

N° Série :/2023

Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté des Hydrocarbures, Energies Renouvelables et des Sciences de la Terre et de
l'Univers

Département de Production des Hydrocarbures

MÉMOIRE

Pour obtenir le Diplôme de Master

Option : Production professionnelle

Présenté Par :

NECIRI Brahim Khalil , NAOUIHA Abderrezzak ,TAMER Tahar

-THEME-

**Etude de la nanofiltration pour son intégration dans les procédés
d'inhibition de la croissance des dépôts des sulfates de baryum au niveau de
champs de TFT**

Soutenue le :07/06/2023devant la commission d'examen

Président	Mr. Douak mohamed	MCB	Univ. Ouargla
Rapporteur :	M ^{elle} . Boufades Djamila	MCB	Univ. Ouargla
Examineur :	Mr. Lebtahi Hamid	MCB	Univ. Ouargla
Co-encadreur :	Mr. Adjou Zakaria	Phd	Univ. Ouargla

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

*En premier lieu nous tenons à remercier **ALLAH** qui nous a donné la puissance et terminer ce travail.*

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

*Nous remercions très chaleureusement et spécialement notre Encadreur, **Melle BOUFADES Djamila** qui accepté de suivre ce travail, pour sa disponibilité, sa guidance, son écoute et ses conseils précieux grâce à lesquelles nous avons pu préserver et rester toujours motivés. Aussi Nous remercions également notre Co-encadreur **Mr ADJOU Zakaria** pour sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribués à alimenter notre réflexion.*

*Nous présentons nos remerciements à Monsieur **DOUAK Mohamed** pour accepter de juger et présider le jury de ce mémoire, Nous exprimons notre gratitude à Monsieur . **LEBTAHI Hamid** d'avoir accepté d'examiner ce travail, Leur présence est garante pour nous d'un examen rigoureux et d'une critique juste de notre travail.*

*Nous remercions sincèrement Monsieur **SOULEH Hamza** et tous l'équipe EP et EXP au niveau de DP TFT. Pour leurs bienveillances et leurs efforts ce qui nous aidé énormément à accomplir ce travail*

*Et avec un plaisir particulier que nous remercions l'équipe de centre de recherche et développement-(CRD) Boumerdes et surtout Monsieur **BELOUNIS Abderahim** pour nous mettre sur la bonne voie pour effectuer ce travail.*

Nos remerciements s'adressent également à tous les enseignants qui nous ont enseignés tout le long de notre parcours universitaire et à toute l'équipe Pédagogique de la faculté des hydrocarbures, des énergies renouvelables et de la science de la terre et de l'univers et en particulier celle du département de production.

Dédicace :

On dédie ce modeste travail aux

A nos pères, et nos mères pour leurs immenses

Sacrifices, encouragements constants et leurs

Amour inconditionnel. Que Dieu les garde à jamais.

A nos frères et A notre famille

. Que Dieu Miséricordieux les protège.

A nos chers amis. Que dieu bénisse leurs jours.

A tous les professeurs qui m'ont enseigné tout au long de notre

parcours scolaire et universitaire.

NAOUIHA Abderrezzak , TAMER Tahar , NECIRI Brahim Khalil

Résumé

Ce travail porte sur l'étude des nouvelles technologies de traitement de l'eau d'injection sulfatée qui sont basées sur le principe de filtration sur les membranes polymériques telles que la nanofiltration et l'osmose inverse, ces techniques ont été proposées au niveau de champs de TFT grâce à une forte concentration des ions de sulfates dans l'eau d'injection. L'échantillonnage des eaux de LIAS et celle de l'ORDOVICIEN était nécessaire afin de déterminer la composition élémentaire de ces eaux. Le traitement par la filtration membranaire a montré une efficacité très élevée pour une réduction significative des ions de SO_4^{-2} dans l'eau de LIAS, et enfin l'inhibition de formation des dépôts de sulfates et l'augmentation de la productivité de puit. Ce paramètre permet notamment de faire varier la taille des pores des membranes. Les résultats obtenus montrent qu'un taux d'élimination des sulfates très élevé (99,9%) pour la technique d'osmose inverse tandis que la nanofiltration reste sélective avec un TDS élevé et une élimination des sulfates jusqu'à presque 98%.

Mots clés : traitement, sulfates, eau d'injection, membranes , nanofiltration, osmose inverse ,

Abstract

This work concerns the study of new technologies of treatment of sulphated water injection which are based on the principle of filtration on polymeric membranes such as nanofiltration and reverse osmosis, these techniques were proposed at the level of TFT fields because of the high concentration of sulphate ions in the injection water. Sampling of LIAS and ORDOVICIEN waters was necessary to determine the elemental composition of these waters. The treatment by membrane filtration showed a very high efficiency for a significant reduction of SO_4^{-2} ions in the LIAS water, and finally the inhibition of the formation of sulfate deposits and the increase of the well productivity. This parameter allows to vary the pore size of the membranes. The results obtained show a high sulfate removal rate (99.9%) for the reverse osmosis technique while nanofiltration remains selective with a high TDS and a sulfate removal up to almost 98%.

Keywords: treatment, sulfates, water for injection, nanofiltration , membranes, reverse osmosis

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة التقنيات الجديدة لمعالجة مياه الحقن الكبريتية والتي تعتمد على مبدأ الترشيح على الأغشية البوليمرية مثل الترشيح النانوي و التناضح العكسي ، وقد تم اقتراح هذه التقنيات على مستوى حقل TFT بسبب لتركيز العالي من شوارد الكبريتات في ماء الحقن. كان أخذ عينات من مياه LIAS و ORDOVICIEN ضروريًا لتحديد التكوين الأولي لهذه المياه. أظهرت المعالجة بالترشيح الغشائي كفاءة عالية جدًا لتقليل شوارد SO_4^{-2} في مياه LIAS، وأخيرًا تثبيط تكوين رواسب الكبريتات وزيادة إنتاجية البئر. هذا العامل يجعل من الممكن على وجه الخصوص تغيير حجم مسام الأغشية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن معدل إزالة الكبريتات مرتفع (99.9%) لتقنية التناضح العكسي بينما يظل الترشيح النانوي انتقائيًا مع نسبة عالية من المواد الصلبة الذائبة وإزالة الكبريتات بنسبة تصل إلى 98% تقريبًا.

الكلمات المفتاحية: المعالجة، الكبريتات، ماء الحقن، الأغشية البوليمرية، الترشيح النانوي، التناضح العكسي

Abréviations

TFT	Tin foyé tabankourt
AD32	Anti-depots
NF	Nano filtration
RO	Osmose inverse (reverse osmose)
Ppm	Partie par million
SR	Rapport de saturation du tartre
Pi	Le produit ionique
IS	Indice de saturation
MIC	Concentration minimale de l'inhibition
EDTA	Éthylène diamine tetraacetic acide
CS	Centre de séparation
CPC TFT	Centre principale collecte tin foyé tabankourt
CRD	Centre de recherche et developpement
DTD	La division technologie et développement
UTGA	Unité de traitement gaz associé
cEOR	Chemical enhanced oil recovery
SWCTT	Single well chemical tracer test
LSWF	Low salinity water flooding
CRTE	Centre de recherche des technologies des semi-conducteurs
TDS	Total dissolved solids
ASP	Alkaline – surfactants – polymer
SP	Surfactants – polymer
BSW	Basic sediment and water
TVR	Tension de vapeur Reid
RR	Recovery ration
STP	Standard temperature and pressure
DTPA	Diéthylène triamine pebtaacetic
SRU	Sulfate removal unit

Nomenclature

C	Concentration	ppm
IP	L'indice de productivité	sm ³ /jr/bar
GOR	Gas Oil Ratio	sm ³ /sm ³
P	Pression	psi ou Kg/cm ²
Q	Débit	bbbl/jour ou m ³ /h
S	Solubilité	g/l au mol/l
T	Température	°C
V	Volume	l
R	Taux d'inhibition	%
EF	Efficacité d'inhibition	%
K	Perméabilité	Darcy
Ø	Porosité	%

Liste des figures

Figure I.1: Dépôt de Sulfate de baryum sur les pipe.	5
Figure I.2: Précipitation de BaSO ₄ dans les installations de fond et de surface.	5
Figure I.3 : Poudre blanche de sulfates de baryum	6
Figure I.4 : Structure cristalline de sulfate de baryum par SEM	6
Figure I.5 : Outil de Milling	12
Figure I.6 : Outils de Broche	12
Figure I.7: Sterling Beads	13
Figure I.8 : Jet Blaster.....	13
Figure I.9: Profil de concentration d'un inhibiteur dans l'eau cumulée	15
Figure I.10 : Représentation schématique de la séparation par membrane.....	17
Figure I.11 : Propriétés des membranes de chaque processus	18
Figure I.12 : Schéma du principe de l'osmose et l'osmose inverse	19
Figure I.13 : Membrane spiralée (membrane utilisée a NF et RO)	20
Figure I.14 : L'inhibiteur de dépôt AD32.....	21
Figure II.1 : Situation géographique de Tin Fouyé Tabankort	25
Figure II.2 : Coupe stratigraphique du champ de TFT	27
Figure II.3: Carte structural de champ TFT.....	28
Figure II.4: Solution de dosage AgNO ₃	32
Figure II.5: PH mètre	33
Figure II.6: Solution de dosage EDTA	35
Figure II.7: Image originale du sel de sulfates de baryum formé dans une conduite la zone de TFT	36
Figure II.8: Dépôt de sulfate de baryum dans le gisement.....	37
Figure II.9: Précipitation de sulfate de baryum dans les manifolds	37
Figure II.10: Précipitation de sulfate de baryum dans les séparateurs	38
Figure II.11: Précipitation de sulfate de baryum dans les bacs tampon	38
Figure II.12: Précipitation de sulfate de baryum dans les collectes	38
Figure II.13: Schéma de circulation des fluides centre de séparation N°3.....	40
Figure II.14: Schéma de la zone de contrôles des dépôts.....	40
Figure II.15: Principe de séparation sélective	43
Figure II.16 : La séparation sélective au niveau de CS1	43
Figure III.1: Unité pilote de traitement d'eau	47
Figure III.2: Installation de traitement d'eau d'injection	47
Figure III.3 : Les membranes BW30 4040(RO) ET NF270 4040 (NF).....	51

Figure III.4 : Les concentrations des composants chimiques de l'eau traitée par nanofiltration	53
Figure III.5 : Le débit d'eau traitée	54
Figure III.6 : La concentration des composants chimiques d'eau traitée en fonction de changement de la pression	55
Figure III.7 : Les concentrations des composants chimique de l'eau traitée par l'osmoseinverse	57
Figure III.8 : Expérience pour déterminer la précipitation de BaSO ₄	57

Liste des tableaux

Tableau I.1: Produits de solubilité du sulfate de baryum à 25°C mesurés par différents Auteurs	07
Tableau II.1: Les caractéristiques pétrophysiques des différentes unités de réservoir	24
Tableau II.2: La caractérisations des fluides	24
Tableau II.3: Essai et résultats du laboratoire	35
Tableau II.4: Suivi des puits hydratés en vue de la séparation sélective	37
Tableau III.1: Composition chimique des eaux	43
Tableau III.2: Résultats d'analyses des mélanges des eaux des deux réservoirs	44
Tableau III.3 : Caractéristiques des membranes utilisées	45
Tableau III.4 : Analyse de l'eau lias (concentration en ppm)	46
Tableau III.5: Résultats d'analyses physicochimiques de l'eau traitée avec la nanofiltration	47
Tableau III.6 : Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau traitée avec l'osmose inverse	51

Sommaire

<i>Remerciements</i>	i
<i>Dédicace</i> :	ii
Résumé	iii
Abréviations	iv
Nomenclature	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Sommaire	ix
Introduction générale	1

Etude Bibliographique :

Chapitre I : Déposition et traitement des dépôts des sulfates de baryum

Introduction.....	4
I.1.Les Sulfates de baryum :	4
I.2.Localisation des dépôts de sulfate baryum	5
I.3.Propriétés physico-chimiques des sulfates de baryum	5
I.3.1.Structure cristalline du sulfate de baryum	6
I.3.2.Solubilité du sulfate de baryum	7
I.3.3.Taux de Saturation :	8
I.4.Déposition des sulfates de baryum.....	9
I.4.1.Mécanisme de formation des dépôts.....	9
I.4.2.Etapes de formation de dépôts sulfate de baryum :	10
I.4.3.Les principales causes de formation des dépôts	10
I.5.Prévention et Traitement de Dépôt sulfate de baryum :	11
I.5.1.Traitement curatif.....	11
I.5.2.Traitement préventif.....	13
I.6.Les travaux réalisés (l'état de l'art) de traitement des dépôts de sulfates de baryum	21

Conclusion :	23
--------------	----

Etude pratique:

Chapitre II : La résolution de problème des sulfates de baryum au champs TFT

Introduction :	25
II.1.Présentation de la région Tin Fouyé Tabankort:	25
II.1.1.Situation géographique:	25
II.1.2.Situation géologique :	26
II.1.3.Structure de gisement de TFT:	28
II.1.4.Caractéristiques de roche réservoir de TFT:	28
II.1.5.La structure de la région de TFT :	29
II.2.Extraction des dépôts de BaSO ₄ dans laboratoire :	30
II.2.1.Attaque acide	30
II.2.2.Attaque alcaline	30
II.2.3.Attaque alcaline Teneur NaCl	31
II.2.4.Dosage Du magnésium	32
II.2.5.Dosage du fer total	33
II.2.6.Dosage Du Calcium	34
II.3.Problème de sulfate de baryum au champs TFT :	35
II.3.1.Dépôt de sulfate de baryum dans le gisement :	36
II.3.2.Précipitation de sulfate de baryum dans les équipements de surface :	37
II.3.3.Conséquences:	39
II.4.Traitement de BaSO ₄ au niveau de TFT :	39
II.4.1.Traitement par des inhibiteurs chimiques:	39
II.4.2.La séparation sélective :	41
Conclusion :	44

Chapitre III : Etude et analyse de l'application de la nanofiltration au niveau de champs TFT

Introduction :	46
III.1.Description du pilote :	46

III.2.Analyse chimique des eaux :	48
III.3.Précipitation critique :.....	49
III.4.Filtration membranaire des eaux d'injection	49
III.4.1.Membranes utilisées.....	50
III.4.2.Résultats d'analyse d'eau traitée avec la Nano Filtration.....	52
III.4.3.Résultats d'analyse d'eau traitée avec l'osmose inverse.....	56
III.5.Effet des technologies de nanofiltration et l'osmose inverse sur la précipitation de sulfates de baryum	58
Conclusion :	59
<i>Conclusion générale</i>	60
Références bibliographiques.....	61

I

Introduction générale

Introduction générale

Dans le champ pétrolier, la production du pétrole est exposée à de nombreux problèmes ; parmi eux est la formation de dépôts organique (asphaltènes, résines, paraffines, cires ...etc.) et dépôts minéraux (carbonates et sulfates).

Le tartre de sulfate $BaSO_4$ est le dépôt de sel le plus gênant car les limites de solubilité sont très basses et les dépôts sont durs et compacts. L'incompatibilité entre l'eau d'injection et l'eau de gisement provoque ces dépôts . Les eaux de gisement peuvent contenir des ions baryum (Ba^{+2}) et être mises en contact avec des eaux d'injection , qui contiennent des ions de sulfates (SO_4^{-2})[1]

La nanofiltration c'est une technologie qui se caractérise par un taux de conversion et un débit élevé, très sélective, et non énergivore pour prévenir la formation de $BaSO_4$. Elle permet l'adsorption de polluants solides ayant une taille nanométrique supérieur (10 \AA) [2], les sels ionisés monovalents et les polluant solides organiques non ionisés de taille inférieure à 200 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane. Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates, baryum) et les polluants solides organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus [3]

Problématique de l'étude

Pendant la récupération secondaire , l'injection de l'eau dans les puits du pétrole au niveau de champs TFT pour le but de maintenir une pression élevée . cette opération pose le problème des dépôts de sulfates de baryum . Ces dépôts résultant de l'incompatibilité de l'eau d'injection Lias (sulfaté) et l'eau du réservoir d'Ordovicien (baryté) et qui conduit à des problèmes de colmatage dans les puits, bacs de stockage de pétrole brut, et dans les conduites de transport du pétrole brut, ce qui influe directement sur la production

Au niveau de champs de TFT, le traitement de ces dépôts est réalisé par la séparation sélective de l'huile ou par l'utilisation des inhibiteurs chimiques, mais ces techniques restent inefficaces pour réduire la formation des dépôts grâce aux fortes

concentrations des ions sulfatés dans l'eau d'injection (LIAS)

Objectifs de l'étude

C'est dans ce contexte spécifique que se situe le travail de ce manuscrit. L'objectif est d'étudier et analyser l'application de la technologie membranaire à savoir , la nanofiltration et l'osmose inverse au niveau de champ TFT et leur intégration dans les procédés d'inhibition de formation des dépôts de BaSO_4 ; afin de maintenir l'exploitation particulièrement perturbée par ce phénomène de déposition et de réduire le coût de la maintenance des installations .

Ce travail est une partie de projet SWCTT, LCWF de centre de recherche et de développement (CRD) de Sonatarch -Boumerdes, ce projet a pour but de traiter l'eau d'injection de TFT par deux nouvelles techniques membranaires à savoir la nanofiltration et l'osmose inverse.

Il sera donc proposer , dans un premier chapitre, une étude bibliographique sur les sulfates de baryum et leur déposition dans les puits pétroliers et sur la surface , les méthodes de traitement utilisées dans la littérature .

Le second chapitre présente le traitement des dépôts de sulfates de baryum au niveau de champs de TFT par la séparation sélective et par l'utilisation des inhibiteurs Aquaprox résolution de problème de sulfate baryum au champs TFT.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des nouvelles technologies proposées à savoir la nanofiltration et l'osmose inverse afin de désulfater l'eau de LIAS de champs TFT , plusieurs analyses ont été effectués sur les eaux d'injection et celle de formation , ainsi une application sur l'unité pilote des deux techniques précédentes.

Nous finirons le manuscrit par une conclusion générale qui reprendra les principaux résultats de ce travail, tout en proposant quelques perspectives pour améliorer le traitement des eaux d'injections par les technologies membranaires .

Chapitre

I

*Etude Bibliographique : Déposition
et traitement des dépôts des sulfates
de baryum*

Introduction

Cette introduction bibliographique est très générale s'appuyant sur des illustrations issus de la littérature sur les dépôts de sulfates de baryum , la première partie de ce chapitre présente des généralités sur les des sulfates de baryum , leur origine , ainsi leurs caractéristiques physico-chimiques et la solubilité de $BaSO_4$, la seconde partie concerne la déposition des sulfates de baryum , l'effet des conditions de réservoir sur leur formation , à la fin nous allons présenter les techniques de traitement utilisées que ce soit curatives ou préventives

I.1 Les Sulfates de baryum :

Le sulfate de baryum est un précipité grisâtre insoluble même dans les acides forts (la solubilité : 2,3 mg/L à STP), la produit de solubilité faible $K_{PS}=10^{-10}$ et le poids spécifique de la barytine est d'environ 4,5[4]. Les précipitations sont assez dures, leur dureté Mohr étant comprise entre 2,5 et 3,5 [5]

Suite à l'interaction de l'eau contenue dans le réservoir (eau de gisement qui est chargée en baryum Ba^{+2}), et l'eau injectée (eau d'injection-lia- qui est chargée en élément sulfate SO_4^{-2}), il se forme le dépôt de sulfate de baryum et donne des résultats néfastes sur les équipements utilisés lors le dessalage : bouchage des puits et corrosion des installations. Ces deux phénomènes influent beaucoup sur le procédé d'extraction de pétrole et par conséquent une diminution de la production pétrolier [1].

résultant d'une réaction de la rencontre des ions sulfates avec les ions baryum.

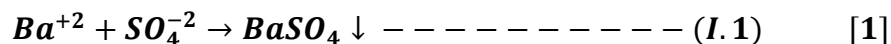




Figure I.1: dépôt de Sulfate de baryum sur les pipe.[6]

I.2 Localisation des dépôts de sulfate baryum

La précipitation de sulfate baryum $BaSO_4$ n'est toutefois pas limitée à des réservoirs de pétrole. Les dépôts peuvent se produire sur les puits, les tubings, les installations de surface, ou dans les équipements de la raffinerie utilisés pour le traitement du pétrole brut [7]

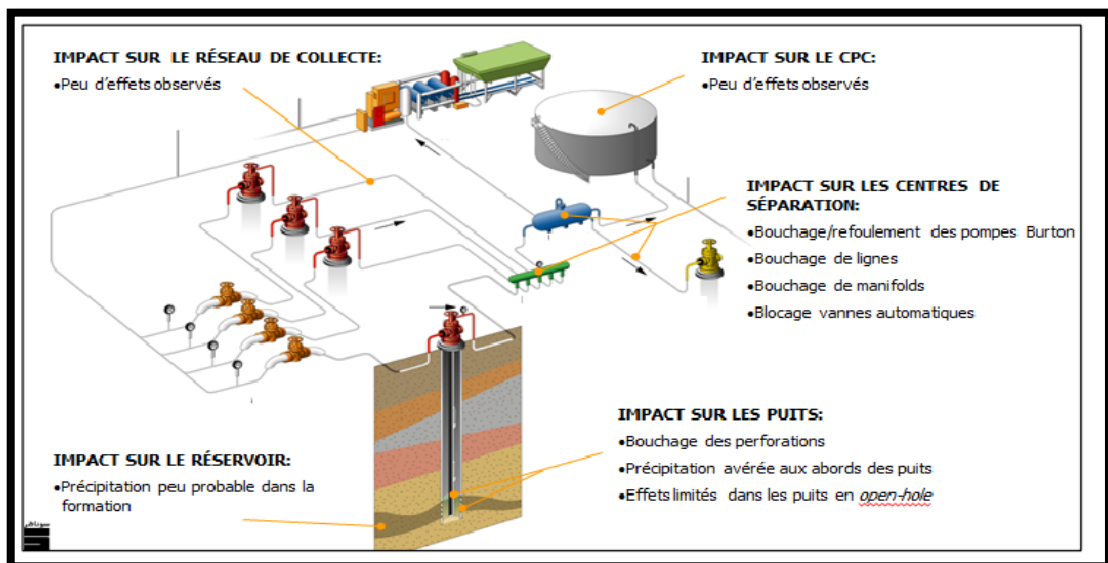


Figure I.2:Précipitation de $BaSO_4$ dans les installations de fond et de surface.[7]

I.3 Propriétés physico-chimiques des sulfates de baryum

Le sulfate de baryum a sa formule chimique $BaSO_4$. Il s'agit de cristaux orthorhombiques grisâtre ou blancs ayant une masse moléculaire relative de 233,4, une densité relative de 4,5 (15 °C), un point de fusion de 1580 °C et un indice de réfraction de 1,637. Il est presque insoluble dans l'eau avec une solubilité de 0,00022 à 18 °C et de 0,0041 à 100 °C. Il est légèrement soluble dans l'acide sulfurique concentré et soluble

dans une solution de carbonate de métal alcalin dans laquelle il est converti en carbonate de baryum il est insoluble dans d'autres types d'acides ou de bases. Dans la nature, il existe sous la forme minérale de baryte [8]



Figure I.3 : Poudre blanche de sulfates de baryum . [8]

I.3.1 Structure cristalline du sulfate de baryum

Les cristaux de BaSO_4 comme ceux du SrSO_4 sont, d'une part, orthorhombiques mailles très voisines, d'autre part, ils sont de nature poreuse avec tendance à absorber les ions étrangers qui peuvent Co-précipiter. Par contre le CaSO_4 est orthorhombique, monoclinique à mailles très différentes de celles du BaSO_4 et du SrSO_4 . [9]

Le sulfate de baryum cristallise dans le système orthorhombique. Ses paramètres de maille varient selon les auteurs. Obtiens :

$$\mathbf{a} = 8,88 \text{ \AA} ; \mathbf{b} = 5,46 \text{ \AA} ; \mathbf{c} = 7,16 \text{ \AA}$$

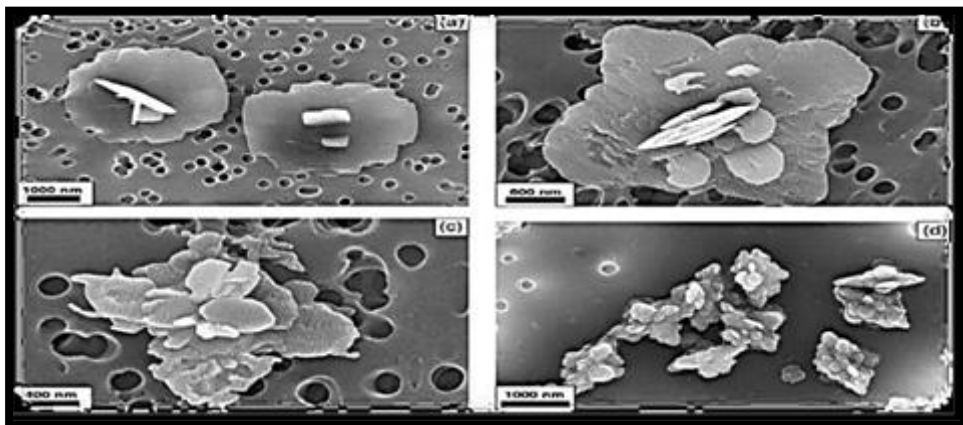


Figure I.4 : Structure cristalline de sulfate de baryum par SEM [10]

I.3.2 Solubilité du sulfate de baryum

La solubilité est définie comme la quantité limite de soluté qui peut se dissoudre dans un solvant dans un ensemble donné de conditions physiques. Les propriétés chimiques qui nous intéressent sont présentes dans les solutions aqueuses sous forme d'ions. Certaines combinaisons de ces ions conduisent à des composés qui ont une faible solubilité. Une fois que la capacité de solubilité est dépassée, les composés précipitent de la solution sous forme de solides. Par conséquent, la précipitation de matériaux solides, qui peuvent former du tartre, se produira si [11] :

- L'eau contient des ions, qui sont capables de former des composés de solubilité limitée.
- Une modification des conditions physiques ou de la composition de l'eau entraîne une diminution de la solubilité.

Les facteurs qui affectent la précipitation, le dépôt et la croissance cristalline du tartre sont la sursaturation, la température, la pression, la force ionique, l'évaporation, le temps de contact et le PH. Un contrôle efficace du tartre devrait être l'un des principaux objectifs de toute injection d'eau efficace et de toute opération de production normale dans les champs de pétrole et de gaz .

Le tartre de sulfate de baryum (barytine) dans les champs pétrolifères peut être précipité facilement sur la base des informations déjà disponibles concernant les conditions thermodynamiques et la cinétique de la précipitation [11]. La solubilité du sulfate de baryum Augmente avec l'augmentation de la température, avec l'augmentation de la force ionique de la saumure et avec la pression. La précipitation du sulfate de baryum est plus fortement affectée par la température [12].

Le BaSO₄ est, en effet, le sel de sulfate qui a la plus faible solubilité. A 25°C, Rosseinsky (1958) mesure par conductimétrie une solubilité égale à $1,04 \times 10^{-5}$ mol/L soit 2,4 mg/L. Malinin et al. (1969) et Helgeson (1969) mesurent un produit de solubilité à 25°C de $1,90 \times 10^{-10}$ et $1,99 \times 10^{-10}$ (mol/L)². Le Tableau I.1 regroupe quelques produits de solubilité à 25°C rapportés dans la littérature [13].

Chapitre I : Etude bibliographique

Tableau I.1: Produits de solubilité du sulfate de baryum à 25°C mesuré par différents Auteurs .

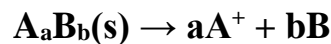
Références	Produit de solubilité à 25°C
Templeton (1960)	$1,10 \times 10^{-10}$
Khodakovskiy et al. (1966)	$1,02 \times 10^{-10}$
Blount (1977)	$1,06 \times 10^{-10}$
Raju et Atkinson (1988)	$1,10 \times 10^{-10}$

La solubilité de BaSO₄ dans l'acide sulfurique concentré (densité 1,853) est de 15,89g dans 100g de solution saturée à 25°C. La solubilité chute rapidement quand la solution d'acide sulfurique est diluée (0,05g pour 100g de solution saturée contenant 83,25% d'acide concentré) BaSO₄ est peu soluble dans les autres acides [13].

✓ Le produit de solubilité

Le produit de solubilité (K_{ps}) est le produit des concentrations des ions présents à l'équilibre [14].

Généralement, pour la réaction de dissolution :



La solubilité et le produit de solubilité sont attachés avec l'équation :

$$K_{ps} = [A^+]^a * [B^-]^b \text{ --- (I.2) [14]}$$

La valeur du produit de solubilité dépend de la température. Plus le K_{ps} est bas, moins le composé est soluble [14].

✓ Le produit ionique

Produit ionique « Pi » produit des concentrations molaires des ions en solution d'un composé peu soluble [15].

✓ Conditions de précipitation

Si $Pi < K_{ps} \Rightarrow$ pas de précipitation.

Si $Pi > K_{ps} \Rightarrow$ existante de précipitation.

Si $Pi = K_{ps} \Rightarrow$ limite de précipitation (apparition du précipité) [15].

I.3.3 Taux de Saturation :

La tendance à la formation de tartre peut être prédite en calculant le rapport de saturation du tartre (SR). Lorsqu'un sel peu soluble tel que le sulfate de baryum

(BaSO₄) est ajouté à l'eau, les ions Ba⁺² et SO₄⁻² se dissolvent dans la solution de saumure. Le SR est alors calculé comme suit :

$$SR = \frac{(Ba)^{+2}(SO)_4^{-2}}{K_{sp}(T,P)} \quad \text{--- (I.3) [16]}$$

Où (Ba⁺²) et SO₄⁻² désignent les activités aqueuses du baryum et du sulfate, respectivement, en unités molaires. K_{PS} désigne le produit de solubilité du sulfate de baryum. K_{PS} (T, P) indique que le produit de solubilité est une fonction de la température et de la pression. Lorsque le SR calculé est supérieur à 1, la solution est sursaturée et la précipitation du calcaire peut avoir lieu à partir de la solution. Par la suite, l'indice de saturation (IS) peut être calculé comme le logarithme en base 10 du RS :

$$SI = \log_{10}(SR) = \log_{10} \frac{(Ba)^{+2}(SO)_4^{-2}}{K_{sp}(T,P)} \quad \text{--- (I.4) [16]}$$

Si SI = 0, la solution est en équilibre (saturée) avec le minéral de tartre d'intérêt et l'eau ne peut pas contenir plus du minéral en solution à une condition de température et de pression donnée . Si SI < 0, la solution est sous-saturée par rapport au minéral de tartre et l'eau a la capacité de dissoudre plus du minéral, où la dissolution peut avoir lieu mais la précipitation est pas possible. Si SI > 0, la solution est sursaturée. Le minéral peut précipiter jusqu'à ce que la concentration en solution atteigne l'équilibre, mais cela peut être cinétiquement retardé [16].

I.4 Déposition des sulfates de baryum

I.4.1 Mécanisme de formation des dépôts

Le dépôt de tartre peut se produire à partir d'un type d'eau en raison d'une sursaturation en sels formant le tartre, attribué à des changements dans les conditions physiques dans lesquelles l'eau existe. Le tartre se dépose également dans les pompes de fond de puits, les tubes, les conduites d'écoulement du tubage, les dispositifs de chauffage, les dispositifs de traitement, les réservoirs et autres équipements et installations de production.

Le tartre peut se produire à proximité en aval de tout point du système de production où une sursaturation est générée. La sursaturation peut être générée dans l'eau en modifiant les conditions de pression et de Température ou en mélangeant deux eaux incompatibles. Les dépôts les plus courants dans les champs pétroliers sont les

carbonates de calcium, les sulfates de calcium, et les sulfates de baryum [17].

I.4.2 Etapes de formation de dépôts sulfate de baryum :

a. Période de germination :

La germination est la période nécessaire pour regrouper des ions (par exemple Ba^{2+} et SO_4^{2-}) ou des molécules à l'intérieur d'un espace supposé sphérique caractérisé par un rayon.

Dans une solution sursaturée par rapport à une phase, celle-ci peut précipiter plus ou moins rapidement en fonction des conditions du milieu de croissance :

- ✓ Valeurs de la sursaturation et de la concentration,
- ✓ Nature et concentration des impuretés, etc.

Il existe deux types de La germination :

- ✓ Homogène (spontané) dominant à la sursaturation élevée
- ✓ Hétérogène induite par les particules étrangères ou des impuretés dissoutes dans le système.[10]

b. Période de cristallisation :

Lorsque les grains de cristal apparaissent, deux facteurs interviennent :

- ✓ La fréquence avec laquelle de nouveaux ions arrivent à la surface du cristal déjà formé, cette fréquence est d'autant plus grande que leur concentration dans la solution est grande. Les grains de cristaux auront tendance à grossir plus vite si les concentrations des ions sont plus importantes.
- ✓ La vitesse avec laquelle les ions s'ordonnent dans le réseau cristallin. Si le premier facteur est prépondérant, les grains de précipité grossiront sous ordre, et l'on obtiendra des cristaux très irréguliers présentant des cavités et donc une plus grande surface (cristaux poreux). Au contraire, si le deuxième est prépondérant, les cristaux seront réguliers.[10]

I.4.3 Les principales causes de formation des dépôts

a. Chute de pression

L'eau de formation du fond des puits de forage au fur et à mesure du processus de production est soumise à la réduction continue de la pression. Lorsque la pression est suffisamment réduite, certains gaz dissous s'échappent. La diminution de la concentration d'un de ces gaz provoque un déséquilibre conduisant à la formation de dépôts. [9]

b. Changement de température

Certains équipements de surfaces s'échauffent, tels que les moteurs ou les échangeurs de chaleur des pompes ce qui provoque la formation de dépôts. Ceci étant, des études ont montré que s'agissant du BaSO_4 , malgré l'augmentation de la solubilité avec l'augmentation.

De façon générale, une élévation de température de 40° à 90° C provoque une augmentation de la solubilité de BaSO_4 et une diminution des solubilités de CaSO_4 et de SrSO_4 [9]

c. Changement des caractéristiques minérales

Un changement dans les caractéristiques minérales des eaux, pourrait conduire à la formation de dépôts en raison du changement des forces ioniques des ions en solution.

La concentration totale des sels (sels totaux) contenus dans l'eau constitue un facteur important .

La solubilité du sulfate de baryum dans l'eau est également favorisée par la présence des sels étrangers dissous [9]

d. Mélange des eaux incompatibles :

Lors de la récupération secondaire, l'eau des puits de production, contenant divers minéraux, mélangée après la percée, à de l'eau d'injection provoque un changement dans les caractéristiques minérales en raison de l'incompatibilité des deux eaux qui conduit à la formation de dépôt.

Dans notre cas, l'instabilité par rapport au sulfate de baryum est une conséquence directe de cet amalgame comme il est souvent le cas dans les champs d'hydrocarbures de la mer du Nord. En effet, lorsque deux eaux incompatibles, eau de formation contenant des ions de baryum et l'eau de mer contenant des ions sulfates sont mélangées, le dépôt de sulfate de baryum est formé.[9]

I.5 Prévention et Traitement de Dépôt sulfate de baryum :

I.5.1 Traitement curatif

a. Miling

C'est l'une des premières méthodes utilisées pour briser les écailles minces et fragiles. Il s'effectue par grattage mécanique à l'aide d'un racleur, Il est utilisé pour gratter les

Parois sur lesquels déposé le sulfate de baryum mais il peut causer des fissures au niveau de tubing au cours de l'opération. Cette opération est réalisée par les unités Wireline, Work Over et snubbing [18].

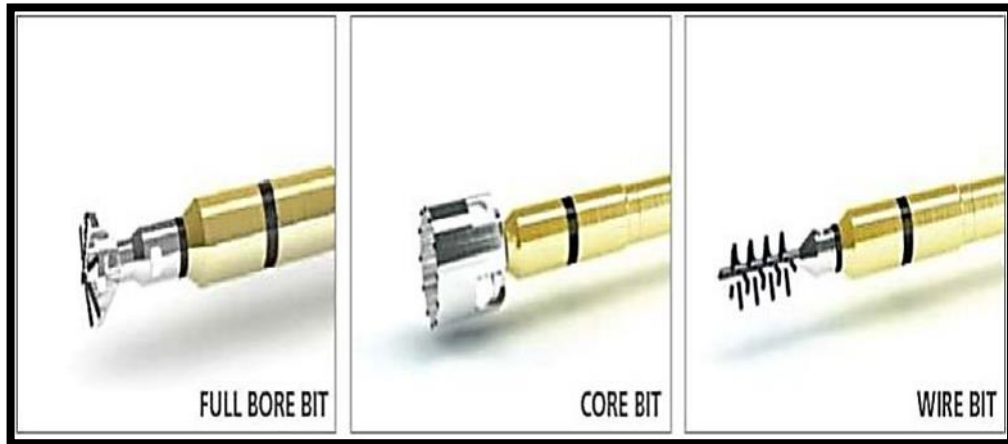


Figure I.5 : Outil de Milling [19].

b. Broche

Une broche est normalement utilisée sur un câble mécanique et est un outil de fond de puits utilisé pour enlever le tartre dans les parties supérieures du tube de production afin d'augmenter le diamètre interne et de rétablir l'accès par câble aux parties plus profondes du puits . La broche est secouée de haut en bas pour éliminer l'accumulation de tartre sur la paroi du tubing. L'opération doit être répétée avec des broches de diamètre extérieur croissant, pour éliminer toute la calamine [20]



Figure I.6 : Outils de Broche . [20]

c. Scale Blaster

Scale Blaster est un traitement mécanique par l'unité coiled tubing employé principalement pour nettoyage des dépôts de sulfate de baryum au niveau des

Chapitre I : Etude bibliographique

perforations et des obstructions à l'intérieur de tubing. Il consiste à utiliser un fluide visqueux avec du sable et à haute pression [20].

ScaleBlaster = Jet Blaster + gel + sable artificiel (Sterling Beads).

Les propriétés de Sterling Beads :

- ✓ N'est pas abrasive.
- ✓ Plus efficace sur les dépôts très durs, les bouchons de ciment.
- ✓ Pour enlever les dépôts durs et inertes tels que BaSO_4 .
- ✓ Nettoyage positif et à un seul passage.
- ✓ Technique sécurisée.



Figure I.7: Sterling Beads [20].

d. Jet Blaster

Il est utilisé pour l'élimination de tartre inerte BaSO_4 , c'est un outil de nettoyage souple au jet à haute pression descendu par le coiled tubing [20].



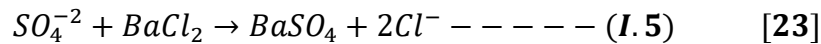
Figure I.8 : Jet Blaster [21 ,22].

I.5.2 Traitement préventif

a. Le procédé soustractif

Par élimination des ions formateurs de dépôts ; exemple élimination des ions sulfates

SO₄⁻² contenus dans l'eau d'injection, en précipitant ceux-ci par BaCl₂ suivant la réaction Suivante :



b. Le procédé additif (par Injection Continue d'un inhibiteur)

La méthode d'injection continue d'un inhibiteur est effectuée dans des puits injecteurs et Des puits producteurs. Cette technique permet de pomper sans interruption d'un inhibiteur En bas de la concentrique à une certaine profondeur. L'inhibiteur est dilué pour réaliser une Bonne distribution et pour éviter la précipitation aux abords de puits provoquée par L'inhibiteur concentré [24].

c. Squeeze de la solution d'inhibiteur dans la formation

Les traitements par "squeeze" sont l'une des techniques les plus courantes d'atténuation du tartre. Ils sont généralement déployés pour inhiber les dépôts de sulfate et en particulier la barytine, qui a une solubilité extrêmement faible et est très dure. La prévention est essentielle, car le tartre sulfaté ne se dissout à une vitesse raisonnable dans les meilleurs dissolvants que si l'on dispose de suffisamment de temps et de température [25]. Compte tenu de la faible température du réservoir, les dissolvants de tartre ne devraient pas être très efficaces. Les traitements préventifs et correctifs de l'entartrage sont donc le plan principal [26].

Actuellement, la majeure partie des traitements est réalisée via la technique du "squeeze" d'inhibiteur. Cette technique consiste en l'arrêt de la production du puits à traiter, puis injection d'un certain volume de solution aqueuse inhibitrice dans le réservoir et fermeture de celui-ci pour laisser l'inhibiteur s'adsorber sur la roche.

Cette opération peut durer de quelques jours à quelques semaines avant de remettre le puits en production, selon l'état d'endommagement par précipitation de la zone de réservoir aux abords des puits. Le procédé de rétention des molécules d'inhibiteurs sur la roche peut avoir lieu selon différents modes, décrits ici [27].

- Adsorption réversible des molécules sur la roche,
- Précipitation des molécules sur la roche, qui peut être améliorée, dans le cas d'inhibiteurs phosphatés dans les réservoirs carbonatés, par l'injection d'une solution de CaCl₂.

Lors de la reprise de la production, l'inhibiteur est progressivement libéré dans l'eau.

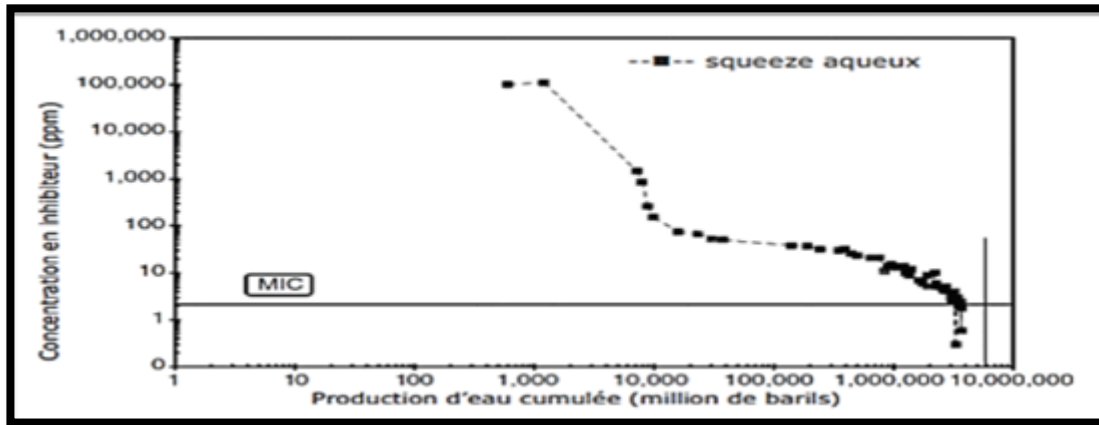


Figure I.9: Profil de concentration d'un inhibiteur dans l'eau cumulée[27].

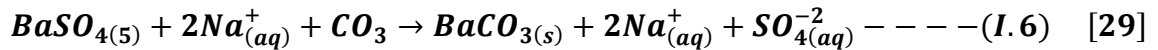
Toutefois, pour être efficace, il doit être libéré dans les eaux de production à un taux suffisant qui permette de prévenir la formation des dépôts. Cette valeur est appelée la Concentration Minimale d'Inhibition (MIC) : concentration la plus basse d'inhibiteur pour laquelle les dépôts ne se forment pas/ne croissent pas. Ci-dessous, sur la Figure I.9, est représentée une courbe classique de libération d'inhibiteur en fonction de l'eau produite avec la MIC.

d. Dissolution chimique

Le sulfate de baryum est un tartre extrêmement résistant et, une fois formé, il est très difficile de l'éliminer par acidification. Il n'est pas efficacement dissoluble par les acides. Une approche plus efficace pour l'inhibition de ce type de tartre est l'utilisation d'agents chélateurs. Les agents chélateurs sont des produits chimiques qui forment des complexes avec des ions métalliques libres et qui éliminent ainsi l'excès d'ions métalliques disponibles pour réagir avec les anions. Voici quelques exemples d'agents chélateurs courants (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid) EDTA, l'acide (Diethylene Triamine Pentaacetic Acid) DTPA l'acide gluconique, l'acide citrique, et les antitartres/dispersants à base de polymères tels que l'acide polyacrylique ou l'acide acrylique, les copolymères à base d'acide maléique [28]. Le but d'employer les agents de chélation tels que l'EDTA et les DTPA est de transformer le sulfate de baryum insoluble en carbonate de baryum ou d'autres composés il est plus facile à dissoudre qu'en utilisant un acide. En peut commander la stabilité du complexe du métal par la concentration en ion d'hydrogène (c.-à-d. PH). Ceci le plus généralement est fait par dissoudre l'hydroxyde de sodium en solution pour augmenter le PH de milieu. Une augmentation du PH favorisera la déportation des molécules d'EDTA et de DTPA (C.-à-d. l'enlèvement des

atomes d'hydrogène) à la forme (EDTA)⁻⁴ ou (des ions de (DTPA)⁻⁶ Ces complexes d'ion peuvent maintenant adhérer au sulfate de baryum et enlever les ions de Ba⁺² en conséquence, laissant les ions de SO₄⁻² en solution [29].

La réaction chimique suivante se produit lorsqu'on utilise un agent chélateur tel que le DTPA ou l'EDTA avec de l'hydroxyde de sodium dans la solution. Na⁺ n'est qu'un ion spectateur dans la réaction, comme le montre l'équation.



e. Traitement par désulfatation des eaux d'injection

Dans certains cas, et selon les caractéristiques géologiques du réservoir, les sulfates doivent être éliminés, notamment lorsque l'eau de formation est riche en ions Sr⁺² et Ba⁺². Cela permet d'éviter la précipitation du sulfate de baryum et donc le colmatage des roches poreuses du gisement. Les sulfates peuvent être éliminés par des unités SRU (Sulfate Removal Unit) constituées de membranes de nanofiltration / osmose inverse [30].

Ces unités comportent la même filière de traitement :

- ✓ prise en mer.
- ✓ tamisage grossier à 100 µm.
- ✓ filtration fine (par ultrafiltration, par Dual Media filtration ou à l'aide de filtres à cartouche).
- ✓ filtration par nanofiltration pour éliminer les sulfates et atteindre des concentrations inférieures à 40 mg/L.

➤ La filtration membranaire :

La technologie membranaire est devenue une véritable technologie de séparation au cours de la dernière décennie. La principale force de la technologie membranaire est qu'elle fonctionne sans ajout de produits chimiques et consomme relativement peu d'énergie ainsi elle dispose d'un contrôle de processus simple et clair.

La filtration membranaire est de plus en plus utilisée comme procédé de séparation dans de nombreux domaines, notamment dans les cycles de l'eau (potabilisation, traitement des eaux usées, réutilisation de l'eau, adoucissement, dessalement, etc.). Elle est basée sur l'application de différence de pression qui permettent le transfert du solvant à travers des membranes de la taille des pores qui

assurent la rétention du soluté [31].

Les opérations de la filtration membranaire sont classées selon la section des pores, on peut citer, la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse. Ces procédés sont matures technologiquement mais encore en plein développement industriel.

Le principe de la filtration membranaire est très simple. Les membranes agissent comme des filtres très spéciaux qui laissent passer l'eau tout en retenant les solides en suspension et autres substances [31].

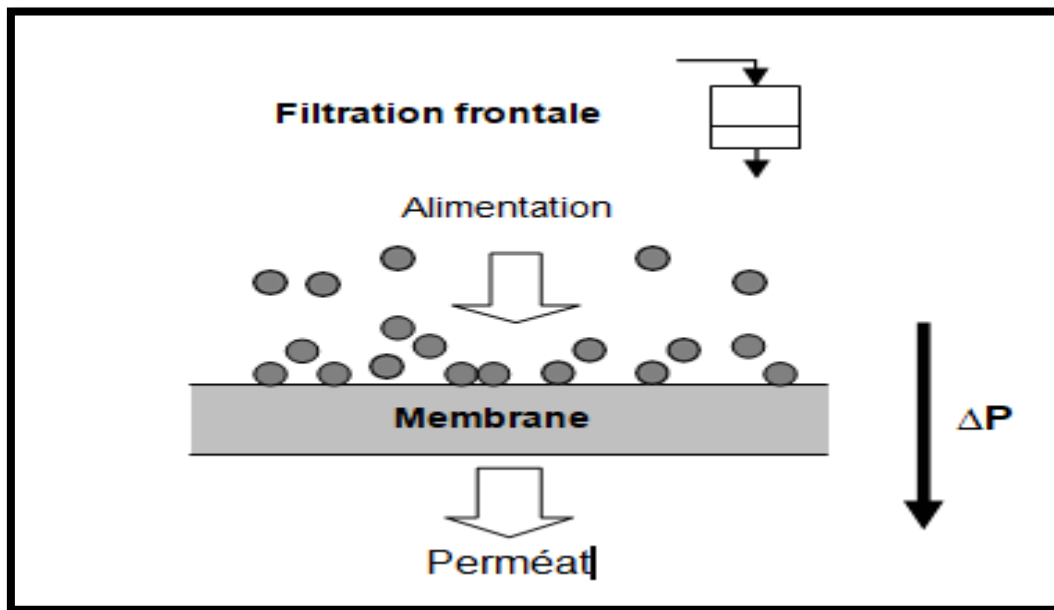


Figure I.10 : Représentation schématique de la séparation par membrane. [32]

Lorsque la filtration sur membrane est utilisée pour éliminer les particules de taille relativement importante on utilise la micro filtration ou l'ultra filtration, dans ce cas, la différence de pression est faible et la productivité est élevée. Lorsqu'on doit éliminer les sels dans l'eau, on utilise la nanofiltration ou l'osmose inverse. Les membranes de nanofiltration et d'osmose inverse ne fonctionnent pas selon le principe des pores, la séparation s'effectue par diffusion à travers la membrane.

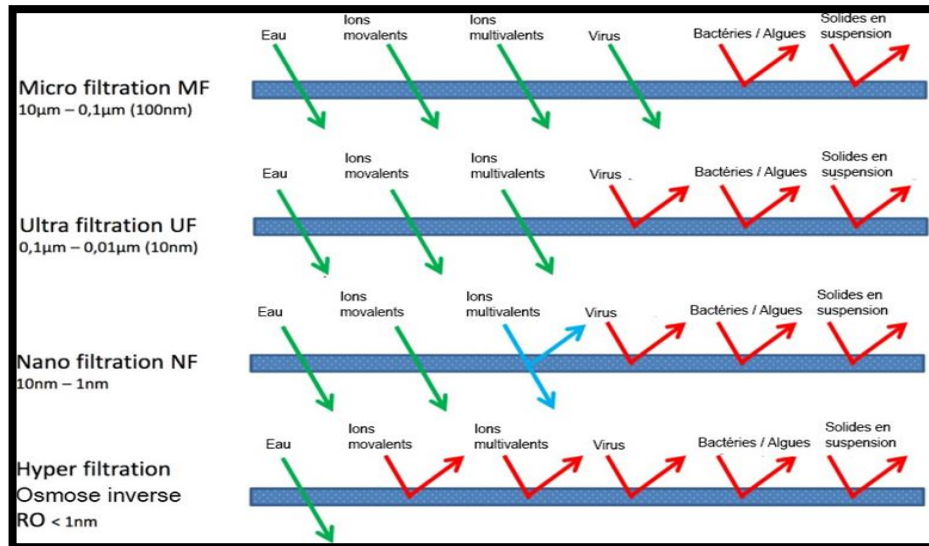


Figure I.11 : Propriétés des membranes de chaque processus [31].

La pression requise pour réaliser la nanofiltration ou l'osmose inverse est plus élevée que la pression requise pour la micro ou l'ultrafiltration tandis que la productivité est beaucoup plus faible [31].

Les types de procédés membranaires les plus utilisés pour la désulfatation des eaux d'injection :

✚ La Nanofiltration (NF)

La nanofiltration est un procédé membranaire sous pression qui se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. La membrane de NF possède des pores d'environ 0,001 micron (1 nanomètre) et a un rejet élevé pour les sels à anion di- et multivalent et les matières organiques. La technique de nanofiltration est souvent utilisée pour l'élimination de la dureté, du radium et du sulfate des eaux de puits, l'élimination du sulfate de l'eau de mer et l'élimination simultanée du chlorure de sodium et de la concentration des matières organiques dans les industries alimentaires et pharmaceutique [33].

✚ L'Ososme inverse (OI)

Les membranes d'osmose inverse ont des pores d'environ 0,0001 micron (0,1 nanomètre). Lorsque l'eau passe à travers le filtre à osmose inverse, elle devient essentiellement de l'eau pure. En plus d'éliminer toutes les molécules organiques et les virus, l'osmose inverse élimine également la plupart des minéraux présents dans l'eau. Elle élimine les ions monovalents. C'est-à-dire dessaler l'eau [31].

Chapitre I : Etude bibliographique

Pour comprendre le principe de fonctionnement de l'osmose inverse il est utile de comprendre le principe d'osmose.

L'osmose, se produit naturellement lorsque la membrane semi-perméable sépare deux solutions salines de concentrations différentes par la migration de l'eau d'une solution à faible concentration vers une solution à forte concentration, jusqu'au point d'équilibre des deux concentrations. C-à-dire des concentrations égales [31].

Les membranes semi-perméables de l'osmose ont une propriété de laisser l'eau passer à travers les pores mais non pas les sels.

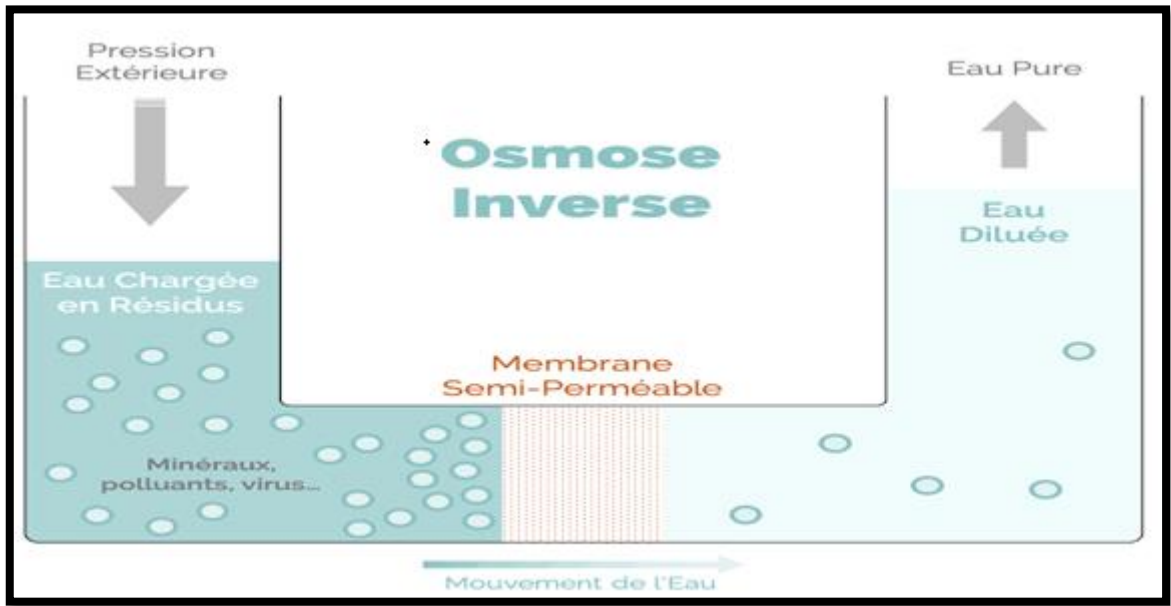


Figure I.12 : Schéma du principe de l'osmose et l'osmose inverse [34].

En osmose inverse, les deux solutions sont toujours séparées par une membrane semi-perméable, mais dans ce cas on applique une pression pour inverser l'écoulement naturel de l'eau, ceci force l'eau de passer de la solution plus concentrée à la solution moins concentrée. Alors, les contaminants finissent sur un côté de la membrane semi-perméable et l'eau pure est sur l'autre côté [31].

La figure suivante montre la structure des membranes utilisés dans les techniques de nanofiltration et d'osmose inverse :

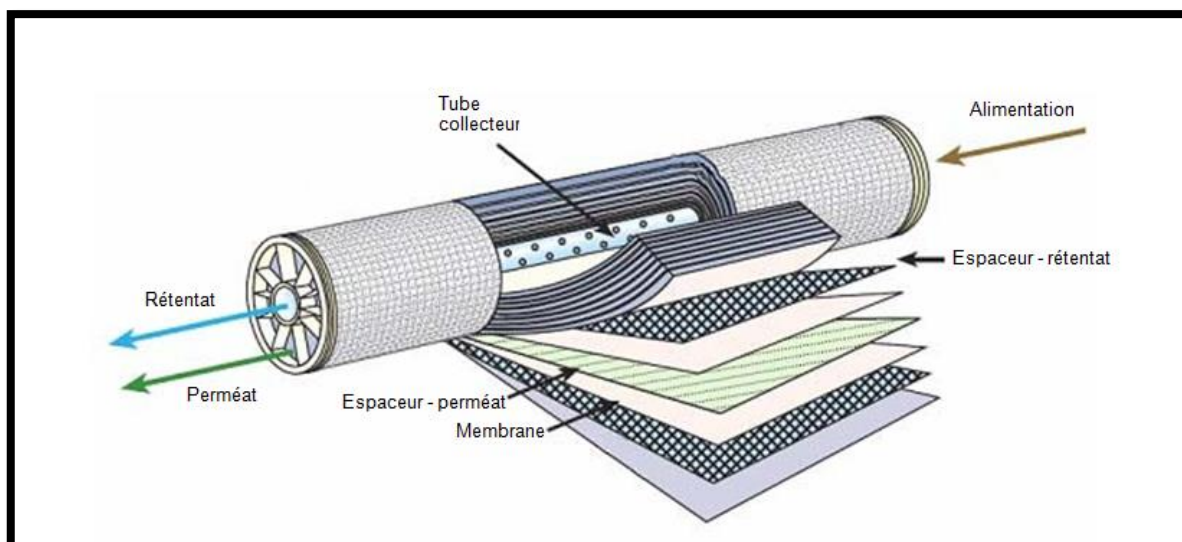


Figure I.13 : Membrane spiralee (membrane utilisée a NF et RO) [32].

f. Les inhibiteurs

Les inhibiteurs de tartre sont une catégorie de produits chimiques spécialisés utilisés pour ralentir ou prévenir l'entartrage des systèmes d'eau [35]. Parmi eux on cite : L'EDTA. Acide Ethylène Diamino-tétra-acétique qui est un agent de contrôle des ions métallique le plus utilisé pour l'élimination des dépôts des sulfates de baryum, Les polyelectrolytes sont fréquemment utilisés en raison de leur grande efficacité, même dosée à l'état de traces, et de leur très bonne stabilité thermique et leur capacité à former un nombre relativement important de liaisons coordinatives avec les cations de la surface minérale. [36], Inhibiteurs inorganiques et organiques, les types inorganiques sont très efficaces ; cependant, leurs applications peuvent être limitées par une faible solubilité et une stabilité thermique inférieure à celle des inhibiteurs de tartre à base de phosphonate [37]. Leurs propriétés inhibitrices sont significativement affectées par l'augmentation de la température. En outre, ils s'hydrolysent en ortho phosphates avec la formation de sels de calcium insolubles [38], les types inorganiques comprennent les phosphates condensés, tels que les poly (méta phosphates) ou les sels de phosphate. Les inhibiteurs de tartre organiques appropriés disponibles sont le poly (acide acrylique) (PAA), l'acide phosphinocarboxylique, les polymères sulfonés et les phosphonates, Organophosphore Cela inclut toutes les formes d'inhibiteurs de tartre organiques contenant du phosphore [39]: ATMP, EDTMP, DETPMP, PEHOMP, HEDP, PPCA.

➤ L'Inhibiteur AD32

L'inhibiteur AD32 est un inhibiteur de dépôt utilisé pour le traitement des circuits D'eau afin d'éviter la précipitation des sels de calcium, de strontium, de baryum, de fer et D'autres cations en association avec des sulfates, des carbonates et des oxydes. L'inhibiteur AD32 est particulièrement recommandé pour les lignes de pétrole brut et pour les circuits D'injection d'eau afin de contrôler l'entartage du tubing, des pompes, des Conduites...etc [40].



Figure I.14: L'inhibiteur de dépôt AD32.

I.6 Les travaux réalisés (l'état de l'art) de traitement des dépôts de sulfates de baryum

Ces dernières décennies, l'inhibition de la précipitation de sulfate de baryum a été Largement étudiée en utilisant un grand nombre de techniques.

- Christian Roque (1996) a étudié la maîtrise des paramètres d'utilisation et de contrôle de L'agent inhibiteur afin de résoudre rapidement les problèmes d'extrapolation liés à un Futur traitement anti-dépôts généralisé l'ensemble du champ de TFT [41].
- Wong et al. (2001) ont étudié l'effet de l'excès d'ions sur la taille et la morphologie des particules, lors de la précipitation du sulfate de baryum et ont conclu que la

Chapitre I : Etude bibliographique

variation du rapport des ions en solution est un moyen efficace pour parvenir à contrôler la taille des Particules [42].

- F. Jones et al (2002) ont étudié l'effet d'une série de molécules de phosphonate sur la Précipitation du sulfate de baryum. Ils ont trouvé que l'augmentation du nombre de Groupes phosphonate dans ces molécules entraîne généralement une forte inhibition de la Précipitation du sulfate de baryum [43].
- F. Jones et al (2003). Ont utilisés L'acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA) pour inhiber la Formation des sulfates de baryum [44].
- Kucher et al. (2006) ont trouvé que la variation des ions libres en solution, a une forte Influence sur la distribution granulométrique trouvée. Par variation de la sursaturation, on Peut produire de manière sélective une large gamme de tailles de particules, allant de la taille des micromètres à celle des nanoparticules inférieures à 50 nm. La variation du rapport d'ions libres à saturation constante et la variation de la sursaturation ont une grande influence sur la morphologie cristalline du sulfate de baryum [45].
- Zerrouki Lalmi (2008) a étudié l'inhibition du dépôt de sulfate de calcium par trois produits commerciaux (NALCO65 61, AD32, et SI4012) et par un composé synthétisé de famille de ferrocènes [46].
- Mavredaki E. et al (2011). Ont examiné l'effet de l'acide polyphosphino carboxylique (PPCA) et de l'acide di éthylène triamine-penta-méthylène phosphonique (DETPMP) qui sont deux inhibiteurs commerciaux sur certains plans cristallins de sulfate de baryum [6].
- Yu T. et al (2016), ont étudié les méthodes de gravimétrie et de spectrométrie d'absorption atomique ont été utilisées pour étudier la capacité de détartrage et les mécanismes d'action des agents détartrants de type carboxy-ammonium. Les agents détartrants sont l'acide Nitrioltri-acétique (NTA), l'acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA), et l'acide diéthyltriamine penta acétique (DTPA) [47].
- Karima Larbaoui (2017) a étudié le pouvoir inhibiteur de deux familles de composés et leur effet sur la déposition des sulfates de baryum. Ces composés sont pour la première famille, des poly électrolytes à base de phosphonates et pour la seconde des polyacrylatesesters qui sont des inhibiteurs de dépôt commerciaux [12].
- A. M. Ali, & H .Messaoud (2019) a étudié l'inhibition du dépôt de sulfate de calcium par le produit commercial AD32 [40]

Chapitre I : Etude bibliographique

- Boufades Dj et al (2023) ont étudié le traitement de l'eau d'injection par l'adsorption des ions de sulfates sur les nanotubes de carbone , les résultats ont montré une efficacité très élevée des nanotubes de carbone pour la désulfatation de l'eau d'injection avec un taux de 96% [48]

Conclusion :

Pour conclure ce chapitre qui constitue une étude bibliographique sur les dépôts de sulfates de baryum et en particulier les causes de leur déposition ainsi leur traitement, nous pouvons affirmer que malgré plusieurs méthodes de traitement ont été utilisées, il reste toujours le problème de dépôt de sulfates de baryum soit au niveau de puits ou sur la surface à cause de l'incompatibilité des eaux d'injection et de formation. Plusieurs techniques ont été proposées au niveaux des champs pétroliers et en particulier dans le champs de TFT,Ain Aminas que nous allons discuter dans le chapitre suivant .

Chapitre

II

*La résolution de problème des
sulfates de baryum au champs
TFT*

Introduction :

Au niveau de champs de TFT le problème des dépôts de sulfates de baryum pose un problème majeur. dans ce chapitre nous présentons la situation géographique et géologique de la région TFT, structure de gisement de TFT caractéristiques de roche réservoir ensuite les problèmes des dépôts et les solutions actuelles de ces problèmes au champs TFT.

II.1 Présentation de la région Tin Fouyé Tabankort:

II.1.1 Situation géographique:

La région de Tin Fouyé Tabankort est située dans la partie Nord-Ouest du bassin d'illizi, plus précisément à 300 Km au Nord-Ouest d'In-Amenas, à 500 km au Sud-Est de Hassi Messaoud sur la route national N°3, à 1300 km d'Alger et dépend administrativement de la W, d'illizi.

La région se trouve sur une altitude de 432 m avec une température ambiante qui varie entre 0°C et 45°C durant l'année .



Figure II.1 : Situation géographique de Tin Fouyé Tabankort [49].

La région de TFT se trouve sur la partie ouest du plateau de Tin-Hert.

L'ordovicien est le principal réservoir de la région, il a été découvert en 1967, ce réservoir s'étend sur 7 à 15 km du Nord au Sud et 25 km d'Est à l'Ouest, il est d'une profondeur de 2200 m en moyenne [49].

II.1.2 Situation géologique :

La coupe géologique établie sur l'axe allant du nord de la région de TFT jusqu'aux dunes de sables de Mazoula, montre les différentes couches géologiques appartenant au crétacé (affleurant en surface et disparaissant au Sud) [49].

Selon l'ordre chronologique de ces couches du plus récent au plus ancien sont :

- **Le sénonien** : composé d'argile à gypse, de dolomie, de calcaire gréseux, et d'une couche de marne.

- **Le cénomanien (200 m d'épaisseur)** : Il est constitué :

De 0 à 200 m: c'est des calcaires de couleur blanc-jaunâtre à beige durs et de marnes plastiques.

De 100 à 200 m: de calcaire argilo-gréseux grisâtre, beige ou blanchâtre et des argiles plastiques bariolées avec intercalation de banc de gypse blanc fibreux.

- **L'albien (zone aquifère à 70 m d'épaisseur)** : Il est constitué d'alternance de grès fins à moyen, d'argile verte plastique et de sable grossier mal classé.
- **Le barrémien (zone aquifère de 160 m d'épaisseur)** : Il est constitué de sable translucide à opaque, à grain fins à grossiers avec intercalation d'argile bariolée, brun, rouge ou verte avec une passe des grès fins.

ERE	SYST	ETAGES	NOMENCLATURE A L'AFFLEUREMENT	EP _{moy} (m)	DESCRIPTION	
MESOZOIQUE	CRETACE	SENONIEN	ARGILO-GYPSEUX	120	Alternance de dolomie calcaire, gypse et argile.	
		TURONIEN	CALCAIRE	81	Calcaire, marne et argile.	
			MARNEUX			
		CENOMANIEN	DALLE CALCAIRE	176	Argile avec passées de calcaire et de gypse.	
			IN-AKAMIL			
		ALBIEN	TAOURATINE SUPÉRIEUR	71	Grès, argile.	
		APTIEN	TAOURATINE MOYEN	28	Argile carbonatée, passées de dolomie	
	BARREMIEN	TAOURATINE INFÉRIEUR	296	Grès et sable avec passées d'argile et de calcaire.		
	NEOCOMIEN + MALM					
	JURASSIQUE	DOGGER	ZARZAITINE SUPÉRIEUR ET MOYEN	195	Sable, silt, grès, argile. Présence de lignite et pyrite	
		LIAS				
		LIAS	99	Alternance de sable et de grès. Présence de dolomie et pyrite		
	TRIAS	discordance hercynienne	ZARZAITINE INFÉRIEUR	30	Argile, grès.	
PALEOZOIQUE	CARBO-NIFERE	VISEEN & TOURNAISIEN	SÉRIE DES GRÈS D'ISSENDJEL	47	Argile, grès.	
	DEVONIEN	SUP	STRUNIEN RESERVOIR "F2"	SÉRIE DE LA GARA MAS. MELLOUKI	65	Argile, grès.
			SERIE ARGILEUSE discordance frasnienne	154	Argile avec présence de silt, passées de calcaire	
		INF	UNITE C3 - I	BARRE SUPÉRIEURE	10	Grès, argile. Pyrite
			UNITE C2 - II	TROTTOIRS	25	Argile, silt, grès.
			UNITE C1 - III	BARRE MOYENNE	15	Grès, argile.
	GOTHLANDIEN	GOTHLANDIEN ARGILO-GRESEUX	UNITE B2 - IV-V	TALUS A TIGILLITES	60	Grès, argile.
			UNITE B2 - VI		17	Grès.
			UNITE B1 - VII	74	Grès, argile.	
			UNITE A - VIII	BARRE INFÉRIEURE	100	Grès, silt, argile.
			UNITE M2 - IX	FORMATION D'ATAFAITAFI	54	Argile, grès.
			UNITE M1 - X	56	Grès, argile.	
		GOTHLANDIEN ARGILEUX	195	Argile avec passées de grès au sommet.		
CAMBRO-ORDOVICIEN	UNITE IV - 3	"COMPLEXE TERMINAL" OU "FORMATION DE TAMADJERT"	15	Grès.		
	UNITE IV - 2		24	Argilo-gréseux.		
	UNITE III - 3	FORMATION D'IR TAHOUTE	17	Grès, argile. Tigillites.		
	UNITE III - 2	"QUARTZITE D'HAMRA" OU "BANQUETTE"	25	Grès quartzitique. Tigillites.		
SOCLE					Roches éruptives (gabbro).	

Figure II.2 : Coupe stratigraphique du champ de TFT [49].

II.1.3 Structure de gisement de TFT:

La structure du gisement de TFT , se présente sous la forme d'un monoclin, délimité par des Failles transversales par rapport à la direction Est-Ouest du monoclin. Le toit du réservoir forme un monoclin de direction Est-Ouest et de pendage Nord, la régularité du monoclin est aussi affectée par une série de failles de direction Nord-Ouest à Nord Nord-Ouest et Nord-Est à Nord Nord-Est.

Ces failles dont le rejet atteint 50 à 60 m ont été mises en évidence dans la partie Ouest de la structure. Dans la partie Est le rejet est de 20 à 30m.

Le réservoir est recoupé par des failles d'orientation diverses qui délimitent des compartiments d'orientation subméridienne. Les rejets sont très variables et peuvent dépasser cent mètres le long des accidents majeurs. Ces failles sont généralement sub-verticales, de type normal et parfois inverse.

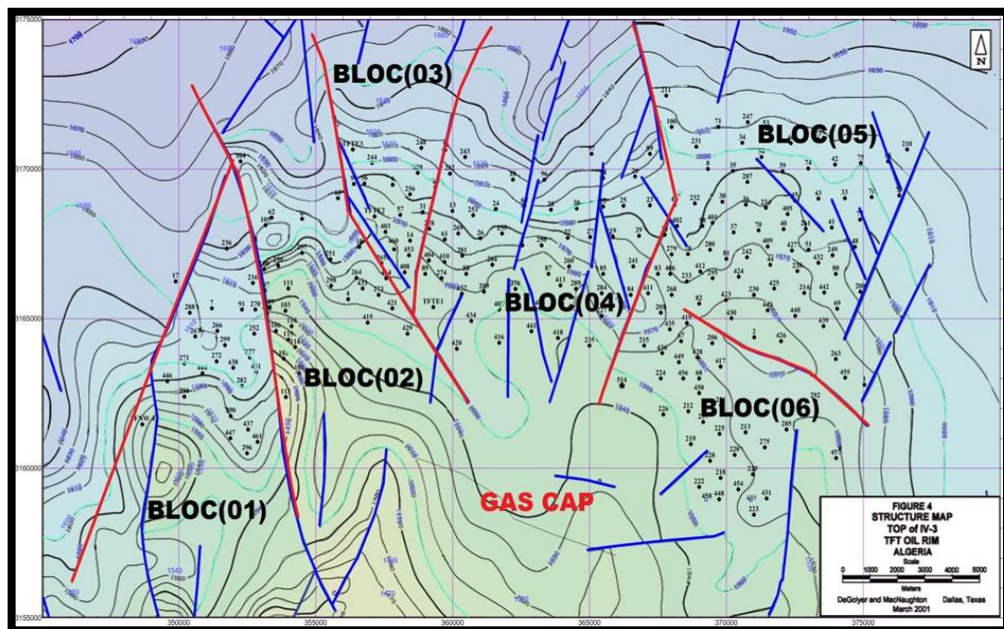


Figure II.3: Carte structurale de champ TFT[49]

II.1.4 Caractéristiques de roche réservoir de TFT:

Les accumulations principales d'huile et de gaz qui ont fait de la région l'un des plus grands gisements de pétrole en Algérie, appartiennent à l'unité IV-3 et IV-2 de l'ordovicien avec une quantité d'huile en place à l'origine s'élevant à 328 Millions associée à un gaz-cap important.

Le réservoir de TFT se caractérise par d'importantes variations d'épaisseur, de faciès et de caractéristiques pétro physiques.

Tableau II.1 : Les caractéristiques pétrophysique des différentes unités de réservoir[49]

Caractéristique Unité	EPAISSEUR TOTAL(m)	EPAISSEUR UTIL (m)	POROSITE MOYENNE (%)	PERMEABILITE MOYENNE (md)
IV-3	10 à 20	10 à 20	9	52
IV-2	0 à 50	0 à 15	8	16

Tableau II.2 : la caractérisations des fluides [49]

Les fluides	Les paramètres	
HUILE	Pression initiale du gisement	$P_i = 202 \text{ kg/cm}^2$
	Température du gisement	$T = 88 \text{ }^\circ\text{C}$
	Pression de bulle	$P_b = 198 \text{ kg/cm}^2$
	FVF initial	$B_{oi} = 1.43 \text{ m}^3\text{res/m}^3\text{std}$
	de dissolutions initiales	$R_{si} = 150 \text{ m}^3/\text{m}^3$
	Densité de l'huile de stockage	$\rho_o = 0.82$
	Viscosité de l'huile	$\mu_o = 0.355 \text{ Cp}$
EAU	Compressibilité	$C_w = 3.00 \text{ v/v/psi } 10^{-6}$
	FVF initial.	$B_w = 1.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$
	Viscosité	$\mu_w = \text{négligeable}$
	Salinité moyenne	$(\text{Na cl}) = 250 \text{ g/l}$
GAZ	FVF initial	$B_{gi} = 0.0055 \text{ m}^3/\text{m}^3$
	Viscosité.	$\mu_g = 0.023 \text{ cp}$

II.1.5 La structure de la région de TFT :

La direction régionale de Tin Fouyé Tabankort (TFT), fait partie de la division production de l'entreprise SONATRACH. Elle est chargée de la production du pétrole du champ de TFT et de la gestion de toutes les divisions qui lui sont rattachées. La Direction Régionale de TFT est structurée en plusieurs divisions qui prennent en charge chacune une partie de l'activité qui lui dévolue . [49]

Ces structures sont :

- Division Engineering production
- Division Personnel
- Division Exploitation
- Division Approvisionnement et Transport
- Division Maintenance
- Division Intendance
- Division Réalisation
- Division Finance
- Division Sécurité

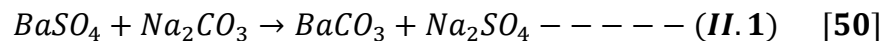
II.2 Extraction des dépôts de BaSO₄ dans le laboratoire :

II.2.1 Attaque acide

- Laver, Sécher et broyer l'échantillon.
- Prendre 1g de l'échantillon dans 60 ml d'eau régale (40 ml de HCl + 20 ml de HNO₃) et évaporer complètement la solution.
- Ajouter 20 ml de HCl et évaporer à sec, puis 10 ml d'eau distillée laisser bouillir pendant 1min, répéter l'opération précédente en ajoutant 20 ml d'eau, bouillir pendant 10min et enfin 100ml d'eau distillée et une ébullition de 15min, puis filtrer.
- Après filtration le précipité est gardé et le filtrat est ramené à un volume de 250 ml, pour doser le calcium, le magnésium, le fer, les sulfates, les phosphates, les sulfures, le sodium ...etc. [50]

II.2.2 Attaque alcaline

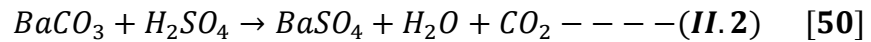
- Le résidu insoluble, est calciné au four à moufle à 800°C dans un creuset en platine.
- Peser le contenu du creuset.
- Ajouter 5 à 6 g de carbonate de sodium. Faire la fusion au moufle à 900°C pendant 30 min.
- Retirer le creuset et laisser refroidir au dessiccateur



- Faire bouillir environ 200 cc d'eau distillée dans un bécher.
- Introduire le creuset dans le bécher et laisser bouillir jusqu' à ce qu'il se décolle.
- Après filtration (le filtrat contient de la silice et du sulfate de sodium et le filtre de carbonate de baryum), dissoudre le contenu du filtre avec HCl conc, un bécher de 250 ml. Etendre avec une d'eau distillée et faire bouillir la réaction

ci-dessous.

- Après ébullition ajouter 10 N H₂SO₄. Un précipité blanc se forme nous indiquant la présence de sulfate de baryum. Laisser reposer une nuit ensuite filtrer, laver, sécher, et calciner au four à 800°C [50].



Soit P₂ le poids du précipité obtenu :

$$\% BaSO_4 = P_2 \times 100$$

$$\% SiO_2 = (P_1 - P_2) \times 100$$

$$P_{\text{creuset}} + 1g \text{ de dépôt avant calcination} = 39.134g$$

$$P_{\text{creuset}} + 1g \text{ de dépôt après calcination} = 38.3383g$$

$$P_1 = 39,134 - 38,3383 = 0.8g$$

Donc il y a 80 % (BaSO₄ + silices)

$$P_2 = 0.69g \text{ donc}$$

$$\% BaSO_4 = 0.69 \times 100 = 69 \%$$

$$\% SiO_2 = (0.8 - 0.69) \times 100 = 11 \%$$

II.2.3 Attaque alcaline Teneur NaCl

- Peser 1g de l'échantillon (séché et broyé).
- Dissoudre dans un volume d'eau avec chauffage.
- Filtrer la solution puis compléter à 100 ml d'eau distillée.
- Prélever 5ml et doser par AgNO₃ (0.1 N ou 0.01 N) en présence d'indicateur K₂CrO₄
- Soit v le volume dépenser d'AgNO₃ [50].

$$\% NaCl = 58,45.N.V.10/5$$

$$\% NaCl = 58,4 * 0,1 * 0,85 * 10/5$$

$$\% NaCl = 9,9365 \%$$



Figure II.4: Solution de dosage AgNO₃ [50] .

II.2.4 Dosage Du magnésium

- Prélever une prise d'essai de l'échantillon.
- Ajouter 5ml de tampon ammoniacal (PH=10) + noir euriochrome T, la solution devient rouge-vin.
- Titrer avec L'EDTA 0.1M jusqu'au virage au bleu, soit V2 le volume versé [50]

$$[\text{Mg}^{+2}] = 24,3.M.1000 (V2-V1) D/Pe$$

24.3 : masse molaire de du Magnésium

M : Molarité d'EDTA

V : volume d'EDTA écoulé

Pe : prise d'essai (20ml)

D : Facteur de dilution = 1/4

[Mg⁺²] est exprimée en mg/l

$$[\text{Mg}^{+2}] = 24,3.0,01.1000.3.1/ (20.4) =9.41625\text{mg/l}$$

1 mole de Ca → 1 mole de CaSO₄

24.3g → 120g

9,41625mg → Y

$$Y=9,41625.120/24,3=46.5\text{mg}$$

46.5mg → 1000mg

X → 100mg

$$X= 4,65\text{mg} \text{ donc } [\text{MgSO}_4] =4.65\%$$

II.2.5 Dosage du fer total

- Avant de doser le fer il faut s'assurer de sa présence
- Ajouter 2 gouttes d'HCl conçu à l'échantillon.
- Etendre avec de l'eau distillée puis ajouter 2 à 3 gouttes de ferrocyanure de potassium.
- $K_4Fe(CN)_6$, la couleur bleue indique la présence du fer.
- Prélève 25ml du filtrat dans un bécher de 250ml.
- Oxyde le milieu avec HNO_3 à chaud.
- Laisser refroidir, on élève le PH avec NaOH puis on rajoute l'acide acétique dilué et d'acétate de sodium pour amener le PH entre 3 et 3.5.



Figure II.5: PH mètre [50].

- Ajouter ensuite 5ml d'indicateur (Acide sulfo salicylique)
- Titrer par l'EDTA 0.1M ou 0.01M selon la concentration du fer jusqu'à virage pourpre au jaunâtre [50].

$$[Fe] = M.V. 55,85.1000.D/Pe$$

55.85 g : Masse molaire du fer

V : le volume d'EDTA versé

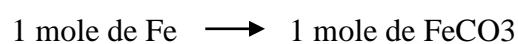
Pe : Prise d'essai

D : Facteur de dilution

[Fe] est exprimée en mg/l

$$[Fe] = 0,01.4,5. 55,85.1000/(4.50)$$

$$[Fe] = 12.56 \text{ mg/l}$$



$$55.85 \longrightarrow 116g$$

$$12.56 \text{ mg} \longrightarrow Y$$

$$Y = 12,56 \cdot 116 / 55.85 = 26.1 \text{ mg}$$

$$26.1 \text{ mg} \longrightarrow 1000 \text{ mg}$$

$$X \longrightarrow 100 \text{ mg}$$

$$X = 2.61 \text{ mg} \text{ donc } [\text{FeCO}_3] = 2.61\%$$

II.2.6 Dosage Du Calcium

- Prélever une prise d'essai de l'échantillon
- Ajouter 5ml de NaOH 1N (PH = 13) + murexide, la solution devient rose
- Titrer avec L'EDTA 0.1M jusqu'au virage au violet, soit V1 le volume versé [50].

$$[\text{Ca}^{+2}] = 40,08 \cdot M \cdot 1000 \cdot V1 \cdot D / Pe$$

40.08 g : Massa molaire du calcium

M : Molarité de l'EDTA

V₁ : le volume d'EDTA écoulé

Pe : Prise d'essai

D : facteur de dilution

[Ca⁺²] = est exprimée en mg/l

$$[\text{Ca}^{+2}] = 40,08 \times 0,01 \times 1000 \times 1,4 / (20 \times 4) = 7,014 \text{ mg/l}$$

1 mole de Ca \longrightarrow 1 mole de CaSO₄

$$40.08 \text{ g} \longrightarrow 136.14 \text{ g}$$

$$7,014 \text{ mg} \longrightarrow Y$$

$$Y = 7,014 \cdot 136,14 / 40,08 = 23.8245 \text{ mg}$$

$$23.8245 \text{ mg} \longrightarrow 1000 \text{ mg}$$

$$X \longrightarrow 100 \text{ mg}$$

$$X = 2,38245 \text{ mg} \text{ donc } [\text{CaSO}_4] = 2,38245\%$$



Figure II.6: Solution de dosage EDTA [50].

II.3 Problème de sulfate de baryum au champs TFT :

Depuis 1980 et dans le champ de TFT, l'injection de l'eau a été mise en œuvre dans le but d'améliorer la récupération d'huile par le maintien de pression dans le réservoir, cette opération pose le problème des dépôts de sulfates de baryum en contact avec l'eau de gisement.[51]

Au niveau de champs de TFT le problème des dépôts de sulfates de baryum pose un problème majeur, ces dépôts se forment en concrétions très dures, qui au niveau des puits, réduisent le flux d'huile aux abords et bouchent les perforations (endommagement), au niveau des installations, bloquent les pipes, les collecteurs (manifolds), les séparateurs et les pompes d'expéditions, et conduisent à la fermeture du centre de séparation et du puits.[52]



Figure II.7 : image originale du sel de sulfates de baryum formé dans une conduite de la zone de TFT

II.3.1 Dépôt de sulfate de baryum dans le gisement :

La précipitation critique du sulfate de baryum dans le gisement se produit dans les zones où sont implantés les puits injecteurs et leurs approches, lors du premier contact entre l'eau d'injection et l'eau de formation, les ions sulfates s'éliminent par précipitation, au fur et à mesure, que le front d'eau se déplace vers les puits producteurs d'huiles pour être exempt, plus loin de la totalité de ces ions qu'il contenait.

La diminution de la concentration en ions baryum est non seulement due à une réaction chimique avec les ions sulfates, mais aussi elle est traduite par le phénomène de dilution essentiellement vers les puits se situant loin des zones d'injection.[53]

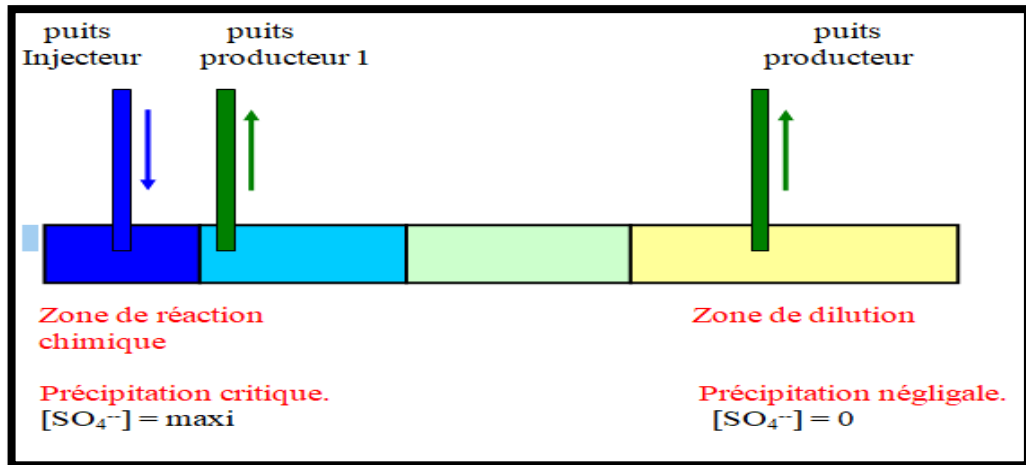


Figure II.8: Dépôt de sulfate de baryum dans le gisement[53]

Le sulfate de baryum peut se déposer aussi dans les équipements de fond (cas de TFT 211) lorsque le puits se situe dans un endroit de contact entre les deux eaux de formation et d'injection.

Ces cas de figure se présentent en général dans les puits implantés près des dorsales[53].

II.3.2 Précipitation de sulfate de baryum dans les équipements de surface :

La déposition d'une partie de sulfate de baryum dans les installations de surface se fait, en premier lieu, dans les manifolds où se produit la réaction de précipitation, résultant du contact des deux eaux, l'autre partie est entraînée sous l'effet de l'écoulement du fluide dans les installations qui suivent, en commençant par les séparateurs et en fin les collectes principales acheminant le brut vers le centre principal de collectes[53].

a. Dans les manifolds:

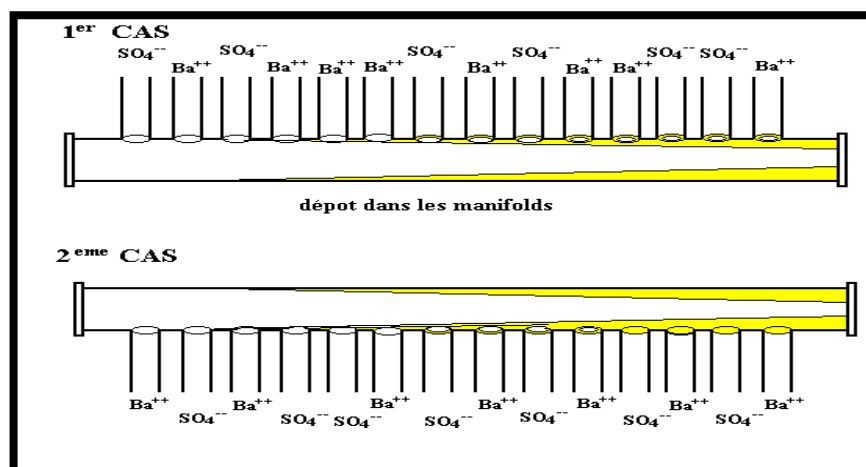


Figure II.9: Précipitation de sulfate de baryum dans les manifolds[53]

b. Dans les séparateurs :

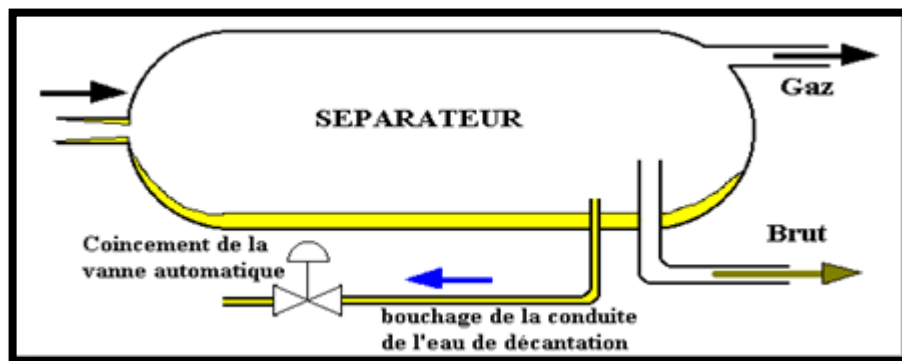


Figure II.10: Précipitation de sulfate de baryum dans les séparateurs[53]

c. Dans les bacs tampon:

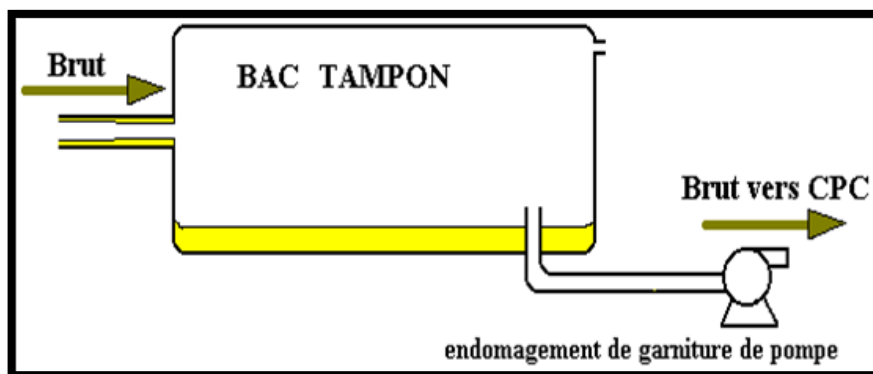


Figure II.11: Précipitation de sulfate de baryum dans les bacs tampon[53]

d. Dans les collectes :

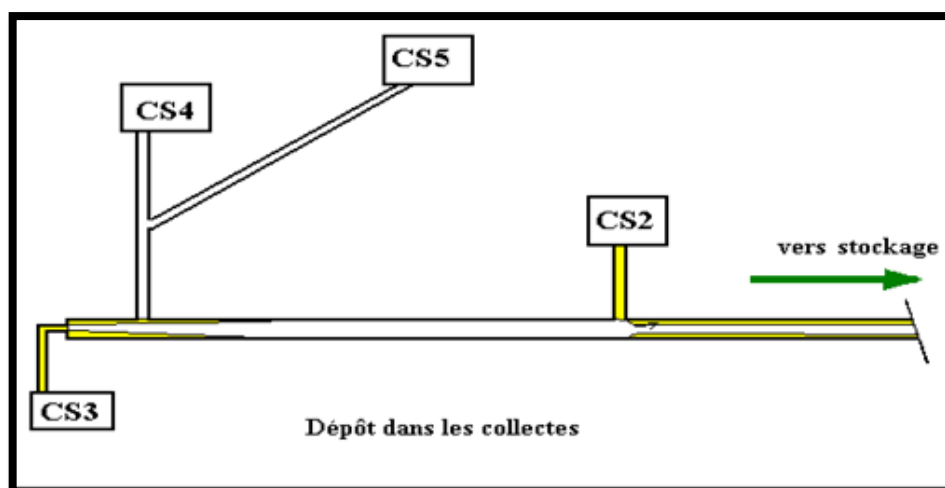


Figure II.12: Précipitation de sulfate de baryum dans les collectes[53]

II.3.3 Conséquences:

- Rétrécissement et obturation des conduites : Le sulfate de baryum se dépose dans les conduites sous forme d'anneau, leurs diamètres intérieurs diminuent jusqu'au bouchage. Ceci entraîne :
 - Hausse de pression dans les centres de séparations.
 - Chute de production par freinage ou arrêts de puits.
 - Augmentation de la TVR (Tension de vapeur Reid). une caractéristique du brut expédié

- Coincement de vanne de décantation : Par conséquent l'eau produite dans les centres sera acheminée vers le CPC (centre principal de collectes) où l'élimination de l'eau n'est pas facile.
Ce qui provoque :
 - Augmentation de la salinité.
 - Augmentation du BSW. (deux caractéristiques du brut expédié)

- Augmentation des fréquences d'intervention sur les équipements de surface (pompes, vannes, conduites ...etc)
 - Arrêts de centres de production.
 - Consommation de pièces de rechange.[53]

II.4 Traitement de BaSO₄ au niveau de TFT :

II.4.1 Traitement par des inhibiteurs chimiques:

Face à cette situation, beaucoup d'efforts ont été développés pour palier à ce souci, dont les investigations ont été basées essentiellement sur le domaine chimique, qui malheureusement se heurtent enfin de comptes à des contraintes d'applications d'ordre économique et technique.

Parmi ces produits proposés Aquaprox MD1000 un agent d'inhibiteur de croissance cristalline des sulfates fabriqué par la société PROTEX et sélectionné par le CRD de Boumerdes dont son essai industriel constitue la phase finale des recherches ayant pour objet la vérification de l'efficacité de la formulation inhibitrice dans les conditions d'exploitation[53].

a. Essai et résultats du laboratoire :

Tableau II.3 Essai et résultats du laboratoire [53]

Concentration inhibiteur	% D'INHIBITION (efficacité)		
	Conditions de surface Température ambiante		Conditions de fond T = 80 à 85°C P = 120 bars
	Après 1 heure	Après 24 heures	Après 6 heures
100 ppm	83.2	15.2	45
200 ppm	87.8	23.0	48

b. Essai industriel :

Il s'agit d'injecter l'inhibiteur de dépôt dans le manifold des puits sulfatés et contrôler l'état de la surface interne des deux manchettes M1 et M2.

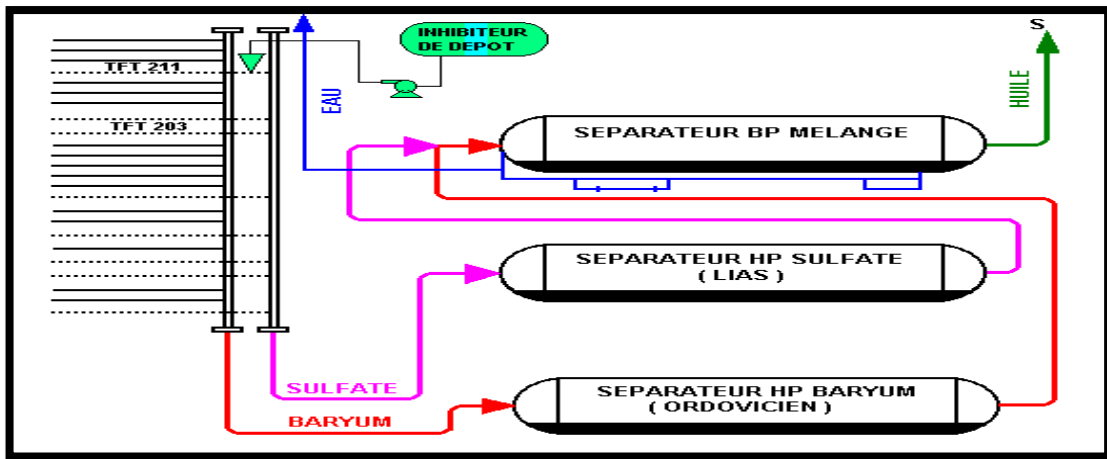


Figure II.13:Schéma de circulation des fluides centre de séparation N°3[53]

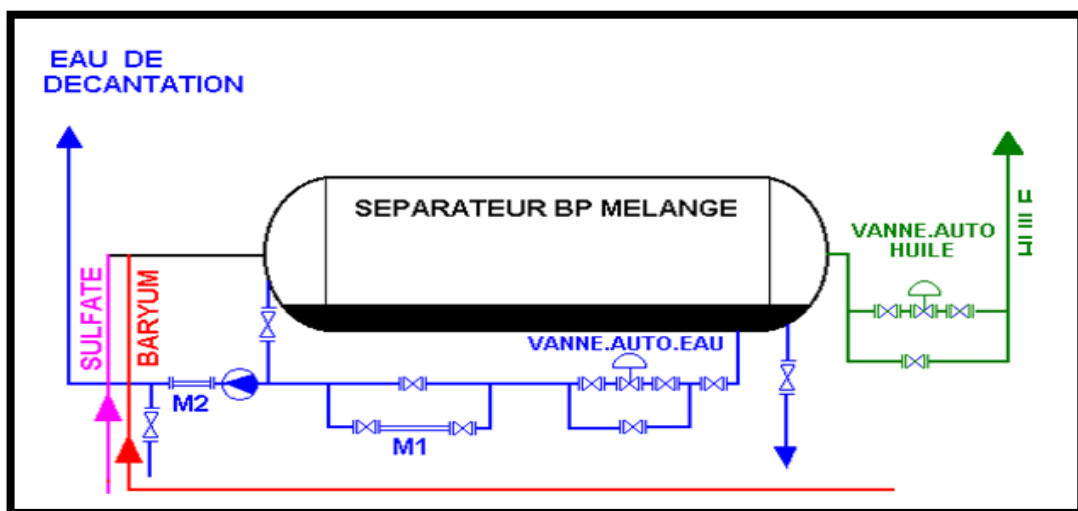


Figure II.14:Schéma de la zone de contrôles des dépôts [53]

c. Résultats :

- Absence de dépôt sur la manchette mobile M2 vérifiée chronologiquement au 1er, 4ème, 5ème, 7ème, 9ème jours de l'essai.
- Fonctionnement normal sans anomalie, des vannes automatiques, et manuelles des circuits eau et huile.
- Absence de dépôts sur la manchette M1 laissée en place depuis le début de traitement.

Ces trois résultats confirment qualitativement l'efficacité du produit Aquaprox MD1000.

d. Contraintes d'application :

- Concentration de produit injecté trop élevée (200 ppm), ce qui engendre des consommations considérables.
- Arrêts de pompes pneumatiques d'injection surtout durant les périodes froides.
- Les retards liés aux approvisionnements en matière de produits chimiques.

II.4.2 La séparation sélective :

Elle consiste à séparer les puits sulfatés des puits barytés, sur deux installations similaires, dans lesquelles les deux eaux incompatibles sont décantées puis drainer vers bourbier à travers deux chemins différents.

La production du brut des deux batteries se rejoint en amont des bacs tampon .[53]

Procédure de séparation :

La procédure de séparation est basée sur l'identification des ions sulfates présents dans l'eau produite d'un puits, dont sa production est, par la suite transférée sur la batterie sulfatée afin d'éviter toute précipitation indésirable.[53]

Exemple du centre de séparation n° 3

Tableau II.4 : Suivi des puits hydratés en vue de la séparation sélective[53]

	Q huile m ³ /j	Q eau m ³ /j	% eau	Salinité	Nature du puits	Date test
TFT 8	5,7	18,4	76,35	158	Baryté	26/10/97
TFT 12					Injecteur	
TFT 34	30,4	247,1	89,04	135	Sulfaté	03/12/97
TFT 35	33,8	126,8	79,00	58,5	Sulfaté	02/11/97
TFT 36	121	00	00		Baryté	17/03/99
TFT 39	8,1	54,7	87,1		Sulfaté	28/09/97
TFT 40	108,7	0,6	0,55	117	Sulfaté	05/12/98
TFT 42	41,5	10,3	19,88	35	Sulfaté	05/12/98
TFT 43	106	00	00		Baryté	
TFT 45	179,5	0,1				20/11/98
TFT 46	112,4	00	00		Baryté	
TFT 50	120	0,20	0,17		Baryté	
TFT 52			100		Injecteur	
TFT 53	13,7	46,3	77,17	111	Sulfaté	31/01/96
TFT 54	1,1	52,3	97,94	64	Sulfaté	27/03/97
TFT 55	100	0,1	0,1		Baryté	
TFT 71					Noyé	22/09/91
TFT 72					Noyé	06/08/92
TFT 73	94,8	15,5	14,05	58,5	Sulfaté	28/12/98
TFT 74	112,9	00	00		Baryté	
TFT 201					Injecteur	
TFT 202					Injecteur	
TFT 203	98,1	41,00			Sulfaté	03/01/98
TFT 210	63,8	0,8	1,58		Baryté	
TFT 231	37,3	47,6	56,00	65	Sulfaté	27/01/98
TFT 254	13,6	46,6	78	47	Sulfaté	18/09/98
TFT 287	100,5	00	00		Baryté	23/01/99

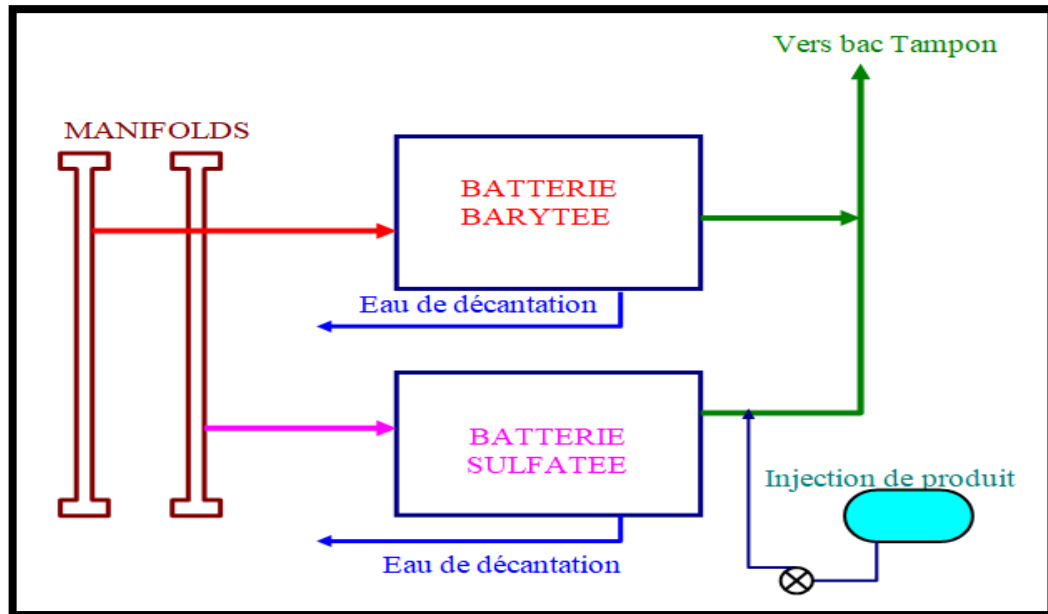


Figure II.15: principe de séparation sélective[53]



Figure II.16 : La séparation sélective au niveau de CS1

Mais, malheureusement cette solution s'avère insuffisante et cela dû à :

- Une surveillance insuffisante des puits conduit au mélange des flux d'eau barytée et d'eau sulfatée.
- La nature de l'eau d'un puits peut changer d'un moment à l'autre, et la

fréquence de test des puits n'est pas suffisante pour remarquer ce changement.

- L'existence d'une seule ligne entre les manifolds satellites et les manifolds principaux entravent la séparation sélective des puits.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons aperçu les problèmes causés par les dépôts de sulfates de baryum au niveau de champs TFT et les traitements actuels de ces problèmes tels que l'inhibiteur chimique aquaprox et la séparation sélective mais ces méthodes de traitement restent non efficaces .

Pour un traitement sélectif de l'eau d'injection de TFT, le centre de recherche et de développement -Boumerdes a pris cette charge et la méthode de filtration membranaire a été proposée.

L'installation de filtration membranaire a été réalisée au niveau de centre TAM EAU à TFT en 04 Mars 2020, mais seulement des essais ont été effectués sur cette installation qui seront discutés sur le chapitre suivant .

Chapitre

III

*Etude et analyse de l'application
de nanofiltration et d'osmose
inverse au champs TFT*

Introduction :

Le problème des dépôts de sulfates de baryum pose un problème majeur au niveau de champs de TFT, des méthodes de traitement ont été appliqués pour minimiser la déposition de BaSO₄ comme la séparation sélective et l'utilisation des inhibiteurs, ces deux méthodes ne sont pas efficaces.

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de connaître la nature et la composition chimique des deux eaux (Lias, Ordovicien), pour cela, un suivi des analyses chimiques a été réalisé au niveau de centre de recherche et de Développement (CRD) -Sonatrach - Boumerdes, et plusieurs techniques membranaires ont été proposées à savoir la nanofiltration et l'osmose inverse afin de trouver la technique sélective et adéquate pour le désulfatation de l'eau LIAS .

III.1 Description du pilote :

L'étude expérimentale a été menée par le moyen d'une unité pilote de traitement d'eau au niveau du champ de TFT afin de déterminer la meilleure configuration en termes de qualité et quantité d'eau produite.

Suite à une étude comparative entre la technique de Nanofiltration et d'Osmose Inverse, l'unité pilote est composée des éléments suivants afin de réaliser l'installation schématisée sur la figure III.1

- Une conduite d'alimentation à partir du réservoir de Lias;
- Deux bacs de stockage consécutifs lieu de décantation ;
- Un surpresseur ;
- Un bac à sable suivi d'un bac à charbon pour la préfiltration avec des vannes de manipulation ;
- Une pompe à eau précédée par un filtre à cartouche ;
- Deux modules membranaires sous-système di- étages en série rejet ;
- Deux débitmètres pour la mesure du débit du concentrât et du débit du perméat
- Trois capteurs de pression pour chaque membrane : un à l'entrée de la membrane pour la mesure de pression d'alimentation, deux autres à la sortie de la membrane pour la mesure de la pression du concentrât et du perméat ;[54]



Figure III.1: Unité pilote de traitement d'eau

L'eau brute est donc pompée des puits de TFT afin de subir un prétraitement pour ensuite subir un traitement membranaire. L'eau brute est passée par une décantation au niveau de deux bacs de stockage consécutifs pour éliminer les matières en suspension, puis prétraitée par une filtration à sable et à charbon de manière à éliminer toute odeur, couleur ou goût dans l'eau d'injection.

Par le biais d'une pompe protégée par un filtre à cartouche, l'eau est envoyée vers deux modules membranaires montés en série rejet.

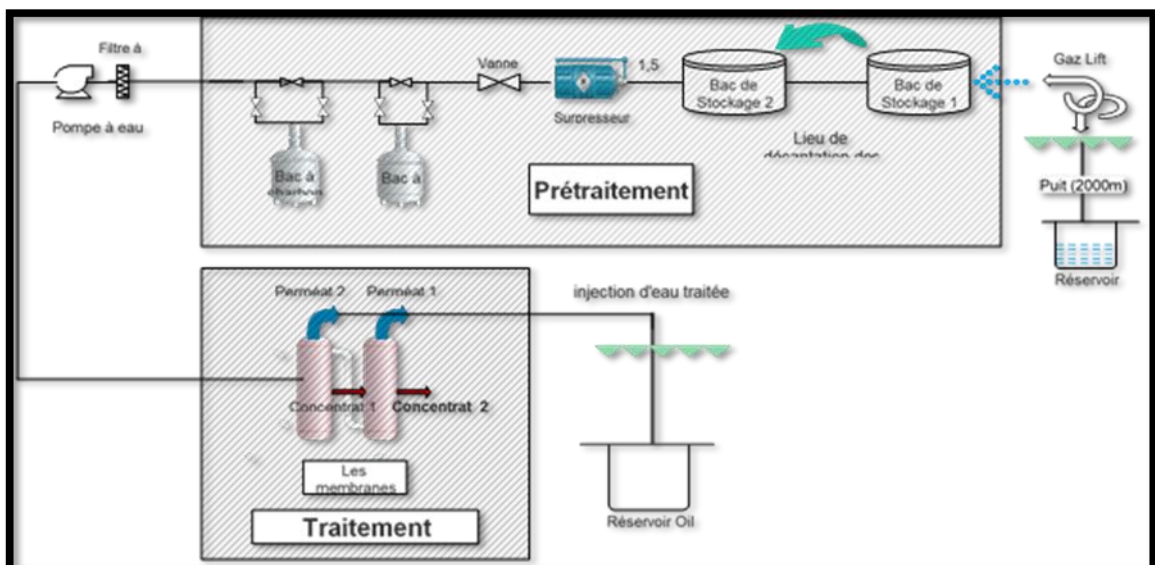


Figure III.2: Installation de traitement d'eau d'injection[54]

III.2 Analyse chimique des eaux :

Tableau III.1 : Composition chimiques des eaux [55]

Compositions	ZARZAITINE		ORDOVICIEN	
	LIAS			
Cations (mg/l)	TFT 621	TFT 610	TFT 97	CS5 HP
Na ⁺	750	910	42000	37500
K ⁺	48	53	4160	2200
Ca ⁺⁺	189	230	34373	27955,8
Mg ⁺⁺	67	79	3599	3830,4
Ba ⁺⁺	00	00	1064	752
Sr ⁺⁺	00	00	1040	1162,5
Fe ⁺⁺	7,3	Trace	73,5	263,2
Total	1061,8	1272	86309,5	73663,9
Anions (mg/l)				
HCO ₃ ⁻	190,3	195	36	15,9
CO ₃ ⁻⁻	00	00	00	00
SO ₄ ⁻⁻	1136,6	1342,4	00	00
Cl ⁻	833,9	1206	134113	127113,2
Total	2160,8	2557	134149	127129,2

D'après les résultats obtenus par les analyses physico-chimiques effectuées sur l'eau du Lias et réservoir Ordovicien, qui sont représenté dans le tableau III.1 on remarque ce qui suit :

- La concentration des anions sulfates (SO₄⁻²) est supérieure à 1136.6 ppm dans l'eau du Lias . Cette quantité importante de sulfate peut engendrer des dépôts durs en se combinant avec des cations de baryum, de calcium, ou de strontium
- L'absence des cations de baryum .
- L'absence des anions de carbonates .
- La concentration des cations de baryum (Ba⁺²) est supérieure à 752 ppm celle de strontium (Sr⁺²) atteint les 1040 ppm dans l'eau du Ordovician . Cette quantité

importante va engendrer des dépôts durs en se combinant avec des anions sulfates

On constate aussi :

- L'absence des anions sulfates, carbonates

III.3 Précipitation critique :

Des travaux de laboratoire ont été réalisés sur le mélange des deux eaux afin de déterminer les pourcentages critiques correspondants à la précipitation maximale. Cela s'est déroulé selon les étapes suivantes :

Mélange des deux eaux.

Agitation pendant 15 minutes.

Filtration et pesée des dépôts obtenus.

Cette expérimentation a abouti aux résultats suivants :

Tableau III.2 : Résultats d'analyses des mélanges des eaux des deux réservoirs[55]

ORDOVICIEN %	20	40	60	80
LIAS %	80	60	40	20
Masse de dépôt g	0.5220	1.0270	1.4180	1.3205

Le rapport 40% Lias-60% Ordo représente le point critique, dans lequel on obtient la plus grande masse de dépôt de sulfate de baryum, dans les conditions de surface, qui est de l'ordre de 1.4180 g.

On peut conclure que :

Les eaux du Lias et de l'Ordovicien sont clairement incompatibles et représentent un risque très élevé de précipitation de sulfate de baryum $BaSO_4$ avec de très grandes quantités.

III.4 Filtration membranaire des eaux d'injection

Après les analyses physico-chimiques de l'eau d'injection, il a été trouvé que cette eau contient une concentration importante des ions de sulfates, afin d'éliminer ces ions, deux techniques membranaires ont été proposées (Nanofiltration et Osmose inverse), ces méthodes sont basées sur la taille nanométrique des pores des membranes polymériques qui constituent, pour cela l'objectif de projet SWCTT, LSWF est triple à savoir :

1. la désulfation d'eau d'injection et l'élimination de sulfates dans le but de prévenir la formation de dépôts de sulfatés et dans notre cas le sulfate de baryum $BaSO_4$.

2. l'Adoucissement (élimination des cations divalents Ca^{2+} et Mg^{2+}).
3. Le maintien d'un bon niveau de TDS (dans le but du maintien d'une bonne injectivité du Slug ASP ou SP (Alcalin-Surfactants-Polymère ou Surfactant-Polymère) ainsi qu'une bonne performance des agents chimiques a le long terme. Car La qualité de l'eau de formulation en termes de composition et concentration des ions joue un très grand rôle dans l'efficacité du processus cEOR. La qualité de l'eau définit en conséquence la nature et le type et la concentration des agents chimiques .[54]

Les essais de traitement ont été réalisés dans L'unité pilote qui possède deux configurations possibles :

- Nanofiltration (NF)
- Osmose Inverse (RO)

III.4.1 Membranes utilisées

Deux systèmes de filtration membranaire ont été mis en place dans le but de choisir la meilleure technique en termes de qualité et quantité. Les membranes utilisées sont deux membranes spirales composites Filmtec de Dow Chemical (BW 30-4040) pour l'Osmose Inverse et (NF 270-4040) pour la Nanofiltration. Ces membranes industrielles sont livrées avec un extérieur à coque dure conçu pour résister à des chutes de pression élevées.

Les caractéristiques principales de ces membranes sont présentées dans le tableau III.3.

Tableau III.3 :Caractéristiques des membranes utilisées[54].

Membrane	Pression Maximale (bar)	Température maximale (bar)	Game de PH	Débit d'alimentation maximale (m^3/h)	Surface active (m^2)
BW 30-4040	41	45	2-11	3,6	7,2
NF 270-4040	41	45	2-11	3,6	7,6

La NF 270-4040 est conseillée aux eaux de surface et eaux souterraines où une bonne élimination organique est souhaitée avec un adoucissement partiel.

Le choix de ces membranes a été imposé par le Centre de Recherche et de Développement

CRD pour des raisons économiques



Figure III.3 : les membranes BW30 4040(RO) ET NF270 4040 (NF)

Le tableau suivant présente la composition des ions ainsi les caractéristiques de l'eau de LIAS à analyser pour la nanofiltration et l'osmose inverse :

Tableau III.4 : analyse de l'eau lias (concentration en ppm) [54].

Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl	HCO ₃	Turbidité	PH
189 ±44	67 ±6	1250 ±100	797 ±73	43,2 ±4,4	1015 ±430	166 ±16	5,5 ±2,7	7,5 ±0,2

III.4.2 Résultats d'analyse d'eau traitée avec la NanoFiltration :

Tableau III.5: Résultats d'analyses physicochimiques de l'eau traitée avec la nanofiltration [54].

N°E	Ca ²⁺		Mg ²⁺		SO ₄ ²⁻		Na ⁺		K ⁺		Cl ⁻		HCO ₃		Turbidité		PH
	mg/L	%	mg/L	%	Mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	%	%	
1	43.5	23.0	5.1	7.6	11	0.9	585,9	73,5	27,7	64,1	908,8	89,5	106.14	64.1	0,48	8,8	7.7
2	44.3	23.4	6.6	9.9	20	1.6	527,0	66,1	26,0	60,2	908,8	89,5	112,24	67,8	1,78	32,2	7.5
3	46.9	24.8	9.8	14.7	20	1.6	650,1	81,6	29,5	68,3	1086,3	100	167,14	100	0,30	5,6	7.5
4	47.2	25	10.7	16	49	3.9	619,1	77,7	28,4	65,7	979,8	96,5	146,4	88,5	0,25	4,6	7.6
5	54.7	29	9.1	13.6	14	1.1	591,6	74,2	28,0	64,8	944,3	93,0	115,9	70	0,11	2,1	7.4
6	56.3	29.8	9.1	13.6	9	0.7	564,4	70,8	27,4	63,5	944,3	93,0	124,44	75,2	0,06	1,1	7.4
7	52.8	27.9	10.6	15.8	25	2	592,2	74,3	29,4	68,0	979,8	96,5	118,34	71,5	0,13	2,4	7.7
8	48.6	25.7	10.2	15.3	17	1.4	588,1	73,8	29,7	68,9	1015,3	100	132,98	80,3	0,08	1,6	7.7
9	50.3	26.6	14.4	21.6	18	1.4	577,4	72,4	29,0	67,0	944,3	93	112,24	67,8	0,19	3,5	7.6
10	53.6	28.4	16.2	24.3	12	1	620,0	77,8	29,3	67,8	1015,3	100	136,64	82,6	0,1	1,8	7.6
11	39.1	20.7	14.1	21.1	95	7.6	540,9	67,9	28,5	66,1	944,3	93	101,5	61,3	0,36	6,5	7.4
12	53.6	28.4	12.3	18.4	44	3.5	563,2	70,7	31,1	72,0	979,8	96,5	135,42	81,8	0,31	5,6	7.4
13	62.2	32.9	7.1	10.5	23	1.8	533,8	67,0	27,9	64,6	1015,3	100	103,7	62,7	0,05	1,0	7.7
14	58.6	31	12.6	18.8	44	3.5	541,7	68,0	30,5	70,7	979,8	96,5	119,5	72,2	0,09	1,7	7.4
15	39.9	21.1	17.7	26.4	95	7.6	580,1	72,8	31,9	73,8	908,8	89,5	134,2	81,1	0,08	1,5	7.5
16	47.0	24.9	14.1	21.1	2	0.2	587,0	73,7	31,0	71,7	947,9	93,4	131,2	79,2	0,17	3,1	7.5
17	56.8	30.1	17.6	26.2	2	0.2	576,7	72,4	32,0	74,0	947,9	93,4	137,3	82,9	0,08	1,6	7.4
18	57.6	30.5	15.9	23.7	2	0.2	578,6	72,6	31,7	73,4	947,9	93,4	146,4	88,5	0,15	2,8	7.4
19	54.4	28.8	14.5	21.6	0	0	573,9	72,0	33,0	76,4	912,4	89,9	168,4	100	0,11	2,1	7.5
20	53.4	28.3	13.1	19.6	8	0.6	603,7	75,7	33,7	77,9	1054,4	100	154,9	93,6	0,09	1,8	7.3
21	52.3	27.7	12.5	18.7	11	0.9	613,3	75,7	33,6	77,7	1018,9	100	184,2	100	0,06	1,1	7.6
moy	51.1	27	12.1	18	24.9	2	581.4	72,9	30,0	69,4	970,7	95,1	132,8	79,6	0,2	4,4	7.5

D'après les résultats obtenus par les analyses physico-chimiques effectuées sur plusieurs échantillons de l'eau traitée par la nanofiltration qui sont représentés dans le tableau III.5 on remarque ce qui suit :

- Les eaux traitées par la nanofiltration analysées sont caractérisées par un PH de l'ordre de 7.5
- La concentration des anions sulfates (SO_4^{2-}) est presque 24.9 ppm c'est-à-dire juste 2% de la concentration initiale de (SO_4^{2-}) dans l'eau de la LIAS.
- L'absence des cations de baryum
- Une réduction de la concentration du (Ca^{2+}) et (Mg^{2+})
- La concentration de (Ca^{2+}) = 51.1 ppm c'est-à-dire 27% de la concentration initiale
- La concentration de (Mg^{2+}) = 12.1 ppm c'est-à-dire 18% de la concentration initiale

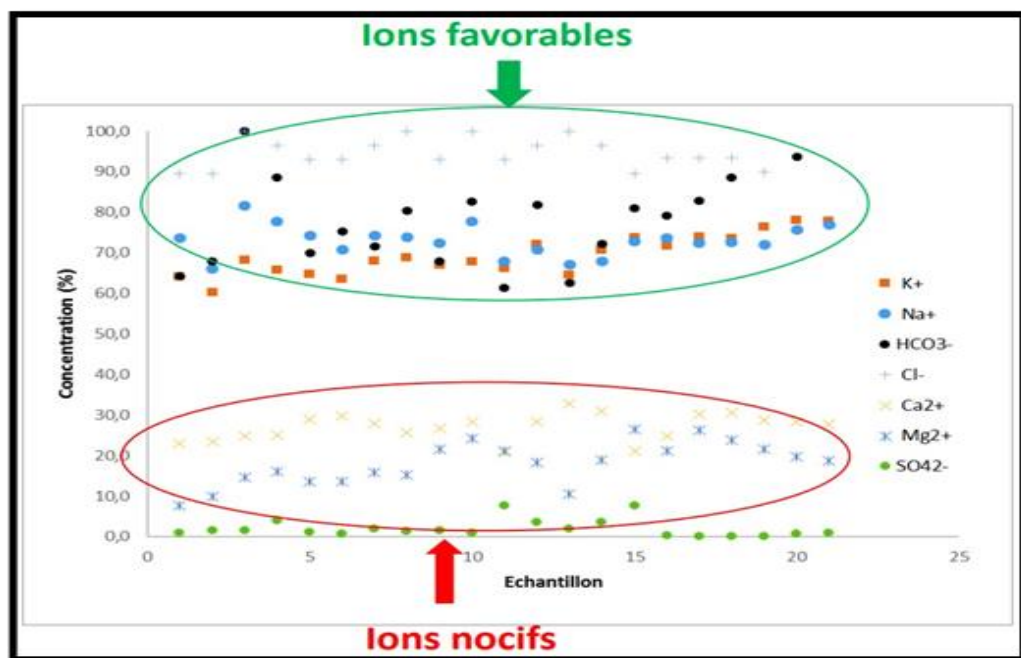


Figure III.4 : les concentrations des composants chimiques de l'eau traitée par nanofiltration [54]

La figure au-dessus III.4 montre la concentration des différents ions dans l'eau traité par la nanofiltration, on constate que :

- La NF réduit considérablement la concentration des ions engendrant les problèmes des dépôts tels que (SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Mg^{2+})
- La NF garde une bonne concentration des Ions favorables alors un bon niveau de TDS
- La technologie de nanofiltration est très sélective concernant l'élimination de certains éléments

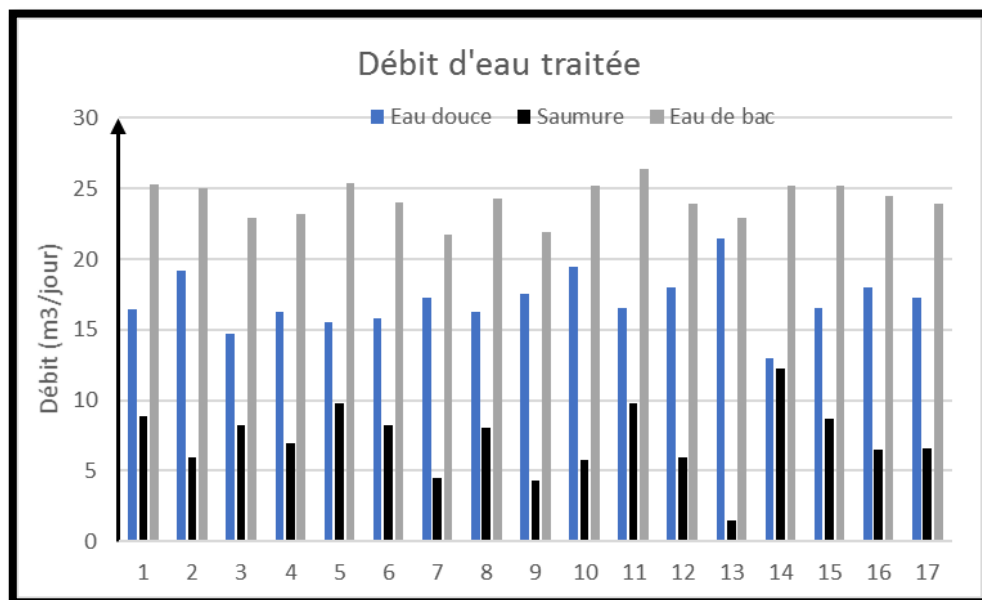


Figure III.5 : le débit d'eau traitée [54].

D'après la figure au-dessus III.5 qui montre le débit d'eau traité par la nanofiltration on remarque que :

- Pour un débit d'eau de bac presque égale à 25m^3
- La NF donne un débit d'eau traité égale à 18 m^3 c'est-à-dire 72% d'eau de bac ce qui un bon taux de récupération
- La NF donne aussi un débit de saumure de 7 m^3 c'est-à-dire 28% d'eau de bac.

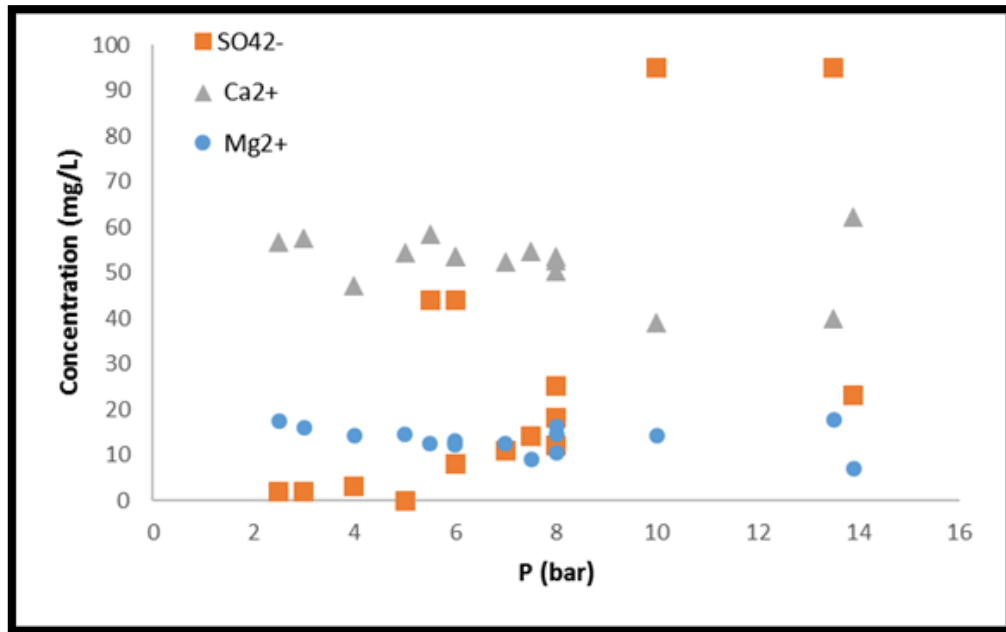


Figure III.6 : la concentration des composants chimiques d'eau traitée en fonction de changement de la pression [54].

D'après la figure III.6 on peut constater que :

La concentration des ions qui provoquent des problèmes des dépôts (scale problèmes) dans l'eau traité par la NF pas vraiment changé par rapport avec le changement de pression. Par conséquent la qualité d'eau adoucie par la nanofiltration ne dépendant du changement de pression

III.4.3 Résultats d'analyse d'eau traitée avec l'osmose inverse :

Tableau III.6 : Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau traitée avec l'osmose inverse . [54]

N ^o E	Ca ²⁺		Mg ²⁺		So ₄ ²⁻		Na ⁺		K ⁺		Cl ⁻		HCO ₃ ⁻		TURBIDITE		PH
	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	NTU	%	
1	9.4	4.97	2.28	3.41	0	0	38.99	4.89	2.19	5.07	134.9	13.29	0.08	0.05	0.326	5.9	6.6
2	7.82	4.14	2.1	3.14	0	0	26.64	3.34	1.64	3.80	170.4	16.78	0.1	0.06	0.303	5.48	6.7
3	1.0	0.53	2.07	3.09	0	0	30.48	3.82	1.84	4.27	170.4	16.78	0.11	0.07	0.177	3.2	6.7
4	0.61	0.32	0.13	0.19	0	0	40.24	5.05	1.81	4.19	99.4	9.79	10.98	6.63	0.126	2.28	6
5	0.52	0.28	0.12	0.18	0	0	40.57	5.09	2.05	4.75	99.4	9.79	7.32	4.42	0.083	1.5	6.2
6	0.59	0.31	0.14	0.21	0	0	38.76	4.86	1.82	4.21	81.65	8.04	9.15	5.53	0.16	2.9	6
7	0.58	0.31	0.11	0.16	0	0	44.58	5.59	2.46	5.70	99.4	9.79	12.8	7.74	0.112	2.03	5.8
8	0.59	0.31	0.08	0.12	0	0	39.55	4.96	2.04	4.72	81.65	8.04	9.15	5.53	0.098	1.77	6.4
9	0.64	0.34	0.1	0.15	0	0	29.15	3.66	1.36	3.15	99.4	9.79	9.15	5.53	0.131	2.37	5.9
10	0.62	0.33	0.09	0.13	0	0	39.95	5.01	1.79	4.14	99.4	9.79	8.54	5.16	0.136	2.46	5.9
11	0.77	0.41	0.11	0.16	0	0	24.72	3.10	1.51	3.50	81.65	8.04	8.54	5.16	0.13	2.35	6.2
MOY	2.10	1.11	0.67	1.00	0	0	35.78	4.49	1.86	4.32	110.7	10.90	6.9	4.17	0.16	2.93	6.22

D'après les résultats obtenus par les analyses physico-chimiques effectuées sur plusieurs échantillons de l'eau traitée par l'osmose inverse (RO) qui sont représenté dans le tableau III.6 on remarque ce qui suit :

- Les eaux traitées par l'osmose inverse analysées sont caractérisées par un PH de l'ordre de 6.22
- La concentration des anions sulfates (SO₄²⁻) est nulle 00 ppm c'est-à-dire 0% de la concentration initiale de (SO₄²⁻) dans l'eau de la LIAS.

- Presque une élimination totale des ions de (Ca^{2+}) et (Mg^{2+})
- La concentration de (Ca^{2+}) = 2.10 ppm c'est-à-dire 1.11% de la concentration initiale
- La concentration de (Mg^{2+}) = 0.67 ppm c'est-à-dire 18% de la concentration initiale

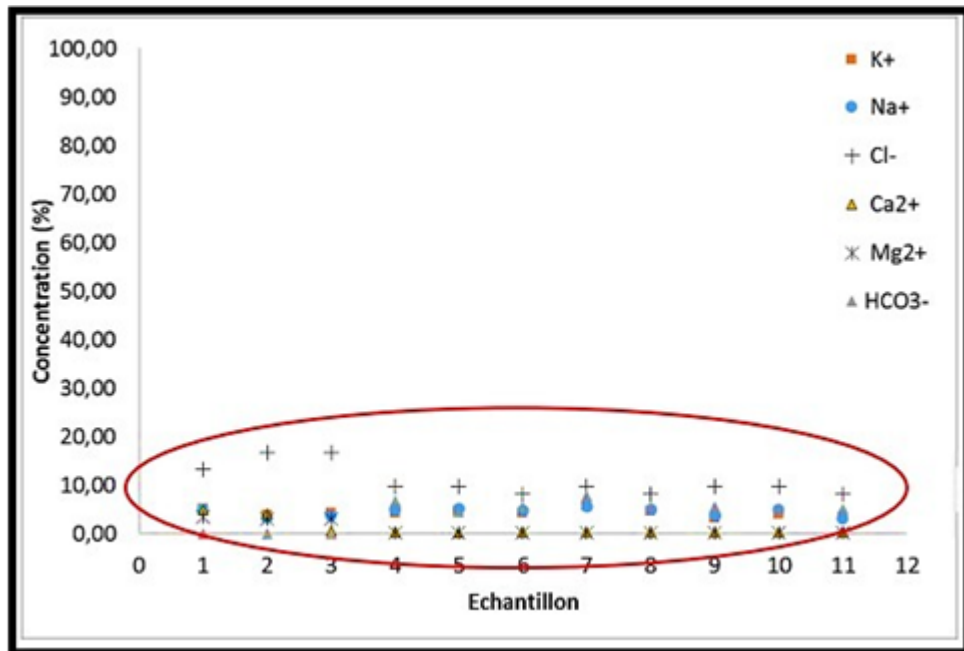


Figure III.7 : les concentrations des composants chimique de l'eau traitée par l'osmoseinverse [54].

D'après la figure au-dessus III.7 qui montre la concentration des différents ions dans l'eautraitée par l'osmose inverse on constate que :

- L'osmose inverse élimine tous les ions dans l'eau sans exception
- L'osmose inverse réduit considérablement le niveau de TDS
- La technologie d'osmose inverse est non sélective concernant l'élimination des ions.

III.5 Effet des technologies de nanofiltration et l'osmose inverse sur la précipitation de sulfates de baryum :

Ce qui nous intéresse dans ce mémoire c'est clairement l'efficacité de ces deux technologies (NF) et (RO) sur l'élimination de sulfates SO_4^{2-} dans l'eau d'injection (**l'eau de la LIAS**) et est-ce que ces technologies peuvent le rendre plus compatible avec l'eau de gisement (**l'eau d'ordovicien**) et par conséquent leurs effets sur la formation des dépôts du sulfate de baryum **BaSO₄**.

A- Les Résultats d'analyses physico-chimiques sur l'eau de la Lias traitée par l'osmose inverse (**RO**) montrent que la concentration des ions de sulfates dans l'eau traitée est nulle $[\text{SO}_4^{2-}] \approx 00 \text{ mg/l}$, c'est-à-dire La filtration membranaire par l'osmose inverse élimine totalement les ions de sulfates SO_4^{2-} avec un taux d'élimination de sulfates de **99.9% (sulfate removal %)**. Par conséquent la probabilité de précipitations de sulfates de baryum **BaSO₄**, est nulle théoriquement.

On peut conclure que la technologie d'osmose inverse (**RO**) a un taux d'efficacité de **99.9%** concernant la prévention de la formation des dépôts de sulfates de baryum.

B- D'une autre coté les Résultats d'analyses physico-chimiques sur l'eau de la Lias traitée par la technologie de nanofiltration (**NF**) montrent que , la NF réduit considérablement la présence des ions de sulfates jusqu'à que la concentration du sulfate dans l'eau traitée atteint 2% de la concentration initiale $[\text{SO}_4^{2-}] = 24.9 \text{ mg/l}$, c'est-à-dire La filtration membranaire par La nanofiltration élimine les ions de sulfates SO_4^{2-} avec un taux d'élimination de sulfates de **97.9 % (sulfate removal %)**

Par conséquent la probabilité de précipitations de sulfates de baryum **BaSO₄** est très réduite théoriquement.

La précipitation critique de sulfate de baryum dans le mélange (eau traitée par NF – eau d'Ordovicien) a été faite selon la norme de dosage du sulfate

On a fixé une concentration de $[\text{Ba}^{2+}] = 752 \text{ ppm}$ dans l'eau ordovicien et une concentration de $[\text{SO}_4^{2-}] = 24.9 \text{ ppm}$ Dans l'eau traitée par la NF.



Figure III.8 : Expérience pour déterminer la précipitation de BaSO₄

Résultat obtenue par une expérience au niveau de laboratoire

✚ **Dépôt des sulfates de baryum avant le traitement** ($[\text{SO}_4^{2-}] = 1250 \text{ mg/l}$)

$$P_{st} = 0.303 \text{ g} , [\text{BaSO}_4] = 0.303 \text{ g / l} = 303 \text{ mg / l}$$

✚ **Dépôt de sulfates de baryum après le traitement par nanofiltration NF**

$$P_t = 0.0061 \text{ g} , [\text{BaSO}_4] = 0.0061 \text{ g / l} = 6.1 \text{ mg/l}$$

- **Le dépôt de sulfates de baryum éliminé par la nanofiltration**

$$\Delta P = P_t - P_{st} = 303 - 6.1 = 296.9 \text{ mg}$$

On peut conclure que la technologie de nanofiltration (NF) a un taux d'efficacité de **97.9%** concernant la prévention de la formation des dépôts de sulfates de baryum

Conclusion :

Les résultats des analyses physico chimiques ont démontré que la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (RO) ont un taux d'efficacité de 97.9 % et presque 99 % respectivement ce que prouve que ces deux technologies présentes une véritable solution concernant la prévention de la formation des dépôts de sulfates de baryum , mais l'osmose inverse (RO) non sélective concernant l'élimination des ions

C

Conclusion générale

Conclusion général

Conclusion générale

Ce travail s'est articulé sur le traitement de l'eau d'injection par différentes méthodes afin de réduire la déposition des sulfates de baryum au niveau de champs pétrolier de TFT - Ain Aminas.

Dans notre étude nous avons tout d'abord analysé l'eau d'injection (LIAS) et l'eau de gisement (ORDOVICIEN) au niveau de CRD -Boumerdes, les résultats ont montré que l'eau de LIAS contient une concentration très élevée des sulfates (1250+100 ppm), et l'eau de gisement (ORDOVICIEN) contient une concentration de 1120 ppm de Baryum, le contact entre ces deux eaux provoque un problème des dépôts soit au niveau de puit ou sur le centre de séparation, la séparation sélective et l'utilisation des inhibiteurs ne sont pas suffisantes pour réduire ces dépôts de sulfates au champs TFT.

Pour cela, il a été proposé deux méthodes pour le traitement de l'eau de LIAS par la filtration membranaire à savoir la nanofiltration ou l'osmose inverse, et les résultats étaient satisfaisantes par un taux d'élimination des sulfates dans l'eau de LIAS de 97,9 % pour la nanofiltration et 99,9 % pour l'osmose inverse. Avec ces teneurs de sulfates on a testé la déposition des BaSO₄ au laboratoire et on a conclu que l'eau d'injection devient compatible avec l'eau de formation et ne provoque aucun problème de déposition des sulfates de baryum.

Les résultats ont montré que le procédé RO est un peu plus efficace que la NF de point de vue de l'élimination des ions de sulfates par contre La méthode RO réduit le TDS ce qui affecte négativement sur la récupération tertiaire par la voie chimique (cEOR). Donc on peut conclure que la technologie nanofiltration est le processus le plus adéquat pour le traitement de l'eau d'injection et qui répond plus à l'exigence de ce projet ainsi présente la solution idéale pour remédier les problèmes causés par la formation des dépôts de BaSO₄ au niveau du champs TFT

Bien que ces deux méthodes de traitement de l'eau aient été menées à bien et aient donné des résultats prometteurs, il reste beaucoup d'avenues à explorer qui sont :

- Réalisation d'un système de préfiltration efficace pour réduire le colmatage afin d'augmenter la durée de vie des membranes.
- Automatisation du système de régénération des filtres et le rinçage chimique des membranes.
- Mise en place des points d'échantillonnage et faire des analyses périodiques pour la vérification de La qualité d'eau en amont et en aval.

R

Références Bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] Boukelmoune, O, Bouaoune , S, Tamma, S, ‘‘Optimisation de dessalage et inhibition des dépôts de sulfates de baryum dans le champ HGA’’ . Pour obtenir le Diplôme de Master ; Université Kasdi Merbah Ouargla ; **2017**
- [2] Académie Nationale de Pharmacie, «Définition de la filtration». **2001**
- [3] Rapport de SH DP-TFT, «Documentation sur le gisement TFT.,» Illizi. **1982**
- [4] S. B. M. Sukri, physical properties, characterization and interaction mechanism study between barium sulphate and diethylenetriaminepentaacetic acid pentapotassium salt, degree of Bachelor of Chemical Engineering (Gas Technology), universiti malaysia Pahang, **January 2015**.
- [5] R.A Saza, N.I Awang Kechik , E Yahya and M.S Mat-Shayuti , Study of Barium Sulfate Scale Dissolution into Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), , Universiti Teknologi MARA (UiTM), 40450, Shah Alam, Selangor, Malaysia , Materials Science and Engineering 778. **2020**
- [6] Barium sulfate Chemical Properties, Uses, and Production.
<https://www.chemicalbook.com/>
- [7] Environmental Science and Technology 33(16) with 655 Reads. **July 1999**
- [8] B. KORIBA, «Prévention et lutte contre le phénomène d'entartrage dans les conduites d'eau dans la région de Ouargla – Touggourt : étude sur site.», Mémoire magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, Page 24. **2007**
- [9] ALIA.K et CHENGUEL.R « Optimisation des paramètres d'inhibition des sels insolubles au niveau des installations industrielles et des puits pétroliers de la région Ourhoud »Master Génie des Procédés Option Génie Chimique, Université d'El Oued, **2014**
- [10] Chen, H.J. Inhibition of barium sulfate precipitation: Effects of additives, solution pH, and super saturation water treatment, china ocean press-printed in Beijing, 9:47-56. **1994**
- [11] A.B.B. Merdhah , A.A.M. Yassin, Barium Sulfate Scale Formation in Oil Reservoir during Water Injection at High-Barium Formation Water. Journal of Applied Sciences, 7: 2393-2403. **2007**
- [12] Moghadasi, J., Jamialahmadi, M., Muller-Steinhagen, H., Sharif, A., Ghalambor, A., Izadpanah, R.M., Motaie, E. Scale Formation in Iranian Oil Reservoir and Production Equipment during Water Injection. The 5th International Oilfield Scale Symposium and

Exhibition. Aberdeen, UK, SPE 80406, pp. 1–14. **2003**

[13] Vincent PACARY, Etude des procédés de décontamination des effluents liquides radioactifs par coprécipitation : De la modélisation à la conception de nouveaux procédés, Docteur de l'INPL, **04 novembre 2008**

[14] constantes du produit de solubilité site web:

https://www.periodni.com/fr/constantes_du_produit_de_solubilite.html

[15] équilibre de solubilité site web: <https://facscm.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2020/05/01-%C3%A9quilibre-de-solubilit%C3%A9>.

[16] Zhang, P., Kan, A. T., & Tomson, M. B., Oil Field Mineral Scale Control. Mineral Scales and Deposits, 603–617. **2015**

[17] A.B.B. Merdhah, A.A.M. Yassin, Laboratory Study on Precipitation of Barium Sulphate in Malaysia Sandstone Cores, University Technology Malaysia. 81310, 2, 1-11, **2009**.

[18] Crabtree, M. et al. Fighting Scale—Removal and Prevention. Oilfield Review 11 (3): 30. **1999**.

[19] Welltec, Milling Solutions, site web: <http://www.welltec.com/Milling-Solutions.aspx?ID=37>. **2012**

[20] Margrethe Tunesvik, The scale problem, scale control and evaluation of wireline milling for scale Removal, of degree MASTER, Faculty of Science and Technology, spring semester, **2013**.

[21] Schlumberger, "Blaster Services" présentation. **2009**

[22] BOUTERCHA Hanane, LAHBIL Nassira «Les problèmes de récupération secondaire de pétrole en Algérie étude de cas du champ HMD» mémoire 2em master production, Université de Ouargla, **2016**.

[23] Larbaoui-Djallal Karima, Étude de l'efficacité des inhibiteurs de dépôts de Sulfate de Baryum par les méthodes électrochimiques et gravimétrique, Thèse de doctorat, **2017**.

[24] HALLIBURTON BEST PRACTICES "Scale Prevention". **2010**

[25] Kelland, M. A. Production chemicals for the oil and gas industry. Boca Raton: CRC Press. **2009**.

[26] Vazquez, O, Herrero, P, Mackay, EJ & Jordan, M 2016, 'Non-aqueous vs aqueous overflush scale inhibitor squeeze treatment in an oilfield offshore Norway', Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 138, **2016**.

[27] Céline Rondon. Etude des mécanismes de libération d'actif nano dispersé - Application au traitement de puits. Matériaux. Université Bordeaux 1, Français. **2010**

- [28] Amjad, Z., Scale Inhibition in Desalination Applications: An Overview, IN NACE The International Annual Conference and Exposition, Paper 230, Ohio, USA, **1996**.
- [29] Kumar, S., Naiya, T. K., & Kumar, T. Developments in oilfield scale handling towards green technology-A review. Journal of Petroleum Science and Engineering, 169, 428–444. **2018**
- [30] Procèdes et technologies traitement et onditionnement des eaux industrielles site web : <https://www.suezwaterhandbook.fr/procèdes-et-technologies/traitement-et-conditionnement-des-eaux-industrielles/production-d-eaux-d-injection-en-recuperation-assistee-du-petrole>. **2008**
- [31] Kenza KECHID : « Revamping de la batterie de filtration Au niveau de la station d'injection d'eau CS2 » Projet de fin de formation. DIVISION EXPLOITATION TFT.
- [32] BOUCHOUX, Antoine. Étude de la nanofiltration pour son intégration dans les procédés de production d'acides organiques. Thèse de doctorat : génie des procédés. Université Paul Sabatier, Toulouse, UFR Physique-chimie-Automatique, 209 pages. **2004**
- [33] ERIKSSON, Peter. Nanofiltration extends the range of membrane filtration. Environmental Progress, vol. 7, no, p. 58-62. **1988**
- [34] Osmose inverse comment ca marche web site : <http://www.o25.eu/osmose-inverse-comment-ca-marche/> **1981**
- [35] Alzahrani, Salem; Mohammad, Abdul Wahab "Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: A review". Journal of Water Process Engineering. 4: 107–133. **01-12-2014**.
- [36] Amjad, Z. (Ed.). Mineral Scale Formation and Inhibition. **1995**
- [37] Wang Y, Li A, Yang H. Effects of substitution degree and molecular weight of carboxymethyl starch on its scale inhibition. Desalination;408:60–9. **2017** .
- [38] Zhang B, Zhang L, Li F, Hu W, Hannam PM. Testing the formation of Ca-phosphonate precipitates and evaluating the anionic polymers as Ca-phosphonate precipitates and CaCO₃ scale inhibitor in simulated cooling water. **2010**.
- [39] Mpelwa, M., & Tang, S.-F. State of the art of synthetic threshold scale inhibitors for mineral scaling in the petroleum industry: a review. Petroleum **2019** .
- [40] Ali, A. M., & Messaoud, H. Barium Sulphate Deposits. Energy Procedia, 157. **2019**
- [41] Christian Roque, Prévention et inhibition des dépôts de sulfates dans les installations Pétrolières, Institut français du pétrole, publication **1996**.
- [42] Wong, D.C.Y. Barium sulphate precipitation in semi-batch reactors. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, UK. **2001**

- [43] Jones F. Oliveira A., Rohl A.L., Parkinson G.M., Ogden M.I. and Reyhani M.M., Investigation into the effect of phosphonate inhibitors on barium sulfate precipitation J. Cryst Growth, 237-239:424-429 ,**2002**.
- [44] Jones F Stanley A., Oliveira A., Rohl A.L., Reyhani M.M., Parkinson G.M. and Ogden M.I., The role of phosphonate speciation on the inhibition of barium sulfate precipitation, J. Cryst. Growth, 249; 584- 593. **2003**.
- [45] Kucher M Babic D., Kind M., Precipitation of barium sulfate: Experimental investigation about the influence of supersaturation and free lattice ion ratio on particle formation, Chemical Engineering and Processing 45 ,900–907. **2006**.
- [46] Z. LALMI, Inhibition de la déposition des sels insolubles au niveau des installations industrielles et des puits pétroliers de la région Ourhoud , Mémoire de Magister, **2008**.
- [47] Yu T. Yang X, Yuan J., Guo L, Wu X, and Wang H., Preparation and Performance Evaluation of a Highly Effective Barium Sulfate Descaling System Based on Ammonium Carboxy Chelating Agent DTPA, Russian Journal of Applied Chemistry, Vol. 89, No. 7, pp. 1145–1157, **2016**
- [48] BOUFADES, Djamila, HAMMADOU NÉE MESDOUR, Souad, ADJOU, Zakaria, et al. Optimization of sulfate removal from injection water using multi-walled carbon nanotubes by response surface methodology. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, p. 1-15. **2023**
- [49] Présentation générale de la région de TFT. Diagnostic et réfection des réseaux d ' AEP et d 'assainissement de la nouvelle base de vie TFT
- [50] A. Abdelhamid, A. Ibrahim, H. Mohammed, Analyse ET traitement des dépôts de sulfate de Baryum($BaSO_4$) dans le champ de HMD (puits ONIZ432, MD660 et OL6), MEMOIRE de Master, **2018**.
- [51] Déploiement du programme « Réservoir- to- Tank » Amélioration du système
- [52] Le système réseau de collecte – CS, Déploiement du programme « Réservoir-to- Tank» Amélioration du système-production de TFT-Ordovicien. Sonatrach/Activité Amont /Divisions PED et Production Tin Fouyé Tabankort, le **9 avril 2009**.
- [53] Rapport de SH DP-TFT, «Documentation sur le PROBLEME DE DEPOT DE SULFATE DE BARYUM A TFT ET CES INFLUENCES SUR LA PRODUCTION ET LES EQUIPEMENTS DE SURFACE » **19 avril 2000**
- [54] Projet Pilote Traitement des eaux pour des applications dans : SWCTT, LSWF et Désulfatation, Le centre de recherche des technologies des semi-conducteur, **2021**.

[55] Rapport de SH DP-TFT« Résultats d'analyse chimique des eaux de champs TFT
»2019