6 : Variations du débit extrait en fonction du temps de lavage.....	30
Figure 2. 7 : Evolution du débit extrait dû à la température en fonction de la température....	31
Figure 2. 8 : Evolution du débit d'huile extrait au cours du temps en présence de tensioactif.33	
Figure 2. 9 : Evolution du débit extrait avec la concentration de tensioactif.....	34
Figure 2. 10 Evolution du débit extrait en fonction de la température en présence de tensioactif.	36

Sommaire

Introduction générale	1
 Chapitre I : Analyse bibliographique	
1 Le sol.....	3
1.1 Description du sol.....	3
1.2 Composition du sol.....	4
1.2.1 Matière organique du sol	4
1.2.2 Matière minérale	5
2 Contaminants du sol.....	6
2.1 Caractéristique des hydrocarbures.....	6
2.2 Classification des hydrocarbures	7
2.2.1 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).....	7
2.2.2 Les hydrocarbures aliphatiques	8
2.2.3 Les hydrocarbures Naphténique	9
3 Impacts de la pollution aux hydrocarbures sur l'environnement.....	10
3.1 Impact sur la santé humaine	10
3.2 Impact sur le sol.....	10
3.3 Impact sur la flore.....	11
4 Devenir des hydrocarbures dans le sol.....	11
5 Réhabilitation des sols	12
5.1 L'adsorption (traitement physique)	13
5.2 L'extraction par solvant (traitement physique)	13
5.3 La distillation / pyrolyse (traitement thermique).....	14
5.4 Le procédé biologique	14
5.5 Le lavage (traitement physique)	15
6 Les tensioactifs.....	15
6.1 Propriété des surfactants	16
6.2 Classification des surfactants.....	16
6.3 Principe de fonctionnement des tensioactifs	17
6.4 Adsorption de tensioactif sur le sol	18

Chapitre II : Partie pratique

1. Objectif	19
2. Matériels et méthodes.	19
2.1. Le polluant	19
2.2. Le surfactant	19
2.3. Solvants d'extraction	20
2.4. Le sol	20
2.5. Préparation des échantillons	21
2.6. Présentation des appareils utilisés	22
2.6.1. <i>L'appareil de fluidisation</i>	22
2.6.2. <i>Montage d'extraction solide liquide (soxhlet)</i>	22
2.6.3. <i>Le Rota-vapeur</i>	23
2.7. Mode opératoire.....	24
2.8. Détermination de la quantité des hydrocarbures extraite	26
3. Résultats et discussions des mesures expérimentales.	26
3.1. Effet du temps de lavage.	26
3.2. Effet de la température	27
3.3. Effet de la concentration de tensioactif	27
4. Modélisation du processus.	28
4.1. Première équation (Absence de tensioactif)	29
4.2. Deuxième équation (Présence de tensioactif).....	32
Conclusions et perspectives	38
Références bibliographique.....	40



Introduction générale

De nos jours, les industries pétrolières sont au cœur de la pollution de l'environnement, depuis l'étape de l'extraction du sol jusqu'à la formation de produits finis. Le pétrole peut provoquer plusieurs types de contamination accidentelle ou volontaire lors de son exploitation, sa transformation, son transport et son utilisation. Malgré qu'il est d'une importance capitale dans la vie humaine (production d'électricité, transport, travaux domestique, climatisation, ...), il apporte une très grande contribution à la destruction de son environnement.

De tous les temps, le sol est considéré comme étant capable de se protéger contre toute sorte de pollution par la décomposition des contaminants qui se fait à l'aide des communautés d'organisme ou micro bactérie qu'il contient. C'est pour cette raison que la plupart des industries essaient seulement d'éviter ou de minimiser l'impact de cette pollution sur les eaux et l'air. Avec un tel développement du monde industriel, les déchets rejetés sur le sol sont devenus assez importants au point où le sol n'arrive pas à s'en débarrasser tout seul. La toxicité résultante n'est malheureusement pas ressentie et évaluée à sa juste valeur car la pollution du sol est un phénomène qui n'a pas de conséquences immédiates. C'est n'est que récemment (depuis une trentaine d'années) que l'on a pris conscience de la gravité de ce problème et dès lors, plusieurs études ont été réalisées pour développer des techniques de décontamination telles que les traitements physiques, chimiques, thermique et biologiques.

L'arrivée des entreprises de transformation est certes une bonne chose pour l'homme, mais bon nombres de ses entreprises sont responsables de la complication de sa vie. Cependant, chaque industrie génère des tonnes de déchets toxiques qui suivent des traitements pour éviter leur propagation dans l'atmosphère tout en ignorant leur devenir dans le sol. Cette mauvaise gestion engendre des problèmes de santé publique et d'aménagement du territoire [1]. La contamination des sols est un dangereux problème qui peut avoir des conséquences à long terme. Au début de la contamination, les conséquences peuvent ne pas apparaître, mais au fil du temps, ces contaminants vont s'enfouir dans le sol jusqu'à atteindre les eaux souterraines. Ainsi l'eau sera non seulement contaminée mais aussi elle contribuera à accélérer la vitesse de la propagation du contaminant causant une catastrophe écologique [2].

Le sol pollué se caractérise par un appauvrissement de son réseau trophique lié à la perte de sa biodiversité. Certains organismes contribuent à la restauration du sol par la décomposition des matières organiques, mais à une certaine concentration de ces matières, ou bien en présence d'autres polluants, ces organismes vont fuir. Du coup, cet endroit abandonné sera privé de la fonction de ces organismes et une accumulation de matière organique sur une zone bien localisée dans un terrain est un indice pratiquement certain d'un dépôt de polluant. Par conséquent, la pollution devient plus intense. [3].

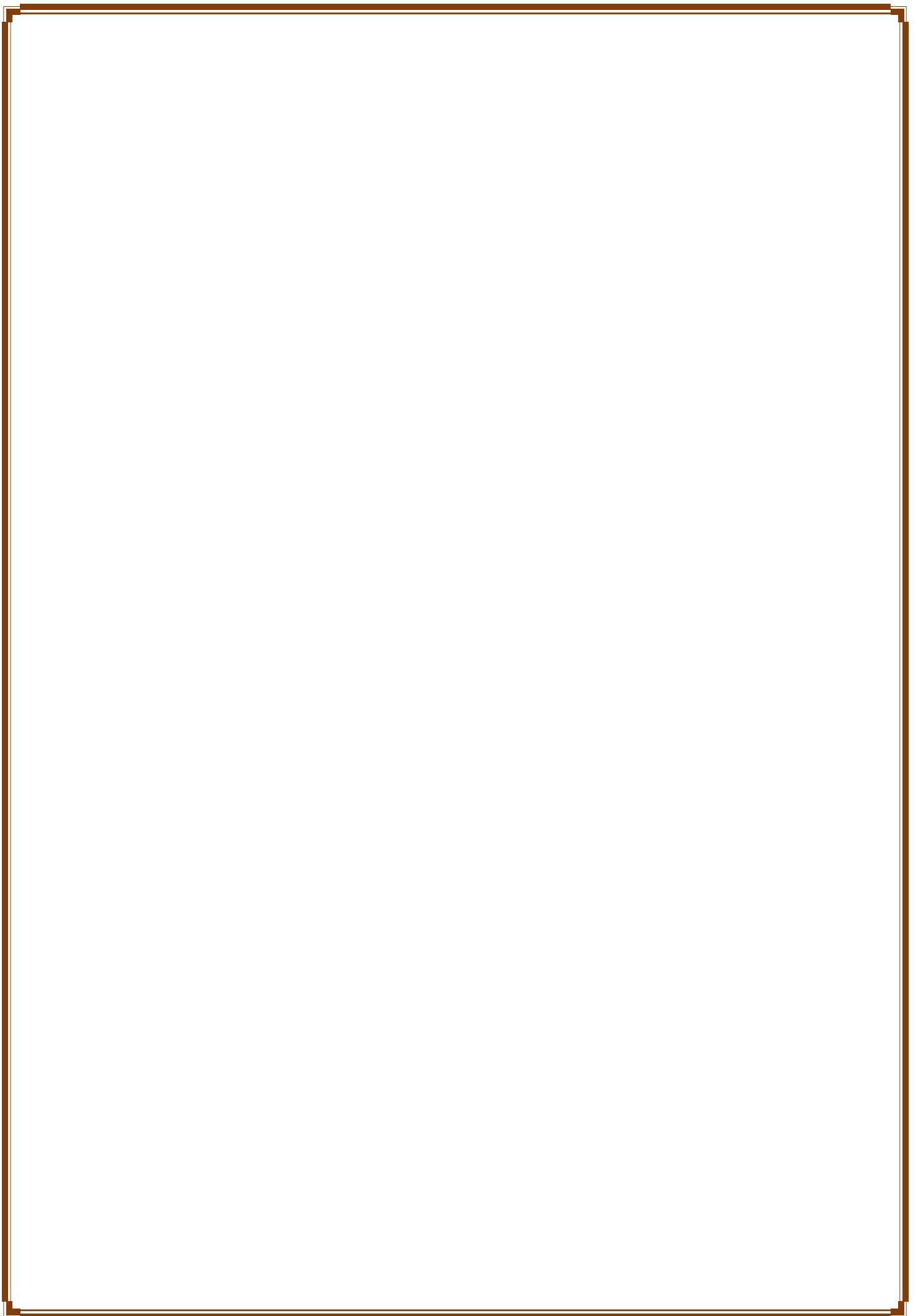
L'Algérie se trouve parmi le top 20 pays les plus producteurs du pétrole dans le monde entier en 2019, et est aussi le premier producteur de gaz naturel en Afrique. Ceci implique la présence de plusieurs industries pétrolières qui constituent des sources importantes de la pollution de ses terres par les hydrocarbures [4].

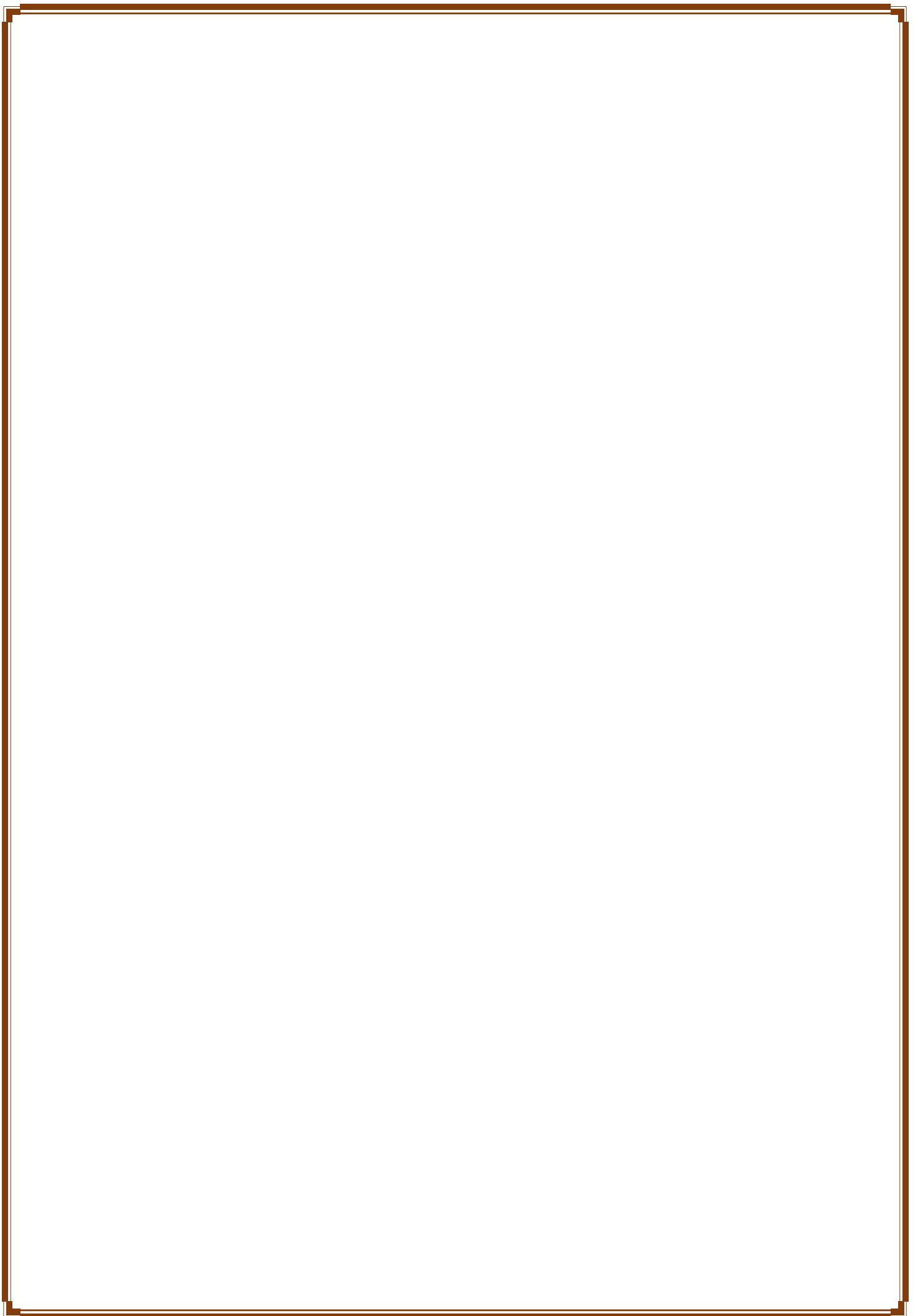
Pour toutes les raisons citées ci-dessus, la dépollution des sols s'avère être une nécessité absolue pour la survie des êtres vivants car après tout, le sol est certainement le composant de l'environnement le plus mal connu alors qu'il constitue le support direct de la plupart des activités humaines. [5]. Ce travail sera porté sur une des méthodes physiques de décontamination, qui n'est autre que le lavage des sols pollués par des hydrocarbures. Cette méthode a été choisie parce qu'elle est à la fois économique et écologique. Son caractère écologique est dû au fait qu'elle permet d'obtenir un sol dépollué (avec un taux de polluant inférieur à 5%) permettant de préserver l'environnement. Son impact et son caractère économique s'explique par le fait que la mise en place d'un tel procédé est moins coûteux, facile à appliquer et les hydrocarbures extraits peuvent à nouveau être utilisés. De plus, dans le sud de l'Algérie les eaux souterraines sont assez chaudes pour obtenir un bon rendement de dépollution sans nécessité d'apport énergétique externe.

Le présent mémoire est composé de deux grandes parties et une conclusion générale, à savoir :

Une partie théorique dans laquelle nous allons parler du sol avec ses différentes couches, du pétrole brut et de ses constituants, des surfactants, des polluants organiques ainsi que leur devenir dans le sous-sol et de quelques méthodes applicables pour la dépollution des sols.

Une partie pratique qui est subdivisée en deux sous parties. D'une part, on va présenter des résultats obtenus après avoir réalisé des expériences de lavage de sol dans un procédé continu en lit fluidisé tout en variant la température et la concentration du surfactant de la solution de lavage ainsi que le temps du lavage. D'autre part, on va analyser l'effet de ces trois paramètres et établir des modèles mathématiques, c'est-à-dire des corrélations capables de représenter correctement l'ensemble des effets observés.





Chapitre I : Analyse bibliographique

1 Le sol

Le sol représente la couche superficielle de la croûte terrestre qui possède des caractères minéralogique, morphologique et des propriétés physico-chimiques qui dépendent de son origine [6]. Son épaisseur varie entre quelque centimètre et deux mètres, et peut même atteindre des dizaines de mètres dans les zones tropicales. Le sol est issu de la décomposition de la roche mère et représente aussi un milieu poreux très bien organisé avec un degré de vide qui est aux alentours de 50 %. Ce vide est généralement occupé par de l'eau ou de l'air et constitue un milieu de vie pour les racines, la faune ou les microflore [5].

1.1 Description du sol

Le sol est subdivisé en plusieurs types des couches parallèles à la couche superficielle appelées horizons, qui diffèrent selon leur : structure, couleur, porosité, texture, racine, et autres forme d'activité biologique [7]. Le sol est donc une succession des horizons superposés horizontalement. Mis à part la couche superficielle, le sol est généralement composé de trois types d'horizons (A, B, C) et le sous-sol qui constitue l'horizon R. Cela est montré sur la figure I.1.

Horizon A : (litière) horizon de la surface, riche en matière organique (débris des végétaux) et minérale. Cet horizon superficiel occupe la partie supérieure du sol et est couvert des végétaux et structuré par l'activité biologique (faune, racines) [1 ; 6].

Horizon B : (l'humus), situé en dessous de l'horizon A, il est différent de celui-ci par sa couleur, sa structure et la nature de ses constituant. Il est aussi caractérisé par sa plus grande teneur en argile ou en fer et en humus (des résidus végétaux et animaux) [8]. Cet horizon est un horizon d'accumulation parce que plusieurs éléments entraînés par l'eau se bloquent à ce niveau et viennent l'enrichir. Il est généralement plus coloré car il présente des accumulations de fer, d'argile voire de matière organique. C'est un horizon intermédiaire qui apparait dans les sols évolués [1].

Horizon C : (la couche minérale) cette couche est majoritairement composée de la matière minérale. Elle est le produit direct de la décomposition (chimique, physique et biologique) de la roche mère. Elle peut aussi être considérée comme la zone de transition vers la roche mère [1]. Elle est généralement sableuse, dur ou argileuse.

Horizon R : il représente le sous-sol qui est constitué de la roche mère avant sa décomposition.

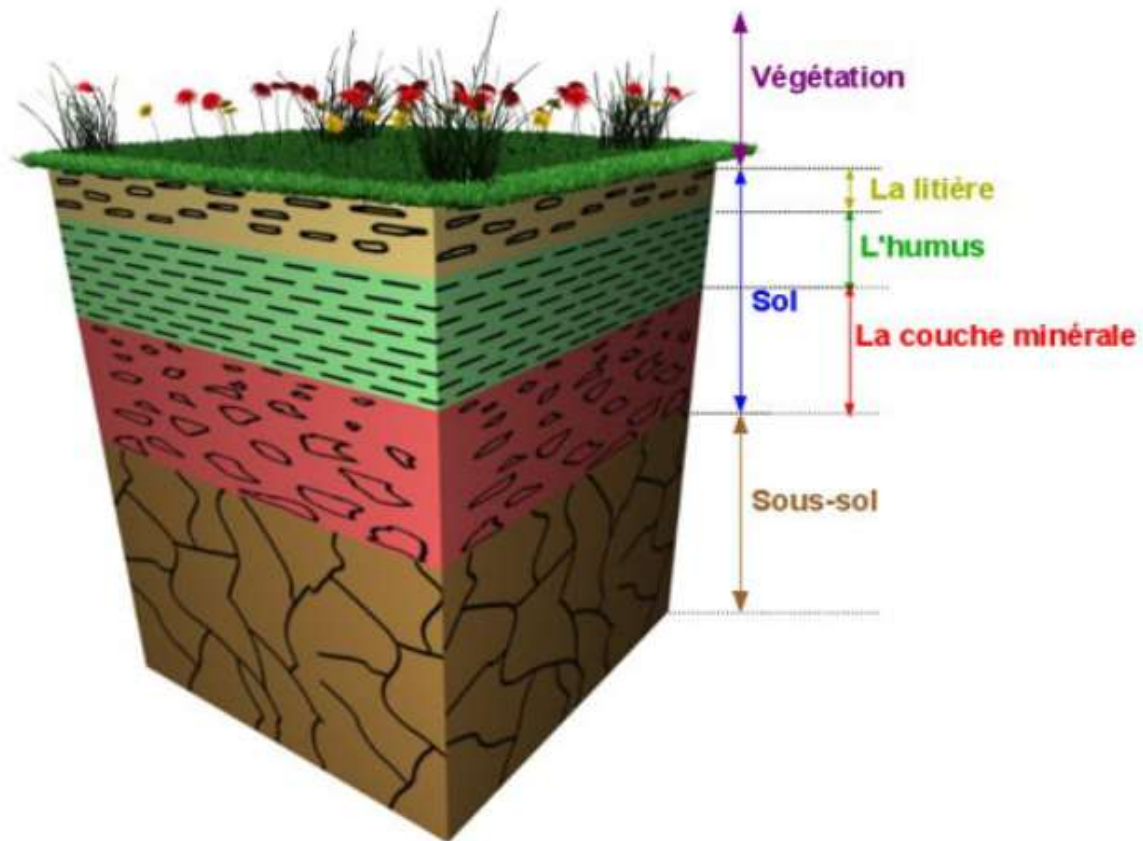


Figure I. 1 : Schéma représentatif des différentes couches constituant le sol.

1.2 Composition du sol

Le squelette du sol est constitué de la matière organique et de la matière minérale dont la chaire est représentée par de l'eau et de l'air et qui constituent un excellent milieu de vie pour des centaines des millions d'organismes vivant [9].

1.2.1 Matière organique du sol

Malgré qu'elle ne représente que quelque pourcent (5 à 10 %) de la composition du sol, la matière organique du sol joue un rôle essentiel du point de vue de sa fertilité [6]. Elle tire son origine des débris d'animaux et végétaux en décomposition. Elle est généralement retrouvée sous deux formes : la forme liée et la forme libre. La matière organique liée est celle qui est liée à la fraction minérale et ne peut pas être séparé par des moyens mécaniques. Cette partie est appelée MOS (matières organiques des sols) ou humus. La matière organique libre est donc celle qui est liée à la fraction minérale mais peut être séparé par des moyens physiques, correspondant essentiellement aux débris végétaux (racines mortes, résidus culturels divers).

Le contenu en matière organique des sols dépend de la végétation, des facteurs climatiques, de la texture du sol, des conditions topographiques influençant le microclimat et le drainage et des pratiques culturales [6]. Elle est composée d'éléments principaux dont l'hydrogène (H), le carbone

(C), l'oxygène (O) et l'azote (N) ainsi que d'éléments secondaires tels que le phosphore (P), le soufre (S), le calcium (Ca), le potassium (K), le magnésium (Mg), ainsi que des oligoéléments. Le carbone organique du sol (COS) qui comprend notamment les substances humiques est le principal constituant de cette matière organique. Il représente deux fois plus de carbone que celui contenu dans l'atmosphère et trois fois plus que celui dans la végétation [10].

1.2.2 Matière minérale

Le sol est composé de particules minérales subdivisées en deux grandes familles : une famille des constituants primaires qui provient de la roche mère tels que le silicate et le carbonate, et une deuxième famille qui est celle des constituants secondaires minéraux qui sont formés lors de la pédogenèse à partir des minéraux primaires. Ce sont les argiles, les oxydes et les hydroxydes [5]. Tous ces constituants sont caractérisés par un diamètre différent. Les particules dont les diamètres sont supérieurs à 2 μm comme les graviers, les cailloux, sables et limons représentent le squelette du sol et n'interagit pas directement avec les êtres vivants. Par contre ils jouent un rôle très important en déterminant la texture, la structure, et la porosité du sol, et en libérant des éléments minéraux plus fins par l'effet d'érosion [10]. Dans le tableau I.1, les caractéristiques granulométriques des différentes fractions sont présentées.

Tableau I. 1 : Caractérisation des différentes classes granulométriques.[1]

Type de particules		Diamètre des particules
Argile		< 2 μm
Limons fins		2 μm - 20 μm
Limons grossier		20 μm - 50 μm
Sables fin	Sable fin 1	50 μm - 100 μm
	Sable fin 2	100 μm - 200 μm
Sables grossier	Sable grossiers 1	200 μm - 500 μm
	Sable grossiers 2	500 μm - 1mm
	Sable grossiers 3	1mm - 2mm
Eléments grossiers	Gravier	2mm - 20mm
	Cailloux	>20mm

La fraction fine concerne les éléments minéraux dont le diamètre est inférieur à 2 μm . Elle inclut l'argile et les matières colloïdales et intervient directement dans les processus chimiques et biologiques du sol en interagissant avec les plantes, animaux et microorganismes [10].

2 Contaminants du sol

Les composés organiques et les métaux sont des contaminants du sol les plus préoccupants. Cependant, les contaminants organiques sont beaucoup plus préoccupants que les métaux suite à leurs nuisances multiples (odeur, couleur et problème d'inflammation) [11]. Ce sont généralement des hydrocarbures, des pesticides et des polychlorobiphényles et sont dispersés dans la nature à travers les activités humaines de nature industrielle (production d'énergie, industrie chimique), urbaine (transport, gestion et traitement des déchets) et agricole [12]. L'Algérie est un pays dont la plus grande partie de l'économie repose sur le pétrole. Vu qu'il est composé en plus grande partie des hydrocarbures, beaux nombres d'études sont concentrés sur les polluants organiques liés à cette source d'énergie.

Le pétrole brut appelé aussi Or noir ou huile de pierre est la source d'énergie la plus importante dans le monde. Il est constitué d'un mélange très complexe de composés organiques qui sont produits sur terre et contient en grande partie des hydrocarbures. Sa composition en hydrocarbure dépend de son origine et les conditions de son raffinage [13]. Les hydrocarbures sont des composés organiques constitués majoritairement de carbone et d'hydrogène avec une formule chimique : C_nH_m où n et m sont des entiers naturels. On trouve souvent quelques atomes d'oxygène, d'azote et de soufre et l'ensemble constitue le pétrole brut dont la fraction de ses composants dépend du gisement d'exploitation [10]. Les hydrocarbures pétroliers sont les constituants de la plupart des mélanges combustibles, carburants et lubrifiants. Leur présence dans un sol contaminé est liée aux industries de raffinage et de transformation, à leur stockage, leur transport et leur distribution. On note aussi des pollutions par les sous-produits rejetés (notamment les huiles usagées) [1].

2.1 Caractéristique des hydrocarbures

Les caractéristiques physico-chimiques d'un pétrole brut dépendent fortement de son origine. Néanmoins, certains bruts présentent quelques différences même étant sortie du même gisement. Les caractéristiques les plus importantes du pétrole sont les suivantes :

La densité : Elle représente le rapport entre la masse et le volume, elle permet donc de faire la différence entre les hydrocarbures lourds et légers. Elle augmente lorsque le rapport atomique H/C diminue et diminue dans les cas suivants : interaction des molécules d'hydrocarbure avec le sol, évaporation des composés volatils et augmentation de la température. La densité du pétrole varie de 0,7 à 1 et peut aussi être exprimée en degrés API^o (American petroleum institute). Dans ce cas elle varie de 5 à 70. [14]

La viscosité : Elle est considérée comme étant la mesure de la résistance d'un fluide lors de son écoulement. Elle dépend fortement de la température et agit directement sur le processus

d'évaporation des hydrocarbures. En effet, plus la température est basse, plus la viscosité est élevée et moins les hydrocarbures pétroliers ont tendance à s'évaporer ou à se propager rapidement au niveau du sol [14]. Les hydrocarbures légers (C5 à C10) ont une viscosité inférieure à 1 cP, les plus lourds (C12 à C26) ont une viscosité qui croît avec la masse (1 à 6 cP) [1].

La solubilité : C'est la capacité d'une substance à se dissoudre dans une autre substance. Les hydrocarbures légers sont plus solubles que les hydrocarbures lourds, donc les pétroles sont moins solubles lorsque leur fraction en hydrocarbures lourds est plus importante. La solubilité des hydrocarbures pétroliers peut être considérée comme étant un facteur important à leur biodisponibilité face aux attaques microbiennes. Les techniques d'amélioration à la biodisponibilité des hydrocarbures pétroliers par des adjuvants comme les surfactants sont d'un grand avantage dans la bio remédiation des sols [14].

La tension superficielle : C'est la force de répulsion ou d'attraction qui s'exerce à l'interface entre l'eau et l'hydrocarbure. La Tension superficielle et la viscosité sont d'une grande importance pour évaluer la vitesse de la propagation des hydrocarbures sur l'eau. L'augmentation de la température entraîne la chute de la tension superficielle et les hydrocarbures se propagent plus facilement dans l'eau chaude [14].

Exemple : Le pétrole brut Algérien qui provient du gisement de Hassi Messaoud possède les caractéristiques suivantes : masse moléculaire $M = 160$ g/mol. Densité = 0,797. Température de congélation $T = -60^{\circ}\text{C}$. Profondeur moyenne : 2300m ; Température au fond : 200°C . Pression du gisement : 100 g/cm². Viscosité à 293.15 K égale à 3,87 cP. Salinité : 10,3 mg/l. Composition de la phase huile en pourcentage massique: Carbone (84-87%) ; Hydrogène (12-14%) ; Soufre (<5%) ; Oxygène (<1,5%) ; Azote (<2%). Composition du gaz associé au brut en pourcentage massique: Carbone (75%), Hydrogène (25%).

2.2 Classification des hydrocarbures

Les hydrocarbures pétroliers peuvent être classés en trois grandes familles selon la nature de leur structure, en l'occurrence les hydrocarbures aliphatiques, naphthéniques et aromatiques polycycliques [10].

2.2.1 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Ce sont des composés organiques neutres, ne contenant que des carbones et des hydrogènes avec une structure moléculaire comprenant au moins deux noyaux benzéniques fusionnés dans un arrangement angulaire, linéaire, ou en grappe. Leur masse moléculaire variant de 128 à plus de 300 g/mol, il existe plusieurs types de ces composés qui diffèrent par le nombre de noyaux aromatique qu'ils possèdent ou par leur position. Généralement, les hydrocarbures aromatiques

sont considérés comme étant des composés hydrophobes et non-volatiles. Ces propriétés justifient leur tendance à s'adsorber sur les particules de sol. Les HAP proviennent des sources naturelles (feux de forêt, activité volcanique, processus géochimique...) et anthropique (combustion incomplète, pyrolyse, fonctionnement des moteurs à essence ou diesel...). La forte exploitation des industries pétrolières est en grande partie la véritable cause de la contamination des sols par ces polluants, et la majeure partie des contaminants retrouvés dans le sol sont ceux qui possèdent 5 à 6 noyaux aromatiques [10 ;11]. Sur la figure I.2 sont présentés quelques exemples de ces composés.

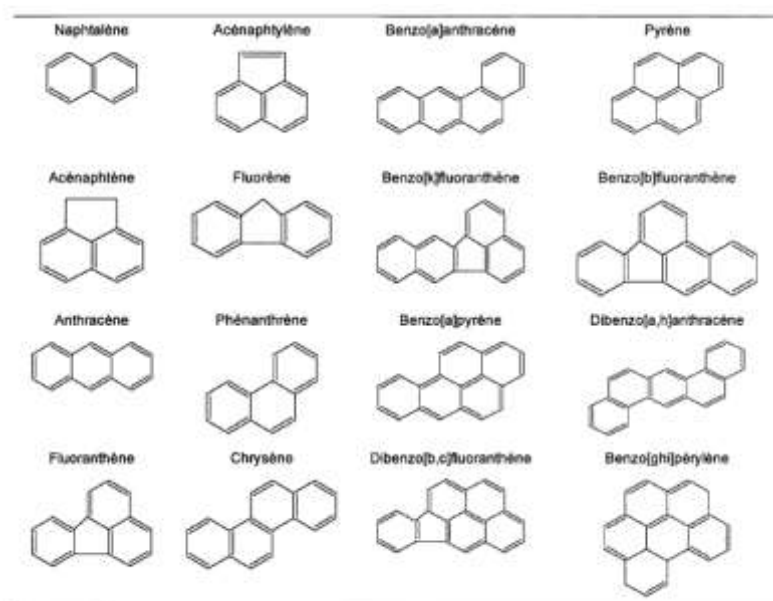


Figure I. 2 : Structures chimiques de quelques hydrocarbures aromatiques polycycliques.

2.2.2 Les hydrocarbures aliphatiques

Les hydrocarbures aliphatiques sont ceux qui comprennent des groupes non cycliques contenant au moins une ou plusieurs liaisons covalentes entre deux atomes de carbone avec une chaîne linéaire ou ramifiée [14]. Ce sont des composés à chaîne ouverte constituant la série acyclique désignée par le terme « corps gras ». Suivant la nature des liaisons entre les carbones, on subdivise cette série en composés saturés et composés insaturés. Les composés saturés sont des molécules constituées de chaînes carbonées à simples liaisons entre eux. Ils constituent une des classes les plus abondantes (10 à 40 %) des hydrocarbures totaux d'un pétrole brut [10]. Quelques exemples sont reportés dans le tableau I.2.

Tableau I. 2 : Quelques composés saturés.[1]

Nombre de carbones	volatile	Nom	Utilisation actuelle
C1	Gaz	Méthane	Chauffage, énergie.
C2	Gaz	Ethane	Chauffage, énergie.
C3	Gaz	Propane	GPL
C4	Gaz	Butane, naphtas	GPL
C5-C7	Oui	Naphta	Pétrochimie
C5-C10	Liquide	Essence	Carburant, solvant
C9-C20	Liquide	Kérosène Gas-oil	Carburant, chauffage
C12-C20	Liquide	Huiles	Lubrifiants
C14-C26	Non	Gas-oil lourd	Production électrique, moteur
C20-C40	Non	Goudron	Revêtement routier.

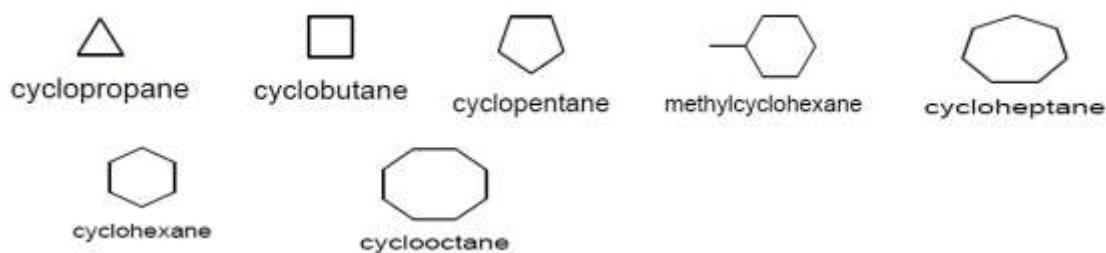
Les composés non saturés possèdent au moins une double liaison Carbone – Carbone ou une triple liaison Carbone – Carbone. Quelques exemples sont reportés dans le tableau I.3.

Tableau I. 3 : Quelques composés aliphatiques non saturés.

Monomère	Polymère	Applications
Éthylène $\text{CH}_2=\text{CH}_2$	Polyéthylène (PE) $\{ \text{CH}_2-\text{CH}_2 \}_n$	Emballage d'aliments, films plastiques flacons, bidons...
Propène $\text{CH}_2=\text{CH}$ CH_3	Polypropylène $\{ \text{CH}_2-\text{CH} \}_n$ CH_3	Objets moulés résistants, récipients valises, pare-choc...
Chlorure de vinyle $\text{CH}_2=\text{CH}$ Cl	Polychlorure de vinyle (PVC) $\{ \text{CH}_2-\text{CH} \}_n$ Cl	Tuyau, canalisations, bouteilles Volets...
Styrène $\text{CH}_2=\text{CH}$ C_6H_5	Polystyrène (PS) $\{ \text{CH}_2-\text{CH} \}_n$ C_6H_5	Casiers de réfrigérateurs, mobilier transparent, jouets...
Acrylonitrile $\text{CH}_2=\text{CH}$ CN	Polyacrylonitrile (PAN) $\{ \text{CH}_2-\text{CH} \}_n$ CN	Fibres synthétiques, vêtements,...

2.2.3 Les hydrocarbures Naphténique

Ce sont des composés à chaînes fermées saturés renfermant des formes monocycliques. Deux ou plusieurs cycles peuvent se condenser entre eux pour donner des hydrocarbures polycycliques. Ils sont en général peu toxiques, mais plus abondants que les aliphatiques et moins que les composés aromatiques. Certains produits (Stérant, Trope) sont parfois utilisés comme témoins d'une contamination pétrolière. Ci-dessous quelques exemples :



On trouve aussi des naphènes formés par la juxtaposition de deux cycles (ou plus) de six atomes de carbone :



3 Impacts de la pollution aux hydrocarbures sur l'environnement

A cause de leurs utilisations massives, Les produits pétroliers deviennent de plus en plus une source importante des contaminants organiques qui touchent le sol. Ces polluants conduisent à des altérations écologiques, principalement la perte d'organismes clés d'une communauté et la prolifération d'espèces opportunistes au sein des habitats affectés [10].

3.1 Impact sur la santé humaine

Les plantes cultivées sur un sol pollué absorbent une grande partie de la pollution et la transmettent ensuite à travers la chaîne alimentaire jusqu'à arriver à l'homme. Une exposition à long terme à un sol pollué peut affecter la constitution génétique du corps par l'intermédiaire de mutations, provoquant ainsi des problèmes de santé chroniques et des maladies congénitales qui sont très difficile à guérir. Le bétail peut être sujet à des maladies dans une large mesure et provoquer une intoxication alimentaire sur une longue période. La pollution des sols peut même conduire à des famines généralisées si les plantes ne peuvent plus y pousser. Les polluants dans les sols urbains peuvent pénétrer dans le corps humain par absorption cutanée et inhalation de poussière, etc., et ainsi nuire directement et en particulier à la santé des enfants. Ils affectent également la qualité de l'environnement et nuisent indirectement à la santé humaine en polluant la nourriture, l'eau et l'atmosphère [10].

3.2 Impact sur le sol

La présence des hydrocarbures dans le sol augmente sa concentration en composés organiques et cette augmentation peut affecter ses propriétés physiques et chimiques comme le pH et la température. Cela provoque généralement un environnement anaérobie en bloquant la circulation de l'air dans les pores du sol et affecte ainsi les communautés microbiennes qui y vivent et empêche l'infiltration d'eau qui est nécessaire à la croissance des plantes [10 ;13].

3.3 Impact sur la flore

La forte concentration des composés organiques dans le sol affecte l'équilibre du système écologique. Un grand nombre de plantes sont incapables de s'adapter lorsque les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol changent brusquement. Les bactéries et les champignons trouvés dans le sol qui jouent un rôle important dans le maintien de sa texture et structure commencent à s'évader, causant ainsi un problème supplémentaire d'érosion. La fertilité du sol diminue lentement, ce qui la rend impropre à l'agriculture et empêche toute végétation locale de survivre. La pollution du sol rend une très grande surface de terres incultivables. Contrairement aux déserts, qui conviennent à la végétation indigène, ces terres ne peuvent pas supporter la plupart des formes de vie. La faible concentration de polluants dans un sol n'affecte pas la croissance des plantes, mais à partir d'une certaine concentration qui dépasse le seuil de tolérance, elle conduit à leur empoisonnement puis à leur mort [13].

4 Devenir des hydrocarbures dans le sol

La croissance démographique et le développement économique et industriel que le monde d'aujourd'hui a connu n'a fait que croître la consommation d'énergie pétrochimique surtout les hydrocarbures. Le déversement volontaire ou involontaire des produits industriels suite à des fuites des réservoirs de stockages, du lessivage de déchets des décharges ou des rejets directs des déchets industriels dans le sol entraînent une pollution locale ou diffuse très dangereuse. La contamination du sol par les hydrocarbures engendre une dégradation de certaines propriétés physiques et chimiques du sol et réduit sa fertilité, sa perméabilité sa biodiversité... [10 ;13]. Une fois arrivés au sol, ces polluants vont se partager entre les phases solide, liquide et gazeux [12].

Dans la phase gazeuse : Il s'agit de l'atmosphère. Les hydrocarbures vont se retrouver dans l'atmosphère à travers le phénomène de la volatilisation. Ce phénomène dépend de plusieurs paramètres tels que : les gradients de concentration du produit dans le mélange initial, la pression de vapeur de chaque composé, la composition même de ce mélange ainsi que d'autres paramètres physiques comme les conditions de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité. La volatilité des hydrocarbures dépend également de leurs nombre d'atomes de carbone et surtout du type d'hydrocarbure (légers ou lourds). La volatilisation se produit non seulement sur les hydrocarbures de surface mais elle peut aussi se produire dans le sous-sol [13].

Dans la phase liquide : Dans ce cas, les hydrocarbures sont emportés par les eaux. La fraction liquide du sol provient essentiellement de la pluie, des apports humains et/ou de la dissolution de la roche et des matières organiques. Cette fraction est généralement constituée de l'eau du sol et quelques éléments solubles dans l'eau, des corps minéraux tels que les bases, les acides ou les sels

en partie dissociés et des corps organiques comme des alcools ou des acides organiques. Le mélange d'eau et d'hydrocarbures qui atteint le sol peut s'écouler à sa surface et élargir la surface de pollution ou bien s'infiltrer pour atteindre la nappe phréatique et polluer cette source d'eau. La réalisation de l'un de ces événements dépend de la nature du sol et de la quantité de chaque élément qu'il contient, il peut donc être filtrant ou perméable [1].

Dans la phase solide : Dans le sol les hydrocarbures sont soumis à plusieurs types de processus de dégradation chimique, physique et biologique qui vont déterminer leur devenir dans le sol. Ce processus est complexe, dynamique, hétérogène et évolue avec le temps. Ce dynamisme vivant, le plus souvent caractérisé par des phénomènes abiotiques (évaporation, etc.) et biotiques (biodégradation, etc.) dépendent beaucoup des propriétés intrinsèques du sol, des conditions environnementales, de la composition chimique et des propriétés physiques des hydrocarbures. Les phénomènes abiotiques sont ceux qui participent majoritairement à la dégradation des hydrocarbures légers tandis que les phénomènes biotiques agissent plutôt sur les plus lourds. Les différents processus naturels d'altération des hydrocarbures sont la volatilisation, l'adsorption et la biodégradation [15]. Les hydrocarbures adsorbés par le sol constituent les hydrocarbures disponibles dans le sol et ils peuvent être altérés par le système d'altération naturelle du sol qui fait intervenir les micro-organismes tout comme ils peuvent s'enfouir jusqu'à atteindre les eaux des nappes et de drainage [12].

Les hydrocarbures sont composés essentiellement d'atome de carbone et d'hydrogène et représentent une plus grande partie du pétrole brut exploité dans le sud de l'Algérie. En effet, sachant que les hydrocarbures constituent une véritable source de contaminants du sol et qu'ils sont fortement exploités, manipulés et traités en Algérie, la recherche et le développement des techniques de décontamination des sols pollués par des hydrocarbures constitue une priorité absolue afin de minimiser ou d'éviter les conséquences que ce phénomène peut engendrer.

5 Réhabilitation des sols

La Réhabilitation des sols est un processus qui a pour objectif de traiter un site contaminé afin de lui redonner sa qualité et ses fonctions initiales. Ce processus dépend de la nature des contaminants, des caractéristiques du site et des objectifs de travail. Plusieurs types de techniques peuvent être employées de façon *ex situ* ou *in situ* afin d'extraire complètement ou de minimiser la concentration des contaminants (voir la figure I.3). Les traitements *ex situ* sont ceux qui nécessitent l'extraction physique du milieu contaminé et un déplacement vers un autre endroit, alors que les traitements *in situ* se font directement sur place. Ces deux types de traitements ont bien évidemment des avantages et des coûts qui leur sont propres [15]. Plusieurs techniques de

décontamination de sols ont vu le jour et sont classés en trois grandes familles qui sont : Des traitements physiques au cours desquels le contaminant est collecté et déplacé sans être modifié. Des traitements biologiques qui consistent à améliorer les conditions de vie des microorganismes vivant dans le sol afin d'augmenter et d'accélérer leur activité qui n'est autre que la biodégradation des polluants. Des traitements thermiques qui constituent en l'élévation de la température du sol contaminé afin de détruire le polluant et de l'extraire.

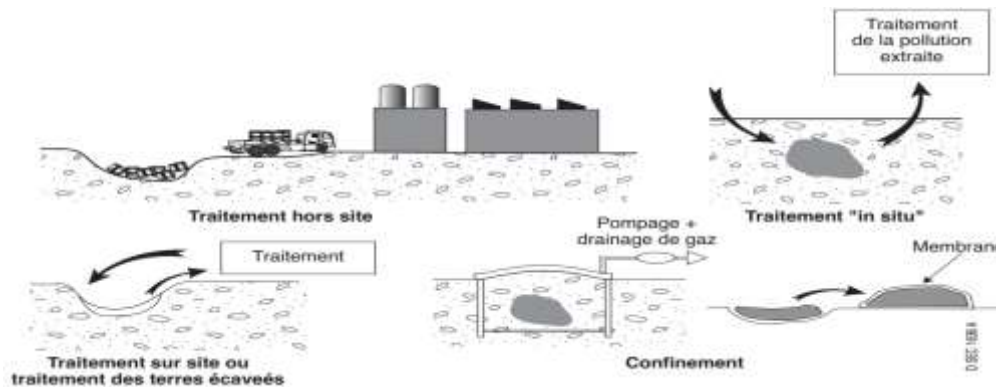


Figure I. 3 : Quelques méthodes de décontamination.[1]

5.1 L'adsorption (traitement physique)

Le principe de cette méthode est de mélanger le sol contaminé avec un adsorbant tel que le charbon. Le mélange obtenu est ensuite introduit dans de l'eau à haute température puis agité. Cette augmentation de température va baisser la tension inter-faciale entre le charbon d'un côté et l'eau et l'huile de l'autre côté. Après un certain temps d'agitation, l'adsorbant va adsorber les hydrocarbures contenus dans le sol après leur solubilisation. Après refroidissement, le charbon huilé peut être séparé du sol et de l'eau grâce à la différence de densité. Cette technique est un peu moins coûteuse, et le charbon récupéré peut aussi être utilisé dans des centrales électriques [16].

5.2 L'extraction par solvant (traitement physique)

Les solvants à bas points d'ébullition peuvent être utilisés pour extraire les hydrocarbures des solides. Le solvant d'extraction sous forme de gaz liquéfié, comme le dioxyde de carbone, le propane, l'éthane et le butane est utilisé pour laver le sable huilé puis séparé. La pression du mélange liquide obtenu est ensuite abaissée afin que le solvant retrouve son état de départ (gazeux) et laisse derrière lui les hydrocarbures récupérés. Ce procédé est un peu coûteux mais il présente un bon rendement, moins de risques comparé aux procédés thermiques et est plus efficace pour les sables contenant peu d'argile [16].

5.3 La distillation / pyrolyse (traitement thermique)

De son caractère très énergivore, cette technique demeure la moins économique. Tout comme le procédé de distillation ordinaire, cette technique aussi consiste à chauffer le sol pollué dans un four jusqu'à l'évaporation (température de chauffage peut atteindre 420 °C). Les hydrocarbures légers et intermédiaires qu'il contient vont s'évaporer. La vapeur produite est récupérée par un balayage de l'azote ou de la vapeur d'eau. Après refroidissement du mélange gazeux récupéré, l'hydrocarbure peut être séparé de l'eau afin qu'il puisse être utilisé. En dehors de son coût énergétique élevé, cette technique présente d'autres désavantages, à savoir : La vapeur des hydrocarbures à une température très élevée présente le risque de l'incendie, provoque une pollution atmosphérique et une corrosion des équipements. Par ailleurs, la haute température risque de détruire les structures chimiques des hydrocarbures et la formation des cokes. Si le sol contient des hydrocarbures lourds, ils seront transformés en goudrons et restent dans le sable sous forme des résidus [16].

5.4 Le procédé biologique

Les éléments clés de cette technique de dépollution sont des microbes tels que les champignons et les bactéries qui sont déjà présents dans le sol. Ils ont le pouvoir de consommer les hydrocarbures et de les transformer en dioxyde de carbone et en eau. Cette dégradation biologique peut être améliorée en fournissant les conditions optimales pour la croissance des microbes. L'amélioration de la dégradation biologique est appelée bio remédiation. L'efficacité et la rapidité de la bio remédiation dans la dégradation des hydrocarbures dépendent de diverses conditions environnementales, notamment la température, la salinité, le pH, le type d'hydrocarbure, la concentration de métaux lourds, la texture du sol, la teneur en humidité et la concentration d'hydrocarbures. L'oxygène est également nécessaire pour la bio remédiation afin de convertir les hydrocarbures en dioxyde de carbone et en eau. La dégradation biologique anaérobie (sans oxygène) se produit également, mais elle est beaucoup plus lente et moins efficace que la dégradation aérobie. L'oxygène est normalement fourni en s'assurant que le système de pores dans les solides est suffisamment ouvert pour que l'air puisse le traverser. Pour une dégradation optimale, la teneur en eau des solides doit être équilibrée. S'il n'y a pas assez d'eau, la croissance bactérienne sera inhibée. Si trop d'eau est présente, l'accès de l'oxygène et des nutriments aux bactéries sera limité, inhibant à nouveau la croissance bactérienne. La vitesse de dégradation des hydrocarbures dépend de la structure de la molécule d'hydrocarbure et du type de bactéries impliquées. Elle est souvent mesurée en termes de demi-vies de l'hydrocarbure, c'est-à-dire le temps pour que la moitié de l'hydrocarbure soit biologiquement dégradée. Ce temps de demi-vie va de quelques jours pour les composés de faibles poids moléculaire à plusieurs années pour les

composés complexes. La limitation la plus importante pour de nombreuses applications de bio remédiation est un manque de nutriments pour la croissance bactérienne. Ces nutriments, par exemple l'azote, le phosphore et certains oligo-éléments, peuvent être ajoutés sous forme d'engrais. Cependant, Il existe un certain nombre de difficultés en appliquant la bio remédiation aux sites contaminés par des hydrocarbures car la présence de solides dissous, tels que des métaux lourds ou du sel dans les fosses de réserve, inhibera la croissance bactérienne. Les projets de bio remédiation peuvent émettre des niveaux importants de polluants atmosphériques. Par exemple, les taux d'émission de benzène et de naphthalène peuvent être suffisamment élevés pour exiger que les travailleurs portent des masques. Enfin, certaines installations de bio remédiation ont nécessité de grandes quantités d'eau, ce qui peut être un problème dans les zones arides [16].

5.5 Le lavage (traitement physique)

A cause de sa faible demande en énergie, cette technique est considérée comme la plus économique et fait aussi partie des techniques les plus efficaces d'où son utilisation dans des industries d'assainissement. Ce procédé consiste à laver le sable contaminé avec de l'eau en utilisant un système de lit fluidisé ou un tube agité dans lequel on met le mélange. Lors de cette agitation, les molécules d'eau vont arracher la couche des hydrocarbures qui couvre les grains de sable. On peut aussi améliorer l'efficacité de cette technique en ajoutant un agent tensioactif qui va augmenter la mobilité et la solubilité des hydrocarbures lors du lavage ou encore augmenter la température de l'eau qui aura pour effet de diminuer la viscosité [17]. Ces paramètres ont pour but de réduire la tension inter-faciale entre l'eau et l'huile favorisant le processus d'extraction des hydrocarbures. Après le lavage, le mélange d'eau et d'hydrocarbure récupéré peut être séparé grâce à une technique de séparation des liquides et l'hydrocarbure peut être récupéré pour une utilisation ultérieure [16].

Avant de choisir une de ces techniques, plusieurs paramètres sont à étudier tel que : les exigences administratives et économiques, le degré et la nature de pollution, les objectifs de la dépollution, le volume et la superficie du site pollué, la stabilité des substances à extraire ...etc. [18].

6 Les tensioactifs

Les tensioactifs, appelés aussi surfactants ou encore agents de surface, sont des molécules amphiphile (composé chimique) capable de déclencher une activité particulière aux interfaces conduisant à l'abaissement de la tension de surface entre les deux phases ainsi que leur mouillabilité [19 ;20].

Les agents de surface sont généralement composés de deux parties : Une partie hydrophile (tête polaire) qui préfère être en contact avec une phase aqueuse (l'eau) et une partie hydrophobe (lipophile) qui représente la queue et préfère être en contact avec une phase organique (l'huile) [21]. Lorsque ces substances sont introduites dans une solution, ils ont tendance à se mobiliser à la surface ou l'interface sous forme de monomères et forment ainsi deux phases d'affinité différente. Ce phénomène conduit à la réduction de la tension de surface [22]. A partir d'une certaine concentration appelée concentration micellaire critique, ces monomères vont saturer la surface et commencer à pénétrer dans la solution pour former des micelles. A cet instant, la tension interfaciale devient pratiquement presque constante [18]. Ceci est montré schématiquement sur la figure I.4.

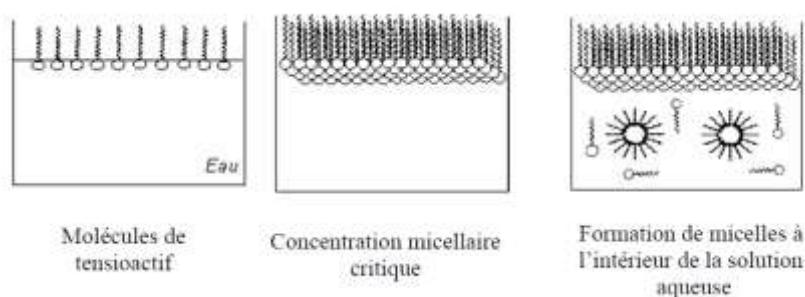


Figure I. 4 : Comportement des tensioactifs.[23]

6.1 Propriété des surfactants

Mis à part leur propriété de baisse de tension de surface, les tensioactifs possèdent d'autres propriétés très pertinentes pour les industries à savoir : l'émulsification, la détergence, le mouillage, la solubilisation, le moussage et la dispersion [18 ;23].

6.2 Classification des surfactants

Plusieurs types de surfactants ont vu le jour. Bien qu'ils gardent le même principe d'action, leur efficacité dépend des milieux où ils sont utilisés ainsi que de leur nature [18 ;23]. Ils sont donc classés selon la fonction de leur tête polaire.

Tensioactifs non ioniques : Ce sont ceux qui ne produisent pas des ions dans la solution aqueuse. Leur fonctionnement est dû à la nature de leur partie hydrophile. Ils sont de type alcool, amine, éther...

Tensioactifs cationiques : Ce sont ceux qui donnent des ions de charges positives après leur dissociation dans la phase aqueuse. Exemples : sel d'amine gras ou d'ammonium quaternaire.

Tensioactifs anioniques : Ce sont ceux qui donnent des ions de charges négatives dans la solution aqueuse après leur dissociation. Exemples : détergent, savons...

Tensioactifs amphotères (zwitterionique): ce sont ceux qui ont un caractère mixte, anionique et cationique en même temps.

Ils sont représentés schématiquement sur la figure I.5.

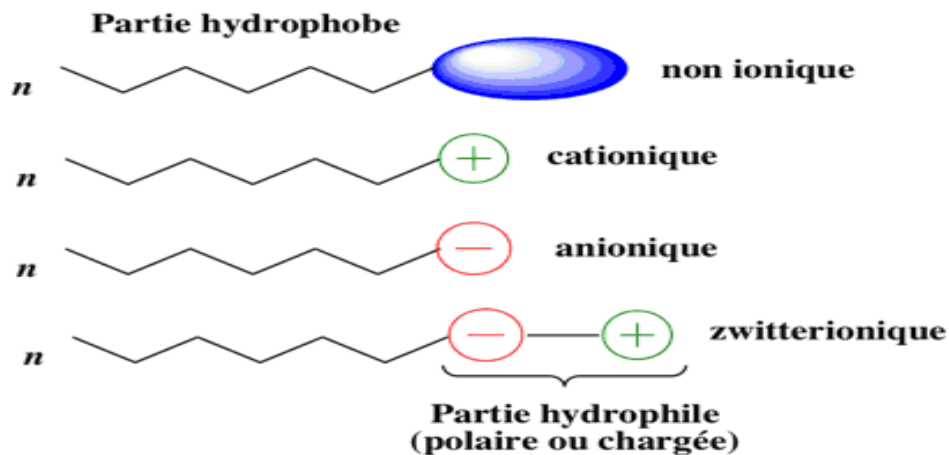


Figure I. 5 : Structures des différents types de tensioactifs.[25]

6.3 Principe de fonctionnement des tensioactifs

Les surfactants sont reconnus grâce à leur principale activité qui est la baisse de la tension de surface (aire/liquide) ou inter-faciale (liquide/solide ou liquide/liquide). Derrière cette activité se cache des phénomènes très intéressants qui sont la mobilisation et la solubilisation.

Le phénomène de la mobilisation se produit généralement avant que le milieu soit saturé de monomères (avant CMC) et conduit au détachement des substances organiques et à leur dispersion dans le milieu sous forme des émulsions grâce à la partie hydrophobe des monomères. Quant à la solubilisation, elle a lieu après la saturation du milieu des monomères (après CMC) et a pour la dispersion de ces composés détachés dans l'eau en les piégeant au centre des micelles [22]. La figure I.6 ci-dessous présente les processus intervenant lorsque l'on réalise le mélange d'une solution de surfactant avec un sol pollué par un composé organique.

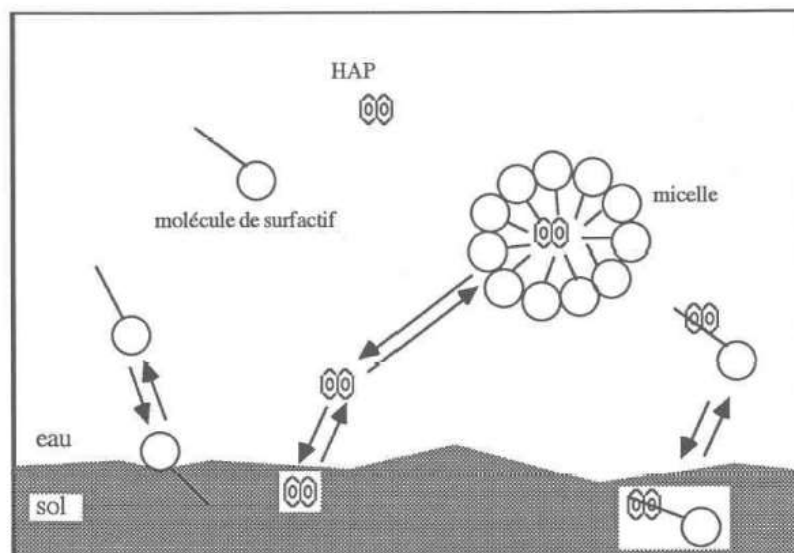


Figure I. 6 : Répartition des contaminants organiques hydrophobes et des agents tensioactifs dans un système sol/eau.[22]

6.4 Adsorption de tensioactif sur le sol

Lorsqu'une solution de tensioactif à faible concentration est mise en contact avec un sol pollué par des composés organiques, les monomères vont couvrir partiellement la surface du sol grâce aux interactions électrostatiques entre eux. Plus la concentration en surfactant augmente dans la solution, plus le nombre de monomères à la surface du sol augmente pour former des hemimicelles. A partir d'une certaine concentration, y'aura formation des Admicelle, c'est à dire que le sol a adsorber un maximum de surfactant et donc les surplus resteront dans la solution pour former des micelles et aider à solubiliser les hydrocarbures détachés des particules du sol [18]. Ce mécanisme est schématisé sur la figure I.7

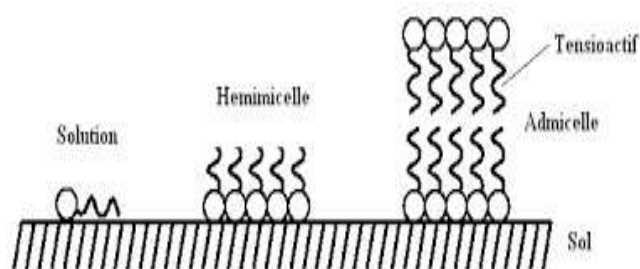
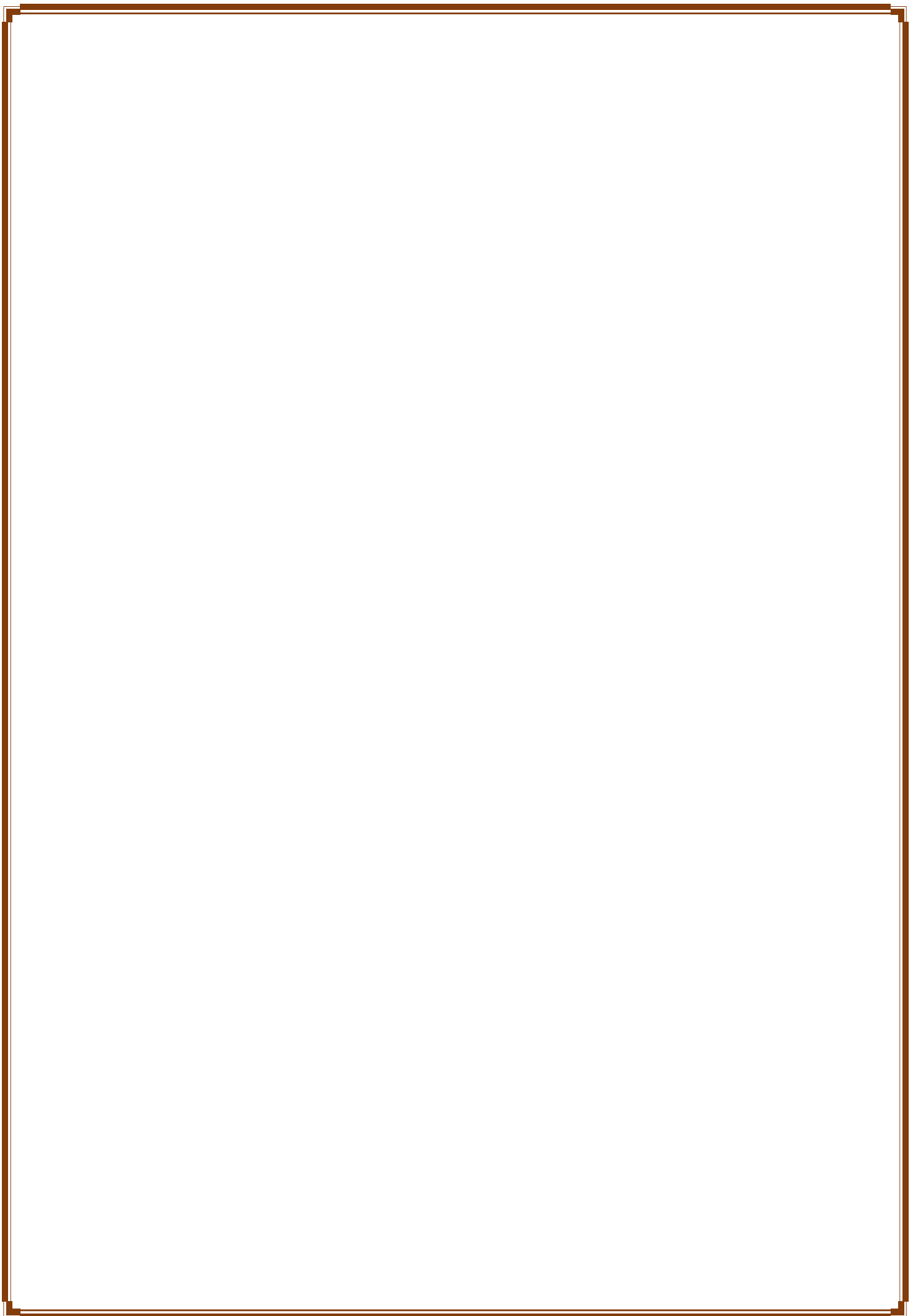


Figure I. 7 : représentation schématique de l'adsorption de surfactant sur un sol.[8]



Chapitre II : partie pratique

1. Objectif

L'objectif principal de ce travail est d'élaborer un modèle mathématique qui permettra de prédire la performance d'un procédé continu de lavage des sables contaminés par des hydrocarbures dans un lit fluidisé. Le modèle est construit sur la base des résultats des expériences effectuées dans le laboratoire en utilisant le banc d'essais "lit fixe et fluidisé". En effet, plusieurs techniques de décontamination des sols ont été élaborées au fil du temps, et parmi elles, la méthode de lavage se présente comme une des meilleures car elle est à la fois économique et écologique. Elle permet d'extraire les hydrocarbures qui polluent le sol et de les utiliser à nouveau.

Les équations que nous allons établir seront des corrélations mathématiques faisant intervenir plusieurs variables qui influencent directement l'efficacité de l'opération : la température, la concentration du surfactant et le temps de lavage.

2. Matériels et méthodes.

2.1.Le polluant

On s'intéresse dans ce travail à la pollution des sables par le pétrole brut. Le pétrole Algérien est classé dans la catégorie des pétroles légers et doux, et est extrait dans le sous-sol du Sahara, plus précisément dans le sud de l'Algérie (L'échantillon utilisé provient du champ de Haoud Berkaoui, Ouargla). Il nous a été fourni par la société nationale du pays, connu sous le nom de SONATRACH. Ce pétrole possède certaines caractéristiques dont : densité à 288.15 K égale à 0,8061 g/cm³, viscosité à 293.15 K égale à 3,87 cP, salinité : 10,3 mg/l.

2.2.Le surfactant

Le TEXAPON® N70 (du nom commercial) est un agent tensioactif anionique de nom chimique : Laureth sulfate de sodium (SLES), de formule chimique brute : C₁₄H₂₉NaO₅S et de pureté de 70 %. Sa concentration micellaire critique, déterminée par la méthode "Du-Noüy Ring" a été évaluée à 200 mg/l. Son poids moléculaire est de 382 g/mol et son pH varie entre 0.7 et 0.9. Ce surfactant a été choisi par ce que les agents tensioactifs anioniques sont les plus recommandés pour un procédé de lavage des sols pollués mais aussi parce qu'il présente une très forte sorption au sol comparé aux autres (P. Somasundaran et S. Krishankumar, 1997). Sa disponibilité et son faible coût en font un bon candidat.

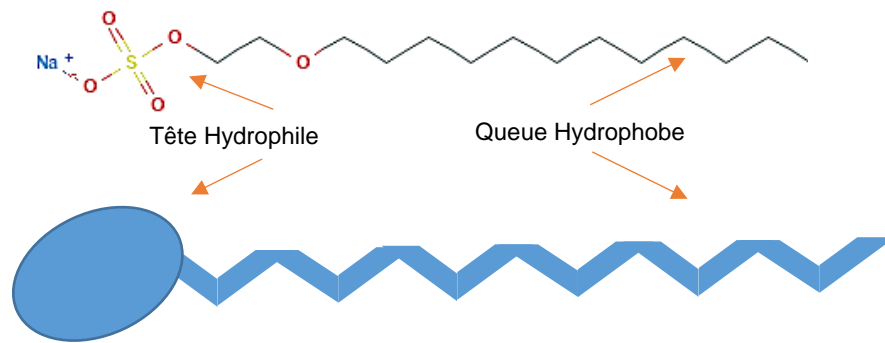


Figure II. 1 : structure chimique du texapon.[26]

2.3.Solvants d'extraction

L'hexane et l'acétone ont été utilisés dans la procédure d'extraction des hydrocarbures résiduaire dans le sol après lavage. Chacun de ces solvants est utilisé pour extraire une partie des hydrocarbures. Comme le pétrole brut est constitué de plusieurs types de composés qui sont généralement répartie en deux grandes familles : polaires et moyennement polaire, l'acétone extrait les composés moyennement polaire (carbonyle, aldéhyde, méthoxyl...) et l'hexane extrait les composés polaire (saturés et insaturés).

2.4.Le sol

Il s'agit de sable de dune propre qui a été prélevé dans une zone saharienne. Afin de déterminer sa composition granulométrique, ce sable a été tamisé à l'aide d'un tamis de 2 mm de diamètre, puis passé à travers 6 autres tamis de tailles d'ouvertures différents. Ce sable possède les caractéristiques reportées dans le tableau II.1.

Tableau II. 1 : Caractéristiques du sable utilisé. [26]

Taille des particules	Sable grossier (1.0–0.5 mm)	0.35 %
	Sable moyen (0.5–0.25 mm)	45.60%
	Sable fin (0.25–0.10 mm)	44.45%
	Sable très fin (0.10–0.05 mm)	8.86%
Texture	Sable fin	
Diamètre moyen (µm)	199,78	
Densité (g/cm ³)	2.708	
Theoretical U _{mf} (m/s)	4.05*10 ⁻⁴	
Experimental U _{mf} (m/s)	3.3*10 ⁻³	

2.5. Préparation des échantillons

Pour réaliser les expériences, 20 kg de sable a été pollué par du pétrole. Cette contamination a été provoquée volontairement afin de pouvoir contrôler les paramètres. Pour ce faire, à chaque fois 50 g de pétrole brut est introduit dans un tube contenant 1 kg de sable, puis agité très vigoureusement pendant quelques minutes pour obtenir du sable contaminé de façon homogène. Cette opération est répétée 20 fois afin d'obtenir une quantité assez suffisante pour effectuer toutes les expériences souhaitées.

Après la contamination, l'étape qui a suivi est celle de l'évaporation. Elle consiste à laisser ce sable contaminé à l'air libre pendant un an, afin que les composés volatils puissent s'évaporer dans l'atmosphère. Ceci permet d'approcher les conditions réelles qui se présentent dans la nature. Afin de déterminer le niveau de pollution après vieillissement, on procède à l'extraction sur soxhlet des hydrocarbures résiduels en utilisant l'acétone et l'hexane. Par une procédure de pesée avant et après l'extraction, on déduit la masse des hydrocarbures qui sont restés. Les mesures indiquent que la masse des hydrocarbures extraits est de 23.49 g par kilogramme de sable, ce qui implique que 26.51 g par kilogramme de sable se sont volatilisés, soit 53,02 %. Par ailleurs, pour nous assurer que tous les composés volatils se sont bien volatilisés, 100 g de ce sable a été placé dans une étuve de séchage pendant une heure et à 105°C. On a constaté que seulement 0,2 % des hydrocarbures se sont volatilisés. D'après les résultats obtenus, il est bien clair qu'après une telle durée d'exposition aux aléas climatiques, on aura un sol pollué dont les polluants vont rester dans le sol. Ainsi, le sol contaminé obtenu peut être utilisé pour étudier les performances d'un procédé de décontamination des sols pollués par des hydrocarbures par la méthode de lavage.

Le lavage se fait soit avec de l'eau simple soit avec une solution contenant un surfactant. Pour atteindre la concentration micellaire critique de cette dernière, il faut introduire 285,71 mg du surfactant dans un litre d'eau car le surfactant commercial est d'une pureté de 70 %.

Il faut noter que les valeurs obtenues dépendent des types de pétrole et du sable utilisé. C'est à dire que si le brut utilisé était lourd, la fraction des composés volatils sera un peu plus faible, du coup le sable sera plus pollué, ou si le sable utilisé n'était pas du sable de dune, les grains seraient différents et le degré de contamination aussi.

2.6.Présentation des appareils utilisés

2.6.1. L'appareil de fluidisation

Les expériences ont été réalisées dans le laboratoire de génie des procédés de l'université Kasdi Merbah Ouargla, où nous disposons d'un appareil à lit fluidisé (GUNT, CE220). Il est constitué d'une colonne d'essai de lavage amovible en plexiglas de diamètre intérieur 44 mm et de hauteur 550 mm, de 2 plaques poreuses en métal fritté, une en haut et l'autre en bas. Ces plaques ont pour rôle d'empêcher la sortie de sable pendant le lavage car leur diamètre des ports sont plus petits que celle des grains de sable. Une pompe à membrane est aussi présente dont le rôle est de faire circuler la solution de lavage depuis un réservoir situé à l'arrière de l'appareil dans lequel elle est stockée. Le banc d'essais est représenté sur la figure II.2.



Figure II. 2 : Appareil de fluidisation.[1]

2.6.2. Montage d'extraction solide liquide (soxhlet)

Cet appareil est utilisé pour extraire les hydrocarbures qui sont restés dans le sol après le lavage et le séchage. Il est composé d'un ballon dans lequel le solvant d'extraction est introduit, d'un

chauffe-ballon, d'un corps soxhlet (clavenger) dans lequel est introduite la cartouche (un support blanc poreux) qui contient le sol séché, et d'un condenseur à reflux. L'ensemble forme un système fermé. Ce système est représenté sur la figure II.3.

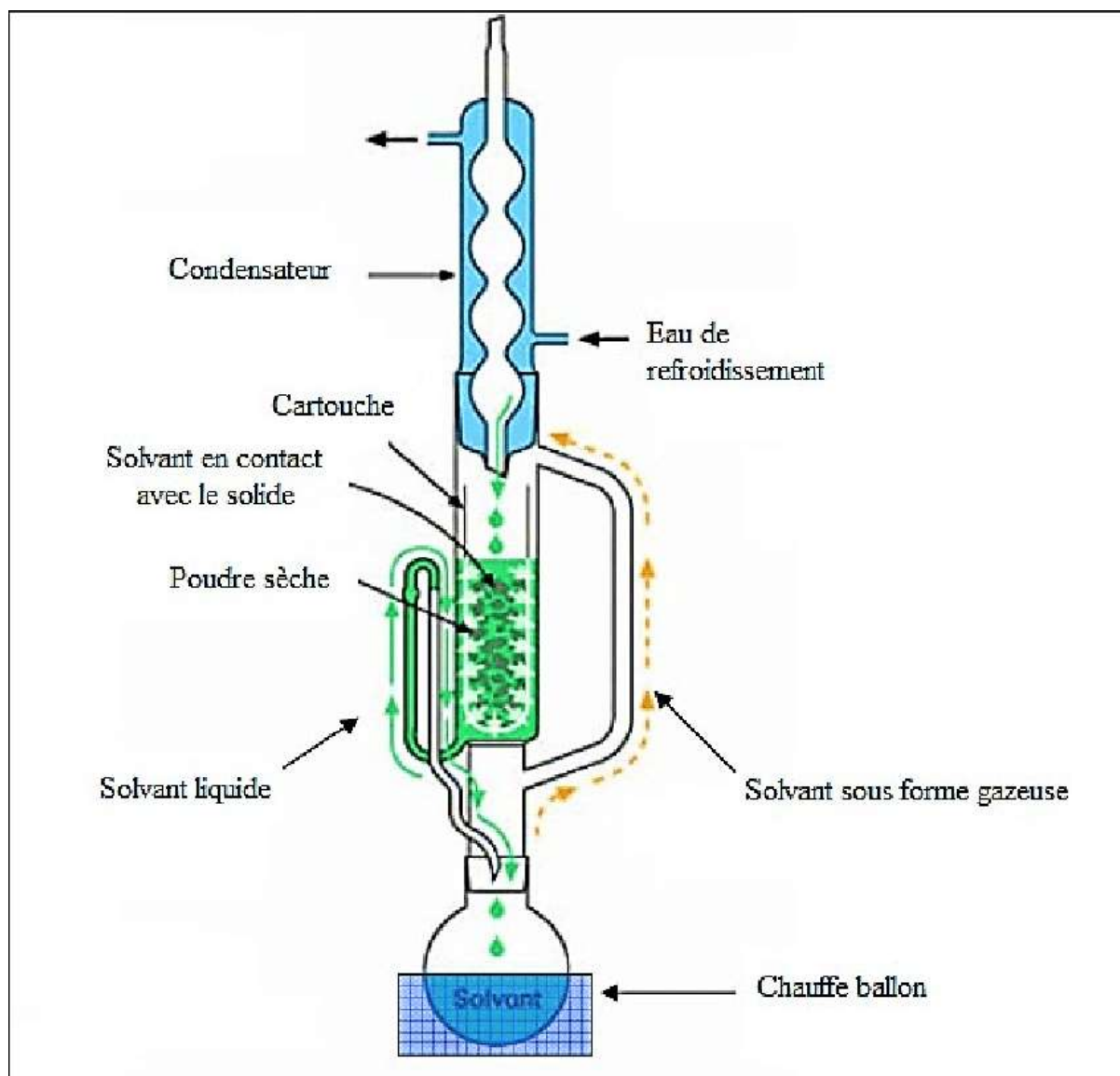


Figure II. 3 : Montage de l'extraction Soxhlet.

2.6.3. Le Rota-vapeur

Le montage rota-vapeur est utilisé pour récupérer le solvant après l'extraction. Cette installation est composée de deux ballon : un ballon de récupération dans lequel le solvant est récupéré, un ballon contenant le mélange (solvant et hydrocarbure) qui effectue un mouvement de rotation à l'aide d'un moteur tout en le chauffant dans un bain marie qui contient de l'huile chaude et permet de chauffer le mélange afin que le composant le plus volatil puisse s'évaporer. Cette installation

contient aussi un réfrigérant à eau pour condenser la vapeur. On peut aussi ajouter une pompe à vide pour accélérer l'opération d'évaporation. Ce montage est représenté sur la figure II.4.

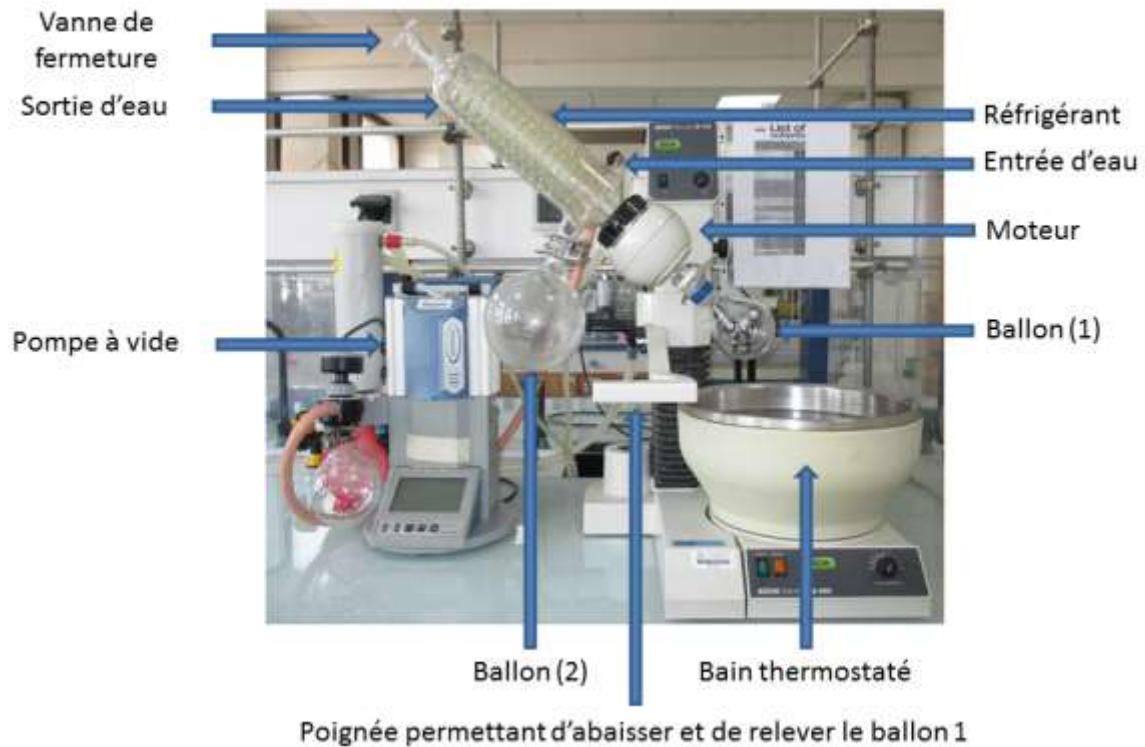


Figure II. 4 : Montage du rota-vapeur.

2.7.Mode opératoire

Une quantité de sable pollué est introduite dans l'appareil dans lequel nous faisons passer un débit de la solution de lavage du bas de la colonne vers le haut grâce à la pompe. Le débit est réglé de manière à ce que la solution fasse agiter la charge (provoquer une fluidisation), c'est à dire que la vitesse du fluide est supérieure à la vitesse minimale de fluidisation qui est de 0,8 m/s (cette vitesse minimale de fluidisation a été déterminée à partir des tests préliminaires qui ont été effectués, en mesurant l'évolution de la perte de charge DP à travers le lit des particules en fonction de la vitesse du fluide). Le fluide récupéré (mélange solution de lavage + hydrocarbures) passe d'abord dans l'entonnoir pour être séparé par décantation. La phase aqueuse qui est constituée de la solution de lavage est recyclée dans le réservoir de stockage pour être utilisée à nouveau, et la phase organique qui est constitué des hydrocarbures est récupérer dans un bécher. Le montage est montré sur la figure II.5.

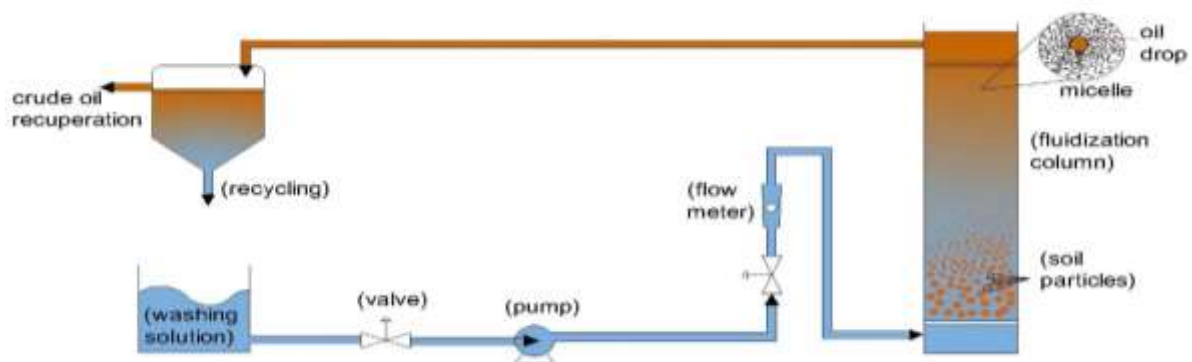


Figure II. 5 : Schéma du montage expérimental employé.[26]

Après l'opération de lavage, le sable lavé est soutiré de l'appareil, puis sécher à l'air libre pendant au moins 24 h et encore dans une étuve de laboratoire à 105 °C pendant environ 1 h. Le sable séché va suivre une opération d'extraction pour extraire le reste des hydrocarbures qui n'a pas pu être éliminé lors de lavage. Lors de cette opération 100 g du sol séché est tout d'abord introduit dans une cartouche poreuse avec des diamètres des ports supérieurs à ceux des molécules du solvant et des hydrocarbures puis la cartouche est placée à l'intérieur du support soxhlet. Les solvants d'extraction qui sont de l'hexane et de l'acétone sont introduit séparément dans le ballon puis chauffés à l'aide d'un chauffe ballon jusqu'à son ébullition qui sont respectivement : 69°C et 56°C. Ce dernier va être évaporé et condensé dans le soxhlet et tombe dans la cartouche sous forme de gouttes, à partir d'un certain moment les gouttes seront assez suffisantes pour bien mouiller le sol contenu dans la cartouche, ainsi le solvant va extraire les hydrocarbures du sol et sortir de la cartouche à travers ses ports puis retomber dans le ballon pour être à nouveau évaporé. L'opération est renouvelée jusqu'à effectuer 6 cycles pour obtenir à la fin un sol complètement dépollué.

L'extrait (le mélange de solvant et pétrole) obtenu après l'extraction est collecté dans un bidon pour être séparé afin d'utiliser à nouveau le solvant. Après 4 opérations d'extractions, l'extrait collecté est introduit dans un ballon, l'ensemble est introduit dans un bain marie de 150°C dont le liquide de chauffage est de l'huile. Ce ballon effectue un mouvement de rotation à l'aide d'un moteur tout en restant en contact avec le liquide de chauffage, ce mouvement permet d'équilibrer la température du mélange. Au point de son ébullition, le solvant va commencer à se volatiliser vers le condenseur, où il sera condensé et tombé dans le ballon de récupération. Lorsque les bulles vont disparaître dans le ballon de chauffage, c'est à dire qu'il y a presque plus de solvant, on arrête l'opération pour éviter le craquage de l'extrait et le solvant récupéré peut être réutilisé une autre fois.

2.8.Détermination de la quantité des hydrocarbures extraite

Le sable récupéré après l'extraction est séché à l'air libre puis dans une étuve de séchage pendant 30 minutes à 90°C. En utilisant la pesée, la quantité des hydrocarbures restant dans le sable s'obtient en faisant la différence entre la masse de l'échantillon avant et après l'extraction. Connaissant la quantité initiale des hydrocarbures contenue dans l'échantillon (la quantité restante après un an d'exposition) noté m_i (quantité initiale) et celle des hydrocarbures qui sont restés dans le sol après lavage noté m_f (quantité final), on déduit le taux de décontamination comme suit :

$$\% TPH = 100 \left(1 - \frac{m_f}{m_i} \right)$$

3. Résultats et discussions des mesures expérimentales.

Les résultats expérimentaux présentés dans cette section sont ceux obtenus par monsieur Mohamed Aouf dans le cadre de la préparation de sa thèse de doctorat effectuée dans le laboratoire de génie des procédés de l'université Kasdi Merbah Ouargla (en cours).

3.1.Effet du temps de lavage.

Pour étudier l'effet du temps de lavage sur l'efficacité de l'opération, 200 grammes de sable contaminé sont introduits dans l'appareil de fluidisation dans lequel circule 7 litre d'eau ordinaire à la température ambiante avec une vitesse supérieure à la vitesse minimale de fluidisation et en mode continu. Quatre expériences sont réalisées dans les mêmes conditions en variant uniquement le temps. Au cours de ces expériences, des phénomènes étranges se sont produit dans la colonne de lavage, il s'agit de la formation des agrégats, l'adhésion des hydrocarbures sur les parois et la fluidisation qui a mis trop de temps avant de commencer (environs 20 minutes). Tous ces phénomènes sont causés par le fait que le mélange est totalement immiscible et une très forte tension inter-faciale existe entre l'eau et les hydrocarbures. Les valeurs mesurées sont présentées dans le tableau II.2.

Tableau II. 2 : Valeurs du % TPH à différents temps de lavage.

Expériences	1	2	3	4
Durée de l'Opération (min)	30	60	90	120
(%) TPH	14.43	18	18.49	20.69

D'après les résultats obtenus, on voit bien que la quantité des hydrocarbures extraite n'est pas assez importante et quelle augmente d'environ 2 % (soit 0.47 g/Kg) à chaque 30 minute de plus.

Il apparaît donc que pour un tel mode de lavage, il est très difficile de dépolluer le sol, car le détachement des hydrocarbures s'effectue uniquement grâce aux phénomènes physiques qui sont : la fracture (choc entre grain de sable et paroi), l'attrition (choc entre grain de sable) et le cisaillement qui est causé par l'effet de la fluidisation. Certes le taux de dépollution augmente peu avec le temps, mais plus le temps augmente, plus la dépollution est faible, ce qui rend l'opération lente et coûteuse.

3.2.Effet de la température

D'après l'analyse des résultats de la variation du taux de décontamination en fonction du temps, il est à remarquer que ce taux augmente très peu à cause de la forte tension inter-faciale qui existe entre l'eau et les hydrocarbures qui entourent les grains de sable contaminés. Afin d'améliorer ce taux, il faut trouver un moyen pour baisser cette force. Les études antérieures ont montré que l'augmentation de la température entraîne une baisse de cette tension inter-faciale. Ainsi, une campagne d'expériences a été effectuée pendant la même durée (1 h) en variant à chaque fois la température de l'eau de lavage, de la température ambiante (22 °C) à 50 °C. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau II.3.

Tableau II. 3 : Evolution du % TPH en fonction de la température.

Expériences	1	2	3	4
Température (°C)	22	30	40	50
% TPH	18	20.05	26.43	49.54

En observant ces valeurs, on voit bien que la quantité des hydrocarbures extraite est moyennement importante et qu'elle évolue fortement avec la température. L'augmentation de la température produit deux effets principaux sur le mélange : réduction de la viscosité des hydrocarbures et réduction de la force inter-faciale entre l'eau et l'huile [17]. Grâce à ces effets combinés, le détachement des molécules d'hydrocarbures et leur solubilisation dans l'eau va augmenter.

Pour des raisons techniques, on s'est limité à une température de 50 °C. Cependant, il est possible que si l'on continuait à chauffer l'eau au-delà de cette valeur, le sable serait dépollué à un degré plus important.

3.3.Effet de la concentration de tensioactif

L'augmentation de la température est une méthode qui s'avère être très intéressante et efficace pour la dépollution des sols. Mais, cette procédure nécessite une unité d'apport d'énergie pour augmenter la température de l'eau à une valeur supérieure à 50 °C afin que le sol puisse devenir

propre. Or nous savons tous que la nécessité d'une unité d'apport d'énergie va faire du procédé un procédé énergivore et qui risque de coûter très cher.

Donc pour des raisons économiques, des nouvelles expériences sont faites avec introduction d'un surfactant dans la solution de lavage qui est un agent tensioactif anionique capable de réduire considérablement la tension inter-faciale. Ces expériences sont toutes réalisées dans les mêmes conditions, à la température ambiante sur une durée de 30 minutes. Vu que la concentration du surfactant est le paramètre à étudier, sa valeur a été modifiée entre 1 CMC et 25 CMC. Les résultats obtenus sont présentés le tableau II.4.

Tableau II. 4 : Valeurs du % TPH avec la variation de la concentration de la solution de lavage en tensioactif.

Expérience	1	2	3	4	5
Concentration de tensioactif (fois CMC)	1	3	5	10	25
% TPH	70.21	76.43	81.88	96.15	95.85

Les résultats obtenus montrent que le surfactant a un effet très important sur cette méthode de dépollution et d'après la courbe, l'évolution du taux de décontamination augmente presque linéairement et devient presque constant à partir de 10 CMC. Certes la pente n'est pas très importante mais quand même la quantité des hydrocarbures extraite est très importante. Cette croissance importante du taux d'extraction s'explique par le fait que les surfactants ont la capacité de baisser considérablement la tension inter-faciale entre l'eau et les hydrocarbures conduisant ainsi au détachement d'une quantité importante des hydrocarbures du grain de sable et leur dispersion dans la solution. Grace aux micelles contenues dans la solution, les hydrocarbures récupérés sont solubilisés et restent dans la solution sous forme d'émulsion [18 ;22]. A partir de 10 CMC, on remarque que le taux d'extraction n'évolue presque plus, ce qui peut s'expliquer par le fait que la vitesse maximale de détachement des hydrocarbures est atteinte à partir de 10 CMC.

4. Modélisation du processus.

Une modélisation est une succession des étapes permettant d'aboutir à une équation qui permet de calculer numériquement des réponses d'un procédé après une excitation dans le domaine d'étude sans réaliser des expériences. Son avantage principal est l'économie du temps, du matériel et des produits, ainsi que la prédiction de l'efficacité du procédé. C'est Donc pourquoi après avoir étudié les résultats des expériences réalisé ci-dessus, nous avons décidé d'établir des modèles mathématiques afin de prédire le débit des hydrocarbures extraits en prenant en compte les effets

des paramètres important suivant : le temps de la fluidisation, la température de la solution de lavage et la concentration du surfactant utilisé. Pour élaborer ces équations, nous avons tout d'abord commencé par tracer les courbes des variations des débits des hydrocarbures extraits en fonction de chacun de ses trois paramètres pour observer leurs allures afin de savoir comment s'y prendre. Il nous a paru judicieux d'élaborer deux équations : La première, valable lors du lavage avec l'eau ordinaire, prendra en compte les effets du temps et de la température de la solution, et la seconde, valable lors du lavage avec solution de tensioactif, prendra en compte les effets de tous les paramètres.

Il est important de définir à ce niveau le débit d'hydrocarbure extrait : Il s'agit du rapport entre la masse extraite par lavage (différence entre le degré de pollution initiale et le degré de pollution résiduaire après la fin du lavage par fluidisation) et le temps de l'opération.

4.1.Première équation (Absence de tensioactif)

Le temps et la température sont des paramètres qui sont étroitement liés entre eux, et ils permettent aussi d'obtenir un rendement assez important pour que le sol soit considéré propre d'après les normes européennes. Donc il est très utile d'avoir une équation qui dépend que de ces paramètres, du coup des courbes ont été tracés. La première évolution examinée est celle de la variation du débit des hydrocarbures extraits en fonction du temps à l'aide des expériences réalisés précédemment à une température de 22 °C. Le tableau II.5 regroupe les valeurs obtenues et la figure II.6 leur représentation graphique.

Tableau II. 5 : Evolution du débit extrait en fonction du temps de l'opération.

% TPH	Temps(minutes)	Debit (g/min)
14.43	30	0.1129869
18	60	0.07047
18.49	90	0.0482589
20.69	120	0.04027599

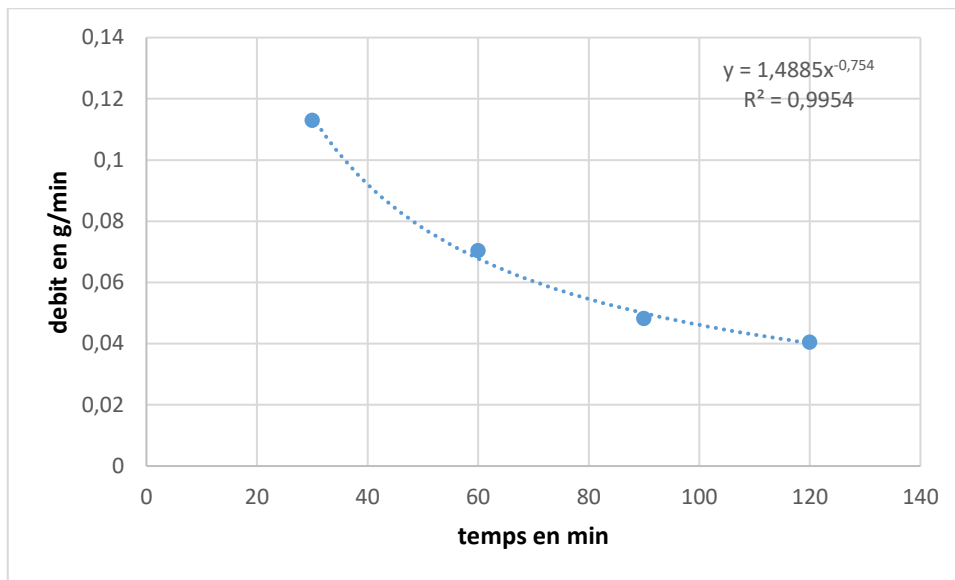


Figure II. 6 : Variations du débit extrait en fonction du temps de lavage.

La courbe est décroissante par ce que la quantité extraite est de plus en plus faible à mesuré que le lavage se poursuit. Grâce au logiciel Microsoft Excel et à la régression, l'élaboration de l'équation de cette courbe n'a pas été difficile, vu que les point ne sont pas complètement éparpillés. Le débit des hydrocarbures extraits en fonction du temps peut être exprimé sous la forme suivante :

$$G(t) = 1,4885t^{-0,754} \quad (I.1)$$

Avec le temps exprimé en minutes (valable dans le domaine $t \in [20,120]$).

Pour intégrer le deuxième paramètre qui est la température, il est nécessaire de soustraire, aux valeurs des débits extraits déterminés pour différentes températures (notés G), le débit extrait pendant une heure d'opération à la température de 22 °C (noté G(t)). Cela permettra d'observer uniquement l'effet de la température (débit noté G(T)). On suppose que l'équation générale qui prendrait en effet les deux paramètres sera la somme des deux dépendances vis-à-vis des deux paramètres. Dans le tableau II.6 on a regroupé les débits extraits en fonction de la température et sur la figure II.7 son évolution.

Tableau II. 6 : Valeurs des débits extraits globaux et ceux qui sont dus à la température.

Temperature °C	% TPH	Débit global G (g/min)	G(T) = G - G(t) (g/min)
22	70.21	0,07047	0,00254607
30	76.54	0,07849575	0,01057182
40	75.44	0,10347345	0,03554952
50	79.4	0,1939491	0,12602517

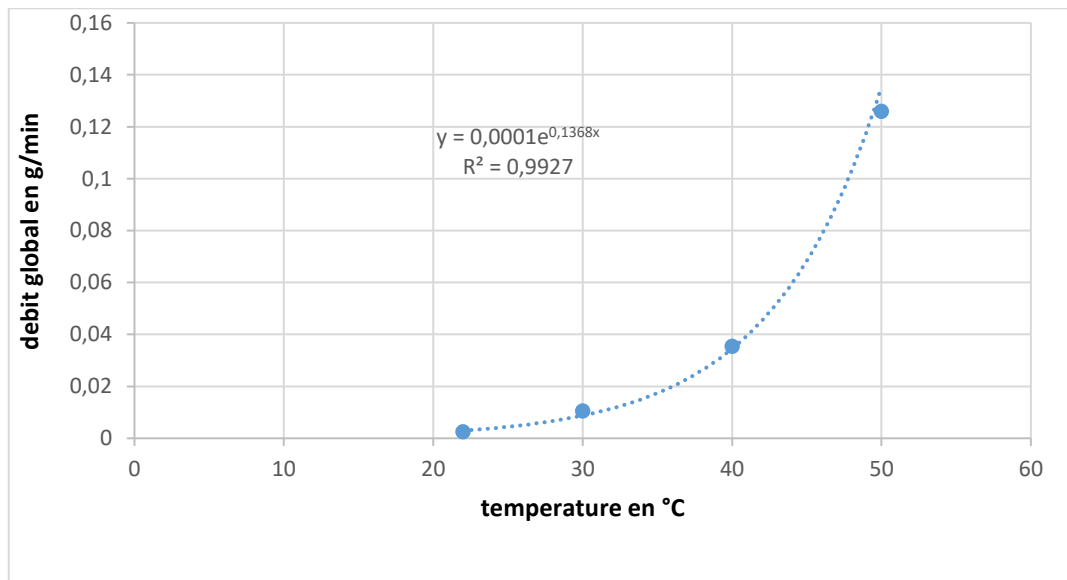


Figure II. 7 : Evolution du débit extrait dû à la température en fonction de la température.

L'expression analytique de cette courbe se présente comme suit :

$$G(T) = 0,0001e^{0,1368T} = e^{0,1368T-9,21} \quad (I.2)$$

La température T dans cette équation est en °C. Cette équation est valable dans le domaine $T \in [22,50]$

Au final, le débit extrait peut être modélisé, dans le cas du lavage du sable contaminé en utilisant de l'eau ordinaire, comme suit :

$$G(t, T) = 1,4885t^{-0,754} + e^{0,1368T-9,21} \quad (I.3)$$

Avec T en °C et t en minute

Afin de tester la validité de l'équation obtenue, plusieurs expériences de lavage ont été effectuées en utilisant de l'eau ordinaire (sans ajout de tensioactif) en faisant varier la température entre 20 et 45 °C et en faisant varier le temps de lavage entre 20 et 70 minutes. A l'issue de chaque expérience, la quantité d'huile extraite est déterminée et le débit d'extraction calculé. Les résultats sont reportés dans le tableau II.7. Dans le même tableau, nous avons reportés les valeurs des débits extraits calculé à partir de l'équation que nous avons élaborée et les erreurs relatives entre les deux valeurs. A l'examen du tableau, on voit que les erreurs relatives entre les valeurs mesurées et celle prédites sont relativement faibles, inférieures à 17,5 %. Ceci indique que notre corrélation permet de calculer correctement le débit extrait sans ajout de tensioactif.

Tableau II. 7 : Calcul des erreurs relatives entre valeurs calculées et mesurés des Débits d'huile extrait (sans tensioactif).

Expérience	Temps (min)	Température (°C)	% TPH	Débit pratique g/min	Débit théorique g/ min	Erreur relative %
1	40	45	19.58	0.1150	0.1393	17.43
2	20	45	16.23	0.1906	0.2026	5.92
3	40	35	20.63	0.1211	0.1041	16.30
4	30	35	16.13	0.1263	0.1265	0.155
5	20	35	14.64	0.1719	0.1674	2.70
6	70	20	17.67	0.0593	0.0619	4.33
7	60	20	15.76	0.0617	0.0694	11.15
8	50	20	19.30	0.0906	0.0794	14.15
9	40	20	13.36	0.0784	0.0937	16.27

4.2. Deuxième équation (Présence de tensioactif).

L'ajout de surfactant dans la solution de lavage permet de rendre l'efficacité du procédé de lavage encore meilleure, car il a un effet beaucoup plus important que les autres paramètres. C'est pour cette raison que l'élaboration d'un modèle mathématique qui va dépendre des trois paramètres à la fois est d'une grande utilité. Comme dans le cas précédent, on procèdera par la détermination des dépendances vis-à-vis des paramètres un à un ensuite on combinera les effets. Ainsi, pour l'effet du temps, encore une fois on a utilisé des mesures effectuées par monsieur Aouf dans le cadre de sa thèse de doctorat. Dans le tableau II.8, on a regroupé les % TPH déterminés à différents temps d'opération en réalisant le lavage par une solution contenant le tensioactif à une concentration de 25 fois la CMC. Les débits d'huile extrais sont calculés et reportés dans le même tableau. Sur la figure II.8, on présente l'évolution du débit en fonction du temps de l'opération.

Tableau II. 8 : Débits d'huile extraits à différents temps de lavage en présence de tensioactif.

Temps (minute)	TPH %	Débit g/min
3.5	70.85	4,75504714
5	76.84	3,6099432
6.4	79.71	2,88059677
30	82.67	0,6473061
60	93.54	0,3662091

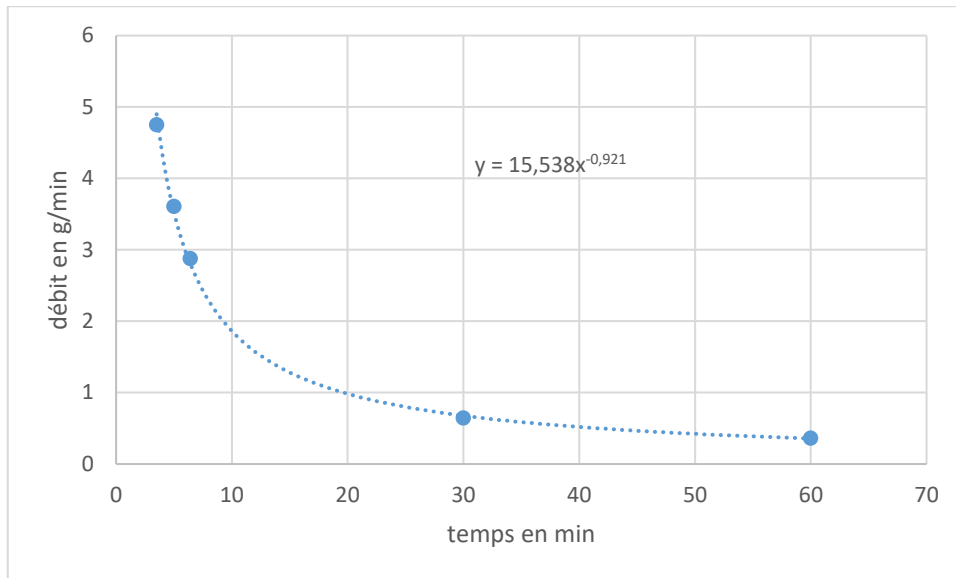


Figure II. 8 : Evolution du débit d'huile extrait au cours du temps en présence de tensioactif.

L'allure de cette courbe nous montre clairement que le débit des hydrocarbures extraits diminue fortement au cours du temps de l'expérience. Cette diminution est causée par le fait qu'au début de l'expérience la quantité extraite est déjà assez importante et quelle augmente peu lorsque le temps augmente. Nous avons utilisé la régression pour établir l'équation de cette courbe. L'équation suivante a été établie

$$G(t) = 15,538t^{-0,921} \quad (I.4)$$

Cette équation est valable pour des temps de lavage inférieurs à 60 minutes à la température ambiante et en présence du surfactant.

Après l'établissement de cette équation qui ne dépend que du temps, nous avons voulu aller un peu plus loin en essayant d'exprimer une autre équation qui va dépendre du temps et de la variation de la quantité de surfactant utilisé en se basant sur l'équation précédente et certains des résultats que Mr. Aouf a obtenus lors de la réalisation des expériences en variant la concentration du surfactant. Pour ce faire, nous avons supposé que le débit sera exprimé par le produit de deux fonctions : l'une dépendant uniquement du temps et l'autre dépendant uniquement de la concentration de tensioactif (exprimée par le nombre de fois la CMC). Elle prendra la forme :

$$G(t, C) = f(t) \times g(C)$$

La fonction $f(t)$ a déjà été établie. Pour établir la fonction $g(C)$, on utilisera les mesures effectuées à la température ambiante au cours d'expériences effectuées pendant 30 minutes.

L'idée est de tracer l'évolution de la fonction

$g(C) = \frac{G(t, C)}{f(t)}$ en fonction de la concentration du tensioactif et de déterminer par régression la loi

de l'évolution obtenue. Les résultats expérimentaux utilisés sont reportés dans le tableau II.9 avec les débits extraits calculés et les valeurs de la fonction $g(C)$. Sur la figure II.9, on a tracé cette évolution.

Tableau II. 9 : Valeurs de la fonction $g(C)$ déterminées expérimentalement.

TPH %	CMC	Debit G	$g(C) = \frac{G(t, C)}{f(t)}$
70.21	1	0,5497443	0,81132394
76.43	3	0,5984469	0,88320024
81.88	5	0,6411204	0,94617867
96.15	10	0,7528545	1,11107816

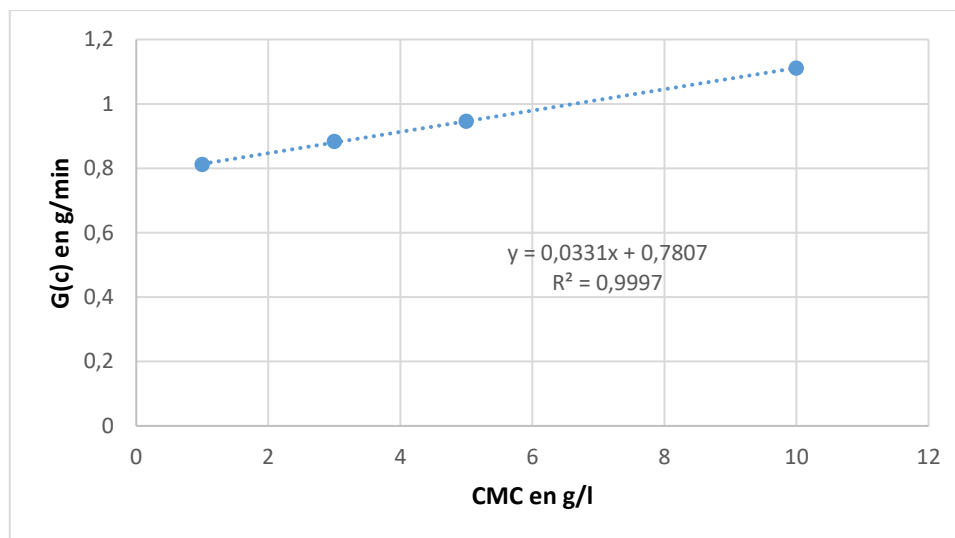


Figure II. 9 : Evolution du débit extrait avec la concentration de tensioactif

On remarque bien que l'évolution de ce nouveau débit en fonction de la concentration de tensioactif augmente linéairement, mais à partir de 10 CMC cette évolution devient presque constante. Cela est causé par le fait que le sol a adsorbé un maximum des molécules de surfactant à partir de 10 CMC, du coup au-delà de cette concentration, toute molécule de surfactant ajoutée restera dans la solution sous forme de micelles inactives.

L'équation du graphe obtenu est :

$$g(C) = 0,0331C + 0.7807 \quad (I.5)$$

Avec C la concentration de tensioactif exprimée par le nombre de fois la CMC. Ainsi, l'expression du débit des hydrocarbures extraits en fonction du temps de lavage et de la concentration de surfactant utilisé dans la solution prend la forme suivante :

$$g(t, C) = (15,538t^{-0.921})(0,0331C + 0.7807) \quad (\text{I.6})$$

Cette équation est valable à la température ambiante et dans les domaines suivants : $t \in [3,5,60]$, $C \in [1,10]$. Le temps est exprimé en minutes.

Par ailleurs, et vu que le temps, la température et le surfactant sont les paramètres les plus influents sur le procédé de lavage des sols pollués, et qu'il on fait l'objet de plusieurs études séparément tout comme en combinaison, notre soif de savoir nous a encore poussé à aller de l'avant pour élaborer une corrélation de l'expression du débit qui va dépendre de ces trois paramètres dans certaines conditions. Ainsi, nous avons suivi la même procédure que celle employée précédemment, c'est à dire qu'on considère là aussi qu'il s'agit d'un produit de trois fonctions dépendant respectivement du temps, de la concentration de surfactant et de la température :

$$G(t, C, T) = f(t) \times g(C) \times h(T)$$

Les deux premières fonctions étant déjà établies, on cherche à présent à établir la troisième fonction. Pour cela, on s'est basé sur les mesures expérimentales obtenues par Mr Aouf en fixant la concentration à 1 CMC et le temps d'opération à 30 minutes. La température est variée entre 22 et 50 °C. Les résultats concernant le débit extrait expérimentalement et la fonction $h(T)$ calculée par $h(T) = \frac{G(t, C, T)}{f(t) \times g(C)}$ sont reportés dans le tableau II.10. L'évolution de la fonction $h(T)$ en fonction de la température est tracée sur la figure II.10.

Tableau II. 10 : Débits extraits à différentes températures en présence de tensioactif.

% TPH	Temperature °C	Débit G	$h(T) = \frac{G(t, C, T)}{f(t) \times g(C)}$
70.21	22	0,5497443	0,99695742
75.44	40	0,5906952	1,07122158
79.40	50	0,621702	1,1274522

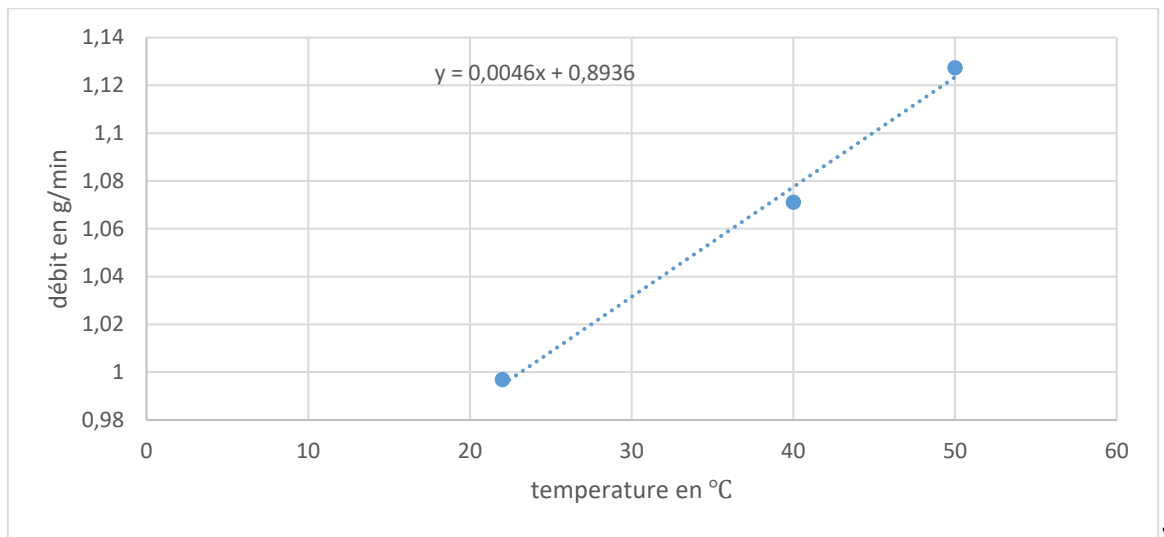


Figure II. 10 Evolution du débit extrait en fonction de la température en présence de tensioactif.

On constate bien que la fonction $h(T)$ augmente linéairement avec l'augmentation de la température et présente une pente plus importante que celle du graphe précédent. Les effets combinés de l'augmentation de la température et de la présence du surfactant dans la solution de lavage ont généré un effet positif sur le débit extrait. Ces paramètres ont amélioré l'efficacité de la dépollution en diminuant à la fois la force de la tension inter-faciale entre la solution et le sol et la viscosité des hydrocarbures. L'allure du graphe obtenu est linéaire, donc l'expression de son équation est la suivante :

$$h(T) = \frac{g(t,C,T)}{f(t) \times g(C)} = 0,0046T + 0,8936 \quad (I.7)$$

Avec T la température de la solution de lavage en °C.

Au final, l'expression du débit d'huile extraite qui dépend du temps, de la température et de la concentration de la solution de lavage en surfactant s'établit comme suit :

$$g(t, C, T) = (15,538t^{-0.921})(0,0331C + 0.7807)(0,0046T + 0,8936) \quad (I.8)$$

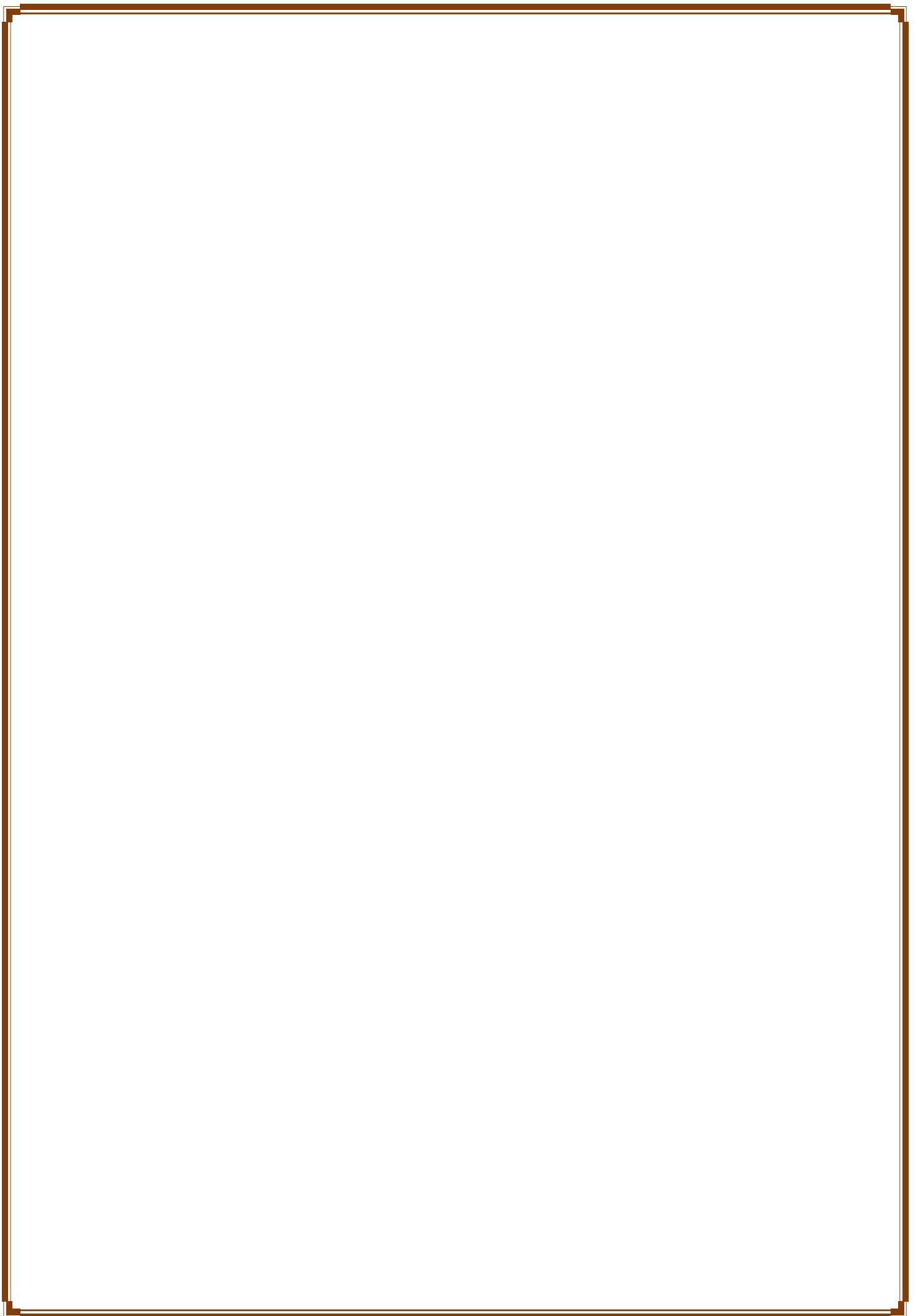
Cette équation est valable dans les domaines suivants : $t \in [3.5,60]$, $C \in [1,10]$ et $T \in [20,50]$. Le temps est exprimé en minutes, la concentration en CMC et la température en °C.

Tout comme le premier cas sans surfactant, et afin de valider cette corrélation, nous avons réalisé plusieurs expériences de lavage en faisant varier les trois paramètres : temps, température et concentration de la solution en surfactant. Les conditions opératoires et les débits d'huile extraits déterminés à partir des expériences sont reportés dans le tableau II.11. Dans le même tableau, on a reporté les erreurs relatives entre les valeurs pratiques des débits et les valeurs prédites par notre modèle. On voit bien que l'erreur maximale est de l'ordre de 18,5 %, ce qui est relativement faible

et tout à fait acceptable. On en déduit que la corrélation établie permet de prédire correctement le niveau de dépollution que l'on pourrait atteindre avec un jeu de paramètres opératoires donné.

Tableau II. 11 : Conditions opératoires des essais de test de la corrélation et erreurs relatives.

Experiences	Temps min	Temperature °C	CMC g/l	%TPH	Débit pratique g/min	Débit théorique g/min	Erreur relatif %
1	20	20	2	60.53	0.7109	0.8233	13.64
2	35	20	2	61.73	0.4143	0.04917	15.73
3	12	20	4	73.06	1.4301	1.4209	0.6503
4	20	35	4	85.37	1.0027	0.9496	5.59
5	10	20	10	70.97	1.6670	2.0462	18.53
6	8.5	20	10	78.49	2.1685	2.3766	8.75
7	6	20	10	84.63	3.3132	3.2755	1.15
8	60	20	10	93.54	0.3662	0.3929	6.79
9	30	50	10	99.02	0.7753	0.8478	8.55
10	30	20	10	95.85	0.75050	0.7439	0.88



Conclusion générale.

Pour la plupart des gens, le sol représente juste un objet qu'ils piétinent. En effet, cette ignorance conduit les gens à mal traiter le sol sans même qu'ils se rendent compte des conséquences qui peuvent survenir après et pourtant le sol présente un grand atout dans la vie humaine. L'homme lui reconnaît un certain nombre de ses fonctions qui lui sont indispensables tels que : la production de l'eau potable, supports d'infrastructures routières, d'habitats et d'industrie, épuration des déchets, réserve d'information archéologique ou pédologique, production de biomasse, source de matière première.... Certains paysans prétendent avoir des connaissances sur le sol, mais dans la plupart des cas leur connaissance est limitée à la couche superficielle du sol.

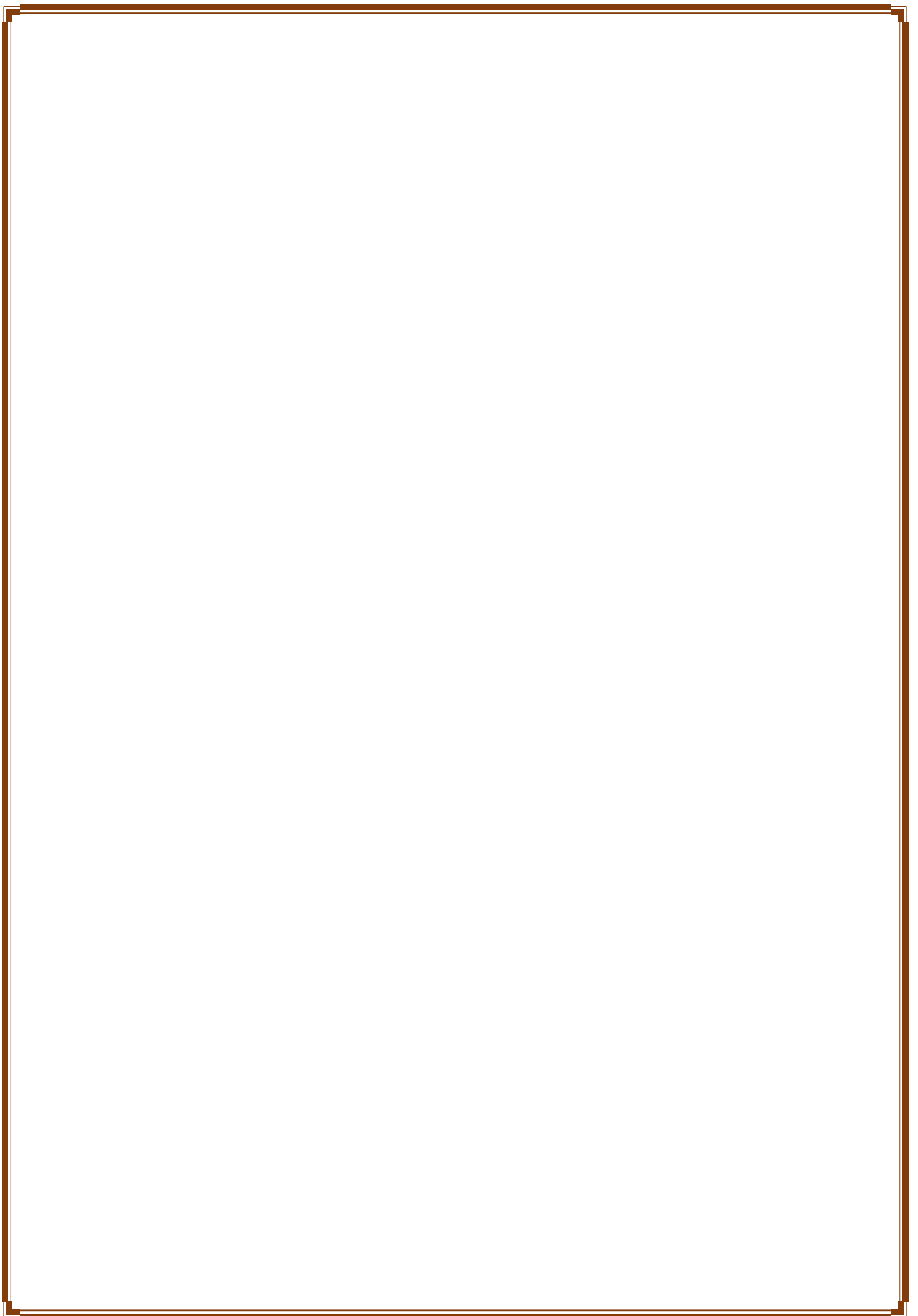
La forte implication de l'Algérie dans le secteur des hydrocarbures, et en particulier dans son sud, représente une menace imminente non seulement pour son sol mais aussi pour son environnement et ses habitants. Sachant que le pétrole brut constitue une source potentielle des polluants organiques et que ces polluants sont très nuisibles pour la vie des êtres vivants, animaux et végétaux vivant dans le milieu, la nécessité de la recherche et du développement des techniques pour préserver le bon fonctionnement du sol et de l'environnement s'impose au scientifique afin d'éviter que l'irréparable ne se produise. Le lavage est une des techniques de dépollution du sol qui a vu le jour au cours des années 1990. Dès lors, plusieurs recherches sont faites pour la développer et améliorer son rendement vu qu'elle semble être la plus économique et écologique. Le sous-sol de Ouargla est doté d'une nappe phréatique capable de fournir de l'eau chaude jusqu'à 50°C pendant l'été. Ceci constitue un véritable avantage pour l'application de la technique de lavage pour décontaminer le sol pollué par des hydrocarbures, vu que l'augmentation de la température de la solution de lavage augmente le rendement de cette opération.

Dans ce travail, le lavage du sable pollué avec de l'eau simple est fait pour extraire les hydrocarbures. Les résultats ont montré que quelle qu'en soit la durée de l'opération, la quantité des huiles extraites ne permet pas d'obtenir un sol dépollué. Le rendement, estimé en terme de pourcentage d'hydrocarbure extrait se trouve aux alentours de 20 %. Par contre, si la température de l'eau est élevée, le rendement de l'opération devient important, assez pour que le sol soit considéré comme propre. Dans les mêmes conditions opératoires, on a obtenu des % TPH avoisinant les 80 %. Ce rendement est encore plus intéressant lorsqu'on ajoute un surfactant dans la solution de lavage, c'est à dire que le surfactant présente un effet beaucoup plus positif sur le procédé que la température. Les résultats pratiques nous ont permis de voir que la combinaison de ces deux paramètres permet d'obtenir des rendements d'extraction dépassant les 95 %.

Les résultats obtenus après la réalisation de ces expériences nous ont non seulement permis d'évaluer l'effet de chacun de ces trois paramètres mais aussi d'élaborer des modèles mathématiques qui vont permettre de prédire leurs effets et celui de leurs interactions sans faire

des expériences. Cependant les modèles mathématiques que nous avons élaborés présentent des résultats un peu différents aux résultats pratiques, car ces derniers présentent des incertitudes qui sont liés à la description physico-mathématique du système et aux conditions et méthodes utilisées pour recueillir les données. Néanmoins l'écart entre les deux résultats pratiques et théoriques reste faible, inférieur à 20 %, ce qui permet de juger le modèle comme acceptable.

Les surfactants utilisés dans la solution de lavage pour améliorer l'efficacité du procédé de décontamination des sols pollués avec la méthode de lavage sont des substances chimiques. Sachant que la plupart de ces substances présentent des effets secondaires après leur utilisation que ça soit sur une longue ou courte durée, direct ou indirect et que ces substances sont susceptibles de contenir des constituants toxiques dans leur composition, l'homme n'est-il pas entraîné de créer un autre type de pollution en essayant d'optimiser la dépollution du sol ?



Bibliographie

- [1]. M. Ould Saadi, S. Dounit, “Régénération des sables contaminés par les hydrocarbures en lit fluidisé”, [Mémoire de Master], Ouargla, Université Kasdi Merbah, faculté des sciences appliquée, 2012.
- [2]. Thomas Robert, “Applicabilité du lavage des sols pour la réhabilitation in situ des sites hétérogènes contaminés par des hydrocarbures légers”, [Thèse de Doctorat], Québec, Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Centre Eau Terre Environnement, 2015.
- [3]. Jean-François Ponge, “Impact des polluants du sol sur la biodiversité animale du sol”, open science; 2010, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00477469>
- [4]. D. DIB, “Impact de la pollution du sol aux hydrocarbures sur la flore et la pédofaune dans quelques stations-services de la Wilaya de Tizi-Ouzou”, [Thèse de Doctorat], Tizi-Ouzou, Université Mouloud Mammeri, Ecologie Animale et Environnement, 2021.
- [5]. M. Robert, “le sol et l’environnement”, la jaune et la rouge, 2001 ; 566 ; P 22-26
- [6]. Th. Drouet, pédologie BING-f-302, Constituants et propriétés du sol, 2eme édition, 2010, <http://www.ulb.ac.be/sciences/lagev>
- [7]. C. Van Leeuwen, P. Chery, quelle méthode pour caractériser et étudier le terroir viticole : analyse de sol cartographie pédologique ou étude Eco physiologique”. Journal international des sciences de la vigne et du vin, 2001, P 1-12
- [8]. Colette Jeanson, “le sol au microscope”, science progrès découverte, 1972, P 28-34.
- [9]. Y. Dommerglies et F. Mangenot, écologie microbienne du sol, les éléments constitutifs de la microflore tellurique, 3eme édition, Masson et C^{le} éditeurs ,1970.
- [10]. M. A. Lamari et M.H. A. Yousfi, “Les polluants du sol : Méthodes de détection et bio remédiation microbienne”, [Mémoire de Master], Tizi-Ouzou, Université Mouloud Mammeri, faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, 2020.
- [11]. J. Mouton, “Développement d'un procédé de lavage de sol pour le traitement simultané des HAP et du plomb”, [Thèse de Doctorat], Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique Centre Eau, Terre et Environnement, 2008.
- [12]. E. Barriuso, R. Calvet, M. Schiavont et G. Soulas, “les pesticides et les polluants organiques du sol”, étude et gestion des sols, 1996 ; 3(4) ; P 279-296.
- [13]. N. AOUCI et S. KANOUN, “Effet de la pollution du sol aux hydrocarbures sur la germination, le taux de survie et la croissance de Pistacia lentiscus L”, [Mémoire de Master], Tizi-Ouzou, Université Mouloud Mammeri, Faculté Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, 2020.
- [14]. P. Martial et F. Mbogne, “bio remédiation augmentée de sols contaminés aux hydrocarbures lourds par ajout de substrats organique”, [Mémoire de Master], Montréal, Université du Québec, école de technologie supérieure, génie de l’environnement, 2017.
- [15]. M. F. Faubert, “Phytoremediation d’un sol contaminé par des contaminants organiques et inorganiques”, [Thèse de Doctorat], Montréal, Université de Montréal, faculté des sciences biologiques, 2021.

- [16]. John. C REIS, “environmental control in petroleum engineering”, waster treatment methods, 1ere edition, Gulf publishing company, 1996.
- [17]. K. Lussier, “étude de faisabilité d’un procédé de lavage thermique in situ des sols contaminés aux hydrocarbures lourds”, [Mémoire de Master], Montréal, école polytechnique de Montréal et université de Montréal, génie chimique, 1998.
- [18]. O. Benhabiles, “traitement par le tensioactif d’un sol pollué”, [Mémoire de Master], Alger, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, faculté de génie mécanique et de génie des procédés, 2008.
- [19]. A. Mathis, “les produits tensioactifs”, bulletin de l’union des physiciens, 1992 ; 86 ; P 1487-1501.
- [20]. V. JALLET, “Conception de polyoxométallates amphiphiles pour la d’oxydation en microémulsion”, [Thèse de Doctorat], Paris, université Pierre et Marie Curie, Institut Parisien de Chimie Moléculaire, 2014.
- [21]. T. Gaudin, “Développement de modèles QSPR pour la prédiction et la compréhension des propriétés amphiphiles des tensioactifs dérivés de sucre”, [Thèse de Doctorat], France, université de technologie Compiègne, génie des procédés industriels et développement durable, 2016.
- [22]. Louise Deschenes, “impacte de surfactants biologiques et du SDS sur la mobilisation et la biodégradation des HAP contaminé dans un sol contamined à la créosote ”, [Thèse de Doctorat], Québec, université de Québec, institut nationale de recherche scientifique, 1995.
- [23]. M. Idouhar, “analyse et dosage de composé tensioactif en milieux aqueux très dilué”, [Thèse de Doctorat], Alger, université Houari Boumediene, faculté des sciences et de la technologie, 2008.
- [24]. R. Félix, D. Xanthoulis, "Analyse de sensibilité du modèle mathématique “Erosion Productivity Impact Calculator” (EPIC) par l’approche One-Factor-At-A-Time (OAT) ”, Biotechnol. Agron. Soc. Environ, 2005 ; 9(3) ; P 179-190.
- [25]. Sarah LIGNEL, "Emulsions eau-dans-huile générées par un procédé microfluidique : contribution à l’étude de la congélation de l’eau dispersée en émulsion”, [Thèse de Doctorat], France université de technologie Compiègne, Génie des Procédés Industriels et Développement durable, 2014.
- [26]. M. AOUF, S. DOUNIT, " Remediation of aged hydrocarbon contaminated soil by washing in fluidized bed column”, Archives of environmental protection, vol 48, N° 2, 2022.