

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE



MEMOIRE

Présentée pour obtenir le Grade de

MASTER

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie de l'Environnement

Par

AIT BENAMARA
Dehbia et
MEZIANE Karima

Thème

***OPTIMISATION DE LA FORMATION DU
PRÉCIPITÉ ISSU DU MÉLANGE DES EAUX
D'INJECTION ET DE GISEMENT DANS
L'INDUSTRIE PÉTROLIÈRE***

Soutenu le 22/09/2013 devant le jury composé de :

Mr Amar SAAL	Maître de conférences B	UMMTO	Président
Mr Hocine KADI	Professeur	UMMTO	Promoteur
Mr Hacene SAIBI	Attaché de recherches	CRNA	Co-promoteur
Mme Fadila AYATI	Maître de conférences B	UMMTO	Examinatrice
Mr Mohamed DELLAH	Maître assistant A	UMMTO	Examinateur
Mr Abdelaziz OUMANSOUR	Chef de département	CRD	Invité

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Monsieur **Hocine KADI**, Professeur à l'Université de Tizi-Ouzou pour nous avoir confié ce travail de recherches ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. Nous avons beaucoup appris à ses côtés et nous lui adressons notre gratitude pour tout cela.*

*Nous aimerions adresser nos remerciements à notre co-promoteur Monsieur **Hacene SAIBI**, attaché de recherches au CRNA (Centre de Recherche Nucléaire d'Alger).*

*Nous remercions Monsieur **Amar SAAL**, Maître de Conférences à l'Université de Tizi-Ouzou pour l'insigne honneur que vous nous faites en acceptant de présider le jury de ce mémoire.*

Nos vifs remerciements vont également aux autres membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

*Nos remerciements s'adressent également à Monsieur **Abdelaziz OUMANSOUR**, Chef de département traitement et contrôle des fluides au CRD (Sonatrach) de Boumerdes qui nous a aimablement fourni tous les matériaux nécessaires à notre expérimentation.*

*Nous ne devons oublier de remercier aussi Monsieur **Moussa MALKI**, Ingénieur analyse au CRD.*

*Un grand merci à Monsieur **Said TAZEKRIT**, Directeur du Laboratoire de Chimie Appliquée et Génie Chimique (LCAGC) de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.*

*Nos remerciements s'adressent également à Monsieur **Ramdane MOUSSAOUI**, Maître de Conférences à l'Université de Tizi-Ouzou, pour toute l'aide qu'il nous a apportée.*

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, à ma mère...

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

A mes adorables frères : Yacine, Samir, Mustapha, Madjid et Yanis,

A mes chères sœurs : Ouiza et Nassima ,

A mes belles-sœurs et neveux en particulier Kakou,

A ma grand-mère,

Et une mention spéciale pour Karima, ma binôme !! Que la force soit avec nous !

Dehbia AIT BENAMARA

DEDICACES

A vous chers parents, je dédie ce modeste travail qui est le fruit de vos conseils ; assistance et soutien morale, en témoignage de ma reconnaissance et mon affection, dans l'espoir que vous en serez fiers. Puisse Dieu, vous préserver et vous accorder santé; longue vie et bonheur.

A mon adorable sœur Lynda.

Et mon très cher frère Yacine.

Et ma chère Binôme Kahina. Que dieu soit avec nous.

MEZIANE Karima

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. GENERALITES SUR LA FORMATION DU PETROLE.....	2
I.1.1. Origine.....	2
I.1.2. Formation.....	2
I.1.3. Composition.....	4
a- Les hydrocarbures.....	4
b- Les composés soufrés.....	5
I.1.4. Production.....	5
a- Récupération primaire.....	5
b- Récupération secondaire.....	6
c- Récupération tertiaire.....	7
I.1.5. Incompatibilité des eaux de gisement et des eaux d'injection.....	7
I.2. METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE EXPERIMENTALE.....	9
I.2.1. Généralités sur les plans d'expériences.....	9
a- Réponse.....	10
b- Facteur.....	10
c- Domaine expérimental d'intérêt.....	10
d- Variables centrées réduites.....	10
e- Matrice d'expériences.....	11
f- Plan d'expérimentation.....	11

g- Démarche méthodologique.....	11
I.2.2. Objectifs de la Méthodologie de la Recherche Expérimentale.....	11
I.2.3. Criblage de facteurs.....	12
I.2.4. Surfaces de réponses.....	13
a- Définition de ou des objectif(s) de l'étude.....	13
b- Modèle mathématique.....	13
c- Matrices d'expériences.....	14
d- Points au centre du domaine.....	14
e- Isovariance par rotation.....	14

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1. INTRODUCTION.....	16
II.2. MATERIELS UTILISES.....	16
II.2.1. Eaux d'injection et de gisement.....	16
II.2.2. Les inhibiteurs.....	17
II.3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	18
a- Mise en contact intime des eaux.....	18
b- Filtration.....	21
c- Séchage.....	21

CHAPITRE III_ CRIBLAGE DE FACTEURS

III.1. CRIBLAGE DE FACTEURS.....	22
III.1.1. Matrice d'expériences et plan d'expérimentation.....	23

III.1.2. Estimation des poids des facteurs.....	23
III.1.3. Interprétation des résultats.....	26

CHAPITRE IV: ETUDE QUANTITATIVE DES SURFACES DE REPONSE

IV. PREPARATION DE L'EXPERIMENTATION.....	28
IV.1.1. Mise en place de la stratégie.....	28
a- Modèle mathématique.....	28
b- Matrice d'expérience et plan d'expérimentation.....	29
IV.1.2. Qualité de la prédiction.....	33
IV.1.3. Fonction de variance.....	33
IV.1.4. Isovariance par rotation.....	34
IV.2. EXPERIMENTATION.....	35
IV.3. INTERPRETATION DES RESULTATS.....	35
IV.3.1. Equation du modèle sans les points tests.....	35
IV.3.2. Equation affinée du modèle.....	37
a) Analyse des résidus.....	38
b) Analyse de la variance.....	39
IV.3-3. Conditions opératoires pour minimiser la masse de dépôt.....	42
Conclusion Générale.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique moyenne des pétroles.....	5
Tableau 2 : Premières lignes des matrices de Hadamard	12
Tableau 3 : Composition chimique des eaux de gisement et d'injection utilisées	17
Tableau 4 : Valeurs Indicatives de l'INIPOLAD 325.....	18
Tableau 5 : Matrice d'expériences	24
Tableau 6: Conditions opératoires.....	24
Tableau 7 : Plan d'expérimentation	25
Tableau 8 : Résultats des expériences (Criblage).....	26
Tableau 9 : Estimations et statistiques des coefficients	27
Tableau 10 : Matrice d'expérience.....	30
Tableau 11 : Domaine de variation de chaque facteur : Conditions opératoires	31
Tableau 12 : Plan d'expérimentations.....	32
Tableau 13 : Résultats des expériences (Surface de réponse).....	35
Tableau 14 : Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1: Masse du dépôt.....	36
Tableau 15 : Résidus : réponse Y1 : Masse du dépôt	37
Tableau 16 : Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1 : Masse du dépôt.....	38
Tableau 17 : Analyse de la variance : réponse Y1 : Masse du dépôt.....	40
Tableau 18 : Résultats des expériences	48

Liste des figures

Figure 1: Représentation d'un gisement de pétrole.....	4
Figure 2: Photographie d'un pipe bouché par le dépôt (8).....	8
Figure 3: Evolution de la production d'huile et de l'injection d'eau dans le champ TFT (9)....	9
Figure 4: Photographie du montage réalisé.....	19
Figure 5: Flowsheet de production du précipité.....	20
Figure 6 : Etude graphique des effets de la réponse.....	27
Figure 7 :Variation de la fonction de variance - dans le plan : Température, [Anti-dépôt] FACTEURS FIXES : % Eau de gisement = 0.6 %	34
Figure 8: Résidus en fonction des réponses prédites.....	39
Figure 9 : Normal Plot.....	39
Figure 10 : Analyse canonique par rapport au point stationnaire après translation Courbure de l'équation canonique : réponse Y1 : Masse de dépôt.....	45
Figure 11 : Variation de la réponse - Masse du dépôt dans le plan : Température, Anti-dépôt FACTEURS FIXES : Eau de gisement = 0.3 %	47
Figure 12 : Etude du chemin optimal pour la réponse : Masse de dépôt	48

INTRODUCTION

Le pétrole est une ressource naturelle non renouvelable. Cette huile minérale qui fournit la grande majorité des carburants liquides actuels constitue l'un des piliers de l'économie mondiale et une ressource majeure de l'industrie.

Quand un puits de pétrole entre en production, l'huile remonte spontanément à la surface sous l'action de la pression de fond qui peut atteindre plusieurs centaines de bars. Cette période appelée « récupération primaire » permet d'obtenir selon les cas 5 à 30% de pétrole en place. Un puits de pétrole en cours de récupération primaire ne nécessite pas d'équipement particulier de surface.

Dès que le puits ne produit plus suffisamment, l'installation d'équipements complémentaires est nécessaire pour augmenter la pression de fond qui a baissé. La récupération dans ce cas est dite assistée. Elle comprend deux modes de récupération (secondaire et tertiaire).

La récupération secondaire peut être réalisée à l'aide d'injection d'eau. Cette technique qui est la plus utilisée permet de maintenir la pression durant l'exploitation. Elle nécessite la disponibilité de grandes quantités d'eau et engendre la formation d'un dépôt généralement dû à l'incompatibilité des eaux de gisement avec les eaux d'injection, de la température et de la pression de fluide [1, 2,3].

Sans un mélange intime des eaux de gisement et des eaux d'injection, la précipitation ne peut pas avoir lieu. Ainsi, le dépôt se retrouve qu'en fond de puits et surtout au niveau des équipements et installations de surface. Ces précipités qui se déposent en concrétions très dures affectent la production. Ils réduisent le flux d'huile en bouchant les perforations et conduisent à la fermeture du puits quand ils bloquent les installations de surface (pipe, manifolds, séparateurs, pompes...). L'utilisation de l'anti-dépôt permet de réduire ces nuisances.

Le but de ce travail est d'étudier la variation de la masse du dépôt issu de l'incompatibilité des eaux de gisement et d'injection du champ pétrolier Tin Fouyé Tabankort (TFT) en utilisant la méthodologie de la recherche expérimentale (plans d'expériences). Après une étude de criblage qui a permis d'identifier très rapidement les facteurs réellement influents, nous avons élaboré une relation mathématique empirique permettant de déterminer la masse du précipité en utilisant les surfaces de réponse. Cette méthode d'optimisation permet de connaître la valeur de la réponse avec une précision égale à celle qu'on obtiendrait si on faisait l'expérience.

CHAPITRE I
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. GENERALITES SUR LA FORMATION DU PETROLE

I.1.1. Origine

Tous les chercheurs s'accordent sur le fait que les hydrocarbures ont une origine organique. En effet, le pétrole provient de la décomposition de végétaux et d'organismes marins accumulés sous la surface de la Terre. Il y a plusieurs millions d'années, les restes de nombreux organismes marins se sont déposés au fond des océans. Avec le temps, ils se sont accumulés et se sont mélangés à la boue et au limon pour former des couches de sédiments riches en matière organique : le kérogène [4].

Le kérogène provient de la décomposition des matières organiques par des bactéries. Le kérogène est disséminé dans une masse minérale (la roche mère) sous forme de petits filets.

Les sédiments s'enfoncent lentement dans le sol sous l'effet de la tectonique des plaques (les mouvements de convection de la croûte terrestre). Sous l'effet de la compression due aux fortes profondeurs, ces couches de sédiments se sont transformées en roche. Avec l'augmentation de l'épaisseur de ces couches de sédiments et des apports de chaleur géothermique, la température s'est élevée et a entraîné une décomposition des matières organiques en substances plus simples : les hydrocarbures. Cette décomposition d'origine thermique est nommée la pyrolyse.

Les arguments qui militent en faveur de l'origine organique du pétrole sont :

- Présence de fossiles d'animaux et de végétaux avec le pétrole,
- Proximité des puits de pétrole de côtes,
- La lumière polarisée est déviée par le pétrole. Cela prouve la présence de composés organiques issus de la décomposition de déchets d'animaux.

I.1.2. Formation

Pour trouver du pétrole, quatre conditions doivent être réunies : la présence d'une "roche-mère", des conditions favorables à sa transformation en hydrocarbures, des voies de migration, et enfin un piège où il sera bloqué avant d'atteindre la surface.

Etape 1 : le dépôt de matière organique

Le pétrole prend naissance dans des bassins sédimentaires, des zones où s'accumulent des résidus minéraux et organiques océans, et le relief. Une matière organique exclusivement animale produira beaucoup d'hydrocarbures liquides alors qu'une matière organique riche en matière végétale donnera principalement du gaz.

Alors que sur les continents, l'essentiel de la matière organique est décomposée, les micro-organismes sous-marins morts coulent rapidement au fond des océans. Pour peu que les conditions soient favorables (vitesse de sédimentation lente et climat propice), la proportion de matière organique devient importante dans les sédiments, et forme ce que l'on appelle une roche-mère. Dans certaines zones, la couche peut atteindre 7000 à 8000 mètres d'épaisseur.

Etape 2 : la transformation en hydrocarbures

Comment de la matière inerte et solide peut se transformer en liquide visqueux ? Il faut pour cela qu'elle soit soumise à de fortes pressions et des températures élevées. Au fur et à mesure que les dépôts de sédiments s'empilent, la roche mère est enfouie de plus en plus profondément. Dans le sous-sol, la température augmente de 3°C quand on descend de 100 m. Vers 3000 m de profondeur, on atteint donc déjà les 100°C. A cette température, les grosses molécules sont "craquées" en molécules plus légères, des hydrocarbures liquides lourds (molécules de plus de 14 atomes de carbone). A température encore plus élevée, on obtient du gaz (1 à 5 atomes de carbone). Le pétrole est généré par sa roche-mère entre 2500 et 3800 m de profondeur.

Etape 3 : le piège à pétrole

Contrairement à ce qu'on pense, les hydrocarbures se trouvent très rarement là où ils se sont formés. Le fluide (pétrole ou gaz), moins dense, est expulsé de la roche-mère, et remonte vers la surface en empruntant des voies plus ou moins rapides (failles, roches poreuses...).

Le problème, c'est qu'une fois arrivé à la surface, les hydrocarbures se dispersent (pour le gaz) ou s'oxydent (pétrole liquide), ne laissant sur le sol que des résidus solides (bitumes) inexploitable. Pour conserver le précieux liquide, il faut donc un piège sur sa route. Le piège idéal, c'est un réservoir. Pas une grande caverne comme on pourrait l'imaginer, mais plutôt des roches poreuses, où le pétrole va se nicher dans les interstices. Ces roches se comportent comme des éponges, absorbant le précieux liquide. Il faut à présent que le réservoir soit fermé hermétiquement par une couche imperméable pour ne pas que le pétrole s'échappe. Les argiles, le gypse ou l'anhydrite sont parmi les plus performantes. Il ne reste plus qu'à espérer que les couches rocheuses ne soient pas renversées ou fracturées par des mouvements tectoniques. Quelques milliers d'années plus tard, on trouvera alors à cet endroit un champ pétrolier exploitable [5].

La **roche-mère** désigne la roche où se forment des hydrocarbures. Ceux-ci sont issus de la transformation de sédiments riches en matière organique qui se déposent généralement sur les fonds océaniques. À l'échelle des temps géologiques, les sédiments marins s'enfoncent et se solidifient tandis que la matière organique (sous l'effet de l'enfouissement et de la température géothermique) se décompose en hydrocarbures liquides et gazeux.

La **roche-réservoir** se définit comme une roche où des hydrocarbures s'accumulent. De densités plus faibles que l'eau, les hydrocarbures de la roche-mère migrent vers la surface à travers les strates de roches sédimentaires. Au cours de cette migration, les hydrocarbures peuvent rencontrer une couche imperméable. Ils se retrouvent piégés en dessous de ce « toit » (appelé roche-couverture) au sein d'une roche poreuse et perméable qui devient la roche-réservoir. Celle-ci est capable de concentrer de grandes quantités d'hydrocarbures, aboutissant à des gisements de pétrole et/ou de gaz.

La représentation d'un gisement pétrolier est donnée par la figure 1.

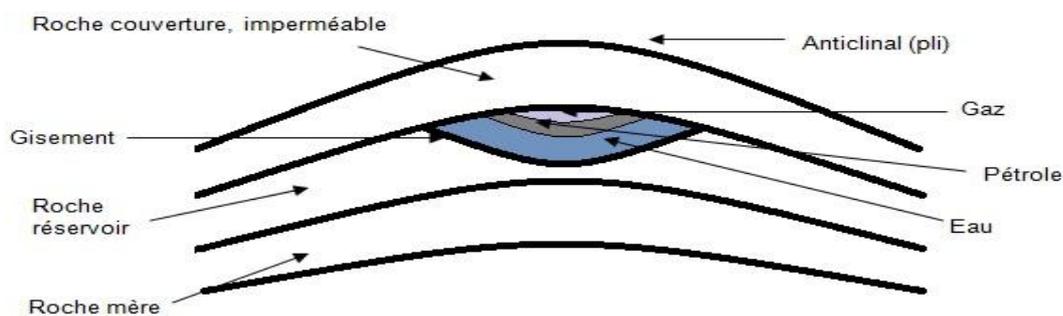


Figure1: Représentation d'un gisement de pétrole

I.1.3. Composition

a- Les hydrocarbures

Le pétrole brut est formé essentiellement d'hydrocarbures (combinaison exclusive de carbone et d'hydrogène », où le carbone présente 83 à 87% en volume et l'hydrogène 10 à 14 %. Les hydrocarbures contenus dans le pétrole sont regroupées en trois familles :

- Les hydrocarbures aliphatiques.
- les hydrocarbures naphthéniques.
- Les hydrocarbures aromatiques.

b- Les composés soufrés

En plus des hydrocarbures, le pétrole brut contient des composés soufrés sous forme de composés organiques soufrés (tableau 1). Le sulfure d'hydrogène H_2S est le seul composé non organique présent dans le brut. La présence des composés soufrés dans le brut est nuisible à cause de leurs caractères corrosifs.

Tableau 1: Composition chimique moyenne des pétroles [6]

Famille de composés	% en poids
Aliphatiques (Alcanes)	30-70
Naphténiques (cyclanes)	30-70
Aromatiques	20-40
Soufrés	0-10
Autres composés	5 -25

I.1.4. Production

Les puits de forage utilisés pour la détection du pétrole servent également à son extraction. Au début de l'extraction, le pétrole jaillit naturellement (extraction primaire). Lorsque la pression naturelle est épuisée ou insuffisante, des techniques artificielles peuvent être utilisées pour activer l'extraction.

On injecte de l'eau ou du gaz pour déplacer le pétrole prisonnier de la roche poreuse (extraction secondaire). L'extraction tertiaire va encore plus loin et fait appel à des méthodes thermiques (injection de vapeur pour réchauffer le pétrole brut et réduire sa viscosité, ce qui le rend plus facile à pomper), des méthodes chimiques (recours à des détergents qui lavent littéralement l'huile de la roche) ou s'appuyant sur un mélange d'huiles plus légères dans les réservoirs profonds [7].

d- Récupération primaire

Un gisement de pétrole est constitué d'une accumulation géologique d'hydrocarbures sous forme liquide ou sous forme gazeuse (on parle alors de gisement de gaz naturel). Même à l'état liquide, dans les conditions du gisement, le liquide contient une certaine quantité de gaz dissous qui va être libérée dès lors que la pression est abaissée, soit en raison de la production,

soit du fait de la remontée du fluide en surface. Dans certains cas, la zone imprégnée de pétrole est bordée; dans sa partie supérieure, par une zone contenant du gaz et, dans sa partie inférieure, par une zone aquifère contenant de l'eau. L'ensemble se trouve à une pression de l'ordre de 200 ou 400 bars le plus souvent. Mais cette pression peut monter jusqu'à 1000 bars et même au-delà, c'est à dire plus de 1000 fois la pression atmosphérique.

Dès qu'un forage met en communication ce gisement avec la surface de la terre, la pression va expulser le pétrole et le gaz vers la surface comme si on retirait la soupape d'un autocuiseur.

Régler à l'optimum la production spontanée d'un gisement suppose évidemment une bonne connaissance des caractéristiques du réservoir. Cette connaissance est en général assez limitée au début de l'exploitation mais elle s'enrichit petit à petit des informations données par les forages de délinéation c'est à dire des puits réalisés pour apprécier l'étendue du gisement, puis des informations apportées par la production elle-même. Ces informations collectées de manière progressive viennent compléter et préciser les données acquises à 3 dimensions par la sismique réflexion avant la décision d'effectuer le premier forage. Toutes ces données servent à caractériser/modéliser le réservoir. Et c'est sur la base de ce modèle qu'on détermine l'implantation et le type des puits de production à réaliser (multi drains ou forages horizontaux par exemple).

Le taux récupération primaire se situe entre 5 % et 10 % pour les bruts extra-lourds. Il peut atteindre 25% sur certains gisements de la mer du Nord contenant un pétrole léger très fluide.

e- Récupération secondaire

A mesure que le pétrole et le gaz sont produits, la pression baisse à l'intérieur du réservoir. Afin de stabiliser cette pression et d'augmenter la quantité d'huile récupérée, on va injecter des fluides dans le gisement, en premier lieu de l'eau ou du gaz. Ce sont ces opérations que les techniciens appellent la récupération secondaire.

Une fois l'énergie initiale est épuisée et le débit de production d'huile est décliné, la récupération des hydrocarbures peut être augmentée par l'utilisation d'une énergie secondaire dans le réservoir. Les procédés conventionnels de récupération secondaire sont d'autant plus efficaces qu'ils permettent un accroissement de la récupération par rapport au simple drainage naturel et à un rythme d'exploitation économiquement acceptable.

L'eau sera injectée à la base du gisement, ou bien en périphérie afin d'opérer une sorte de balayage qui poussera l'huile vers les puits de production tout en maintenant la pression dans

le réservoir. Simple en apparence, cette opération requiert cependant toute une série de précautions.

f- Récupération tertiaire

Les procédés de récupération tertiaire font appel à des méthodes nouvelles ou déjà connues, mais réadaptées grâce à l'évolution des technologies. Ils n'interviennent que dans la production d'environ 2 millions de barils par jour actuellement, soit à peine 2 % de la production mondiale.

Ce sont des procédés qui sont généralement mis en œuvre dans les dernières phases de la vie d'un gisement. Mais ils portent l'espoir d'augmenter encore les taux de récupération de quelques points supplémentaires. Les techniques de récupération tertiaire visent à pousser plus efficacement le brut vers les puits de production, à augmenter la fluidité du pétrole qu'on cherche à récupérer ou au contraire, à diminuer la perméabilité de certaines couches du sous-sol dont les caractéristiques nuisent à un balayage efficace du réservoir [8].

I.1.5. Incompatibilité des eaux de gisement et des eaux d'injection

L'eau est un élément essentiel pour l'exploration et la production de pétrole et de gaz. Que ce soit pour la récupération assistée du pétrole (RAP) ou pour la récupération assistée chimique, en vue d'une réutilisation ou d'un rejet, la qualité de l'eau est déterminante. Les lignes de process pour le traitement de l'eau doivent satisfaire aux exigences liées aux gisements mais aussi à celles liées aux réglementations locales et aux contraintes environnementales.

Dans les champs pétroliers, on utilise fréquemment en récupération assistée l'injection d'eau. Il se pose alors le problème de compatibilité chimique entre l'eau d'injection et d'eau de gisement : on peut avoir une précipitation d'un ou de plusieurs sels inorganiques lorsque on mélange deux eaux incompatibles. C'est le cas d'une eau de réservoir qui contient le baryum mélangée avec une eau d'injection qui contient le sulfate, on assiste bien dans des cas après leur mélange à la formation de dépôts dans les puits producteurs et/ou dans les installations de surface. Ils sont constitués dans la plupart des cas de sulfate de baryum.

Les dépôts et les corrosions causés par les diverses réactions physico-chimiques de cette incompatibilité provoquent des bouchages et des dégradations irréversibles particulièrement dangereuses pour les installations de fond comme de surface. Les précipités

bloquent les pipes (figure 2), les manifolds, les séparateurs et les pompes et peuvent conduire à la fermeture du puits.



Figure 2: Photographie d'un pipe bouché par le dépôt

L'eau d'injection est une eau utilisée pour les besoins de la production. Elle est injectée dans les réservoirs par des puits spécifiques (puits injecteurs) au cours de la récupération dite secondaire afin de compenser la diminution de pression du réservoir consécutive à sa mise en production. Elle sert également pour améliorer l'efficacité de déplacement et d'extraction de l'huile.

Les eaux de gisement ont séjourné pendant des périodes plus au moins longues dans le réservoir où elles étaient en contact avec l'huile le gaz et la roche. Comme leurs quantités, leur qualité dépend de leur origine. Elle varie considérablement en fonction de la région, de la géologie de la formation des types de fluides, du procédé de récupération, des conditions d'exploitation et du management des puits et du réservoir [9].

Cas du champ pétrolier TFT

Dès les premières années de production de TFT-Ordovicien, la pression chute et le GOR (Gaz-Oil-Ratio) augmente. TFT recherche alors une eau d'injection pour le maintien de pression. En 1976 débute une revue des réservoirs aquifères de la zone pour identifier une source capable de fournir $20000\text{m}^3/\text{jour}$ sur le long terme, le réservoir du LIAS a été identifié

à 1200m de fond de l'Ordovicien sans anticiper qu'il puisse y avoir un problème de compatibilité entre les eaux du LIAS et celles de l'Ordovicien.

L'évolution de la production de pétrole et de l'injection d'eau dans le TFT Ordovicien [10] est représentée par la figure 3.

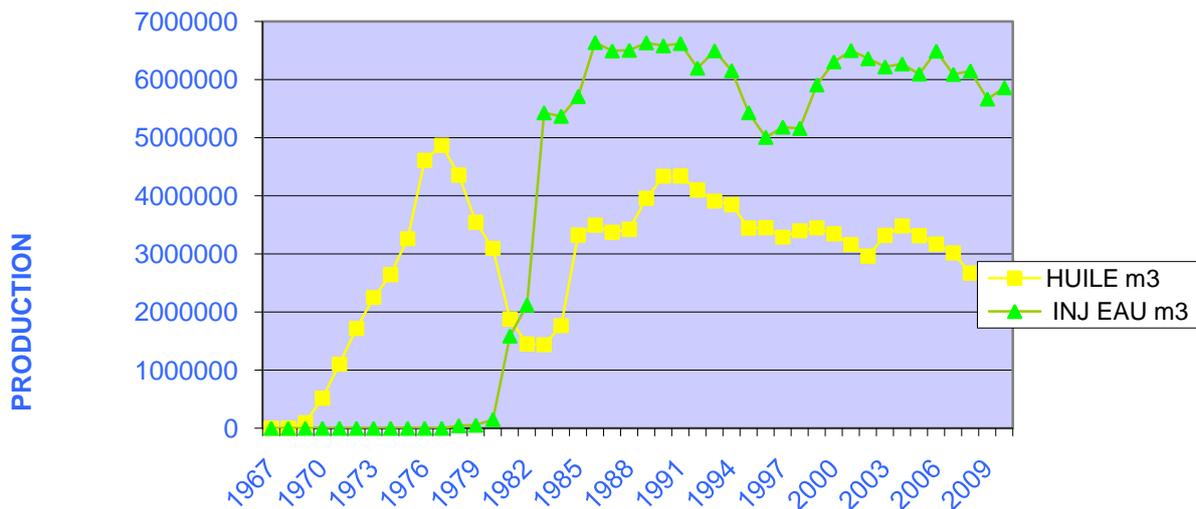


Figure 3: Evolution de la production d'huile et de l'injection d'eau dans le champ TFT [10]

I.2. METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE EXPERIMENTALE

I.2.1. Généralités sur les plans d'expériences

Pour répondre à une ou plusieurs questions posées dans un domaine donné, nous devons faire des expériences. La méthodologie de la recherche expérimentale (M.R.E) appelée aussi plans d'expériences est une stratégie qui permet de choisir judicieusement les essais à réaliser pour répondre aux questions posées avec un maximum de précision. Applicable à toutes les disciplines dans l'industrie comme dans la recherche scientifique, la MRE montre que la qualité de l'information ne dépend pas du nombre d'expériences et que toute la qualité de l'information est dans l'organisation des essais.

Les plans d'expériences obéissent à des règles mathématiques très strictes. Le modèle mathématique postulé permet de déterminer une relation entre deux types de grandeurs : la réponse (ou les réponses) et les facteurs.

h- Réponse

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la ***réponse***, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable», on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs.

i- Facteur

La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée ***niveau***. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur sur la réponse, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

Si l'étude comporte plusieurs facteurs, chacun d'eux aura son domaine de variation. Pour avoir une même représentation pour tous les facteurs, par convention, on note :

Niveau bas (-1)

Niveau haut (+1)

j- Domaine expérimental d'intérêt

C'est le domaine expérimental possible. Il représente la combinaison des domaines de variation de chacun des facteurs. Toutes les informations issues des résultats expérimentaux ne seront valables que dans ce domaine [11].

k- Variables centrées réduites

Soit A la variable naturelle ou réelle et X la variable codée correspondante. Le niveau bas (A-) de la variable naturelle correspond à X= -1 et le niveau haut (A+) à X= +1. Le passage de la variable naturelle A à la variable codée X est donné par la relation :

$$X = \frac{A - A_0}{pas}$$

Où :

$$A_0 = \frac{A_+ + A_-}{2}$$

$$pas = \frac{A_+ - A_-}{2}$$

l- Matrice d'expériences

Une matrice d'expériences est un objet mathématique qui représente sous forme codée les expériences à réaliser. Elle est constituée de N lignes correspondant à N expériences et k colonnes correspondant à k variables.

Une même matrice d'expériences peut être utilisée dans divers domaines.

m- Plan d'expérimentation

Le plan d'expérimentation correspond à la traduction de la matrice d'expériences en variables réelles. C'est un tableau qui comporte N lignes et k colonnes

L'expérimentateur doit examiner le plan d'expérimentation pour voir si toutes les expériences sont réalisables et ne présentent pas de danger [12].

n- Démarche méthodologique

Dans toute stratégie expérimentale, pour que l'interprétation et la décision soient de qualité, il est nécessaire de respecter la démarche suivante :

- Définition de l'objectif.
- Choix des réponses expérimentales.
- Définition des facteurs.
- Définition du domaine expérimental d'intérêt.
- Elaboration de la stratégie expérimentale :
 - Matrice d'expériences.
 - Plan d'expérimentation.
 - Expérimentation.
 - Calcul des estimations des informations désirées
- Interprétation des résultats.

I.2.2. Objectifs de la Méthodologie de la Recherche Expérimentale

Les objectifs sont regroupés en cinq classes:

- Recherche exploratoire : C'est le cas où nous sommes confrontés à une méconnaissance totale du domaine. La MRE propose des techniques pour cadrer la démarche ;

- Criblage : il permet d'identifier rapidement parmi un nombre élevé de facteurs potentiellement influents ceux qui le sont réellement ;
- Etude quantitative des facteurs : Elle permet de déterminer l'effet de chaque facteur et celui des éventuelles interactions entre ces facteurs ;
- Surfaces de réponses : la modélisation du phénomène permet d'accéder par le calcul à la valeur de la réponse (ou des réponses) en tout point du domaine expérimental avec une précision égale à celle qu'on obtiendrait si on faisait l'expérience ;
- Mélange : dans ce cas, les facteurs correspondent aux proportions des différents constituants du mélange. Le modèle mathématique validé permettra de calculer en tout point du domaine expérimental la valeur de la réponse.

I.2.3. Criblage de facteurs

Les matrices de Hadamard sont les matrices les plus utilisées pour un criblage de facteurs. Ce sont des matrices dont les niveaux de chaque facteur ne prennent que deux états distincts notés (-1) et (+1). Elles permettent d'estimer le poids de chacun des k facteurs en N expériences avec une variance :

$$\text{Var}(b_j) = \sigma^2 / N$$

b_j : estimation du poids du facteur j

σ^2 : la variance des réponses.

N : nombre d'expériences à réaliser.

Pour k facteurs à deux niveaux, le nombre d'expériences N à réaliser est toujours un multiple de 4. Il doit aussi satisfaire la condition : $N \geq k+1$

Les premières lignes des matrices de Hadamard sont données par le tableau 2.

Tableau 2 : Premières lignes des matrices de Hadamard

Nombre de facteurs	Nombre d'expériences	Ligne de départ
$k \leq 3$	4	++-
$4 \leq k \leq 7$	8	+++--

$8 \leq k \leq 11$	12	+ + - + + + - - - + -
$12 \leq k \leq 15$	16	+ + + + - - + + - - + - - -
$16 \leq k \leq 19$	20	+ + - - + + + + - - + - - - - + + -
$20 \leq k \leq 23$	24	+ + + + + - - + - + - - + + - - - + - - - -

L'algorithme de la construction des matrices de Hadamard est le suivant :

- 1) écrire la première ligne ou la première colonne
- 2) les autres lignes ou colonnes sont générées par rotation circulaire à gauche ou à droite ou vers le haut, ou vers le bas
- 3) on s'arrête à la (N-1) ième ligne
- 4) La dernière ligne ne comporte que des -1
- 5) supprimer les colonnes superflues et garder le nombre de lignes.

Pour identifier les facteurs influents, on peut utiliser :

- 1) Approche de Lenh
- 2) Normal Plot & Half Normal Plot
- 3) Approche de Pereto
- 4) Approche bayésienne

I.2.4. Surfaces de réponses

Cette stratégie permet de déterminer grâce au modèle mathématique validé la valeur de la réponse ou des réponses avec une précision égale à celle qu'on obtiendrait si on faisait l'expérience [11].

f- Définition de ou des objectif(s) de l'étude

Un grand nombre de problèmes industriels se pose souvent en termes d'optimisation. L'objectif visé lors d'une étude de surface de réponse peut être de:

- Optimiser (maximiser/minimiser) une ou plusieurs réponses,

- Trouver un compromis satisfaisant entre plusieurs réponses,
- Construire une cartographie de la variation d'une réponse dans un plan.

La recherche d'un optimum nécessite généralement d'avoir délimité, au préalable, une zone probable d'appartenance d'une solution au problème. C'est pourquoi, une étude préliminaire des effets des facteurs (criblage ou étude quantitative) est souvent nécessaire et permet parfois d'apporter des premiers éléments de réponse.

g- Modèle mathématique

Les modèles mathématiques utilisés sont souvent des modèles polynômiaux car ils sont faciles à traiter en utilisant le calcul matriciel. Ils sont simples et permettent une démarche séquentielle. Le polynôme utilisé est rarement du premier degré. Il est généralement du second degré :

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_k X_k + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_{(k-1)k} X_{k-1} X_k + b_{11} X_1^2 + \dots + b_{kk} X_k^2$$

Le nombre de coefficients p du modèle est donné par la relation :

$$p = 1 + 2k + k(k-1) / 2$$

h- Matrices d'expériences

Le domaine expérimental dans les surfaces de réponses peut être de forme cubique, sphérique ou même quelconque. Généralement, on utilise un domaine expérimental cubique lorsque la région à étudier est bornée par des contraintes individuelles. Dans les matrices sphériques, les points expérimentaux sont disposés sur une sphère.

Les matrices d'expériences utilisées varient avec le modèle postulé. Dans le cas où le modèle est un polynôme du second degré, les matrices utilisées sont :

Domaine expérimental sphérique :

- Matrices d'expériences composites
 - Matrices d'expériences Doehlert
 - Matrices de Box Behnken
- Matrices d'expériences hybrides

Domaine expérimental cubique :

- Matrices d'expériences de Box Behnken
- Matrices d'expériences composites
- Hoke D6

i- Points au centre du domaine

Il est toujours nécessaire dans l'étude des surfaces de réponses de réaliser des expériences au centre du domaine qui permettront de :

- Avoir certaines propriétés comme l'orthogonalité, l'isovariance par rotation, la précision uniformeetc
- Obtenir une information sur la variabilité de la réponse expérimentale (estimation de la variance expérimentale)
- Tester la validité du modèle postulé [13].

j- Isovariance par rotation

La fonction de variance dépend des coordonnées du point pour lequel la valeur de la réponse est calculée. Nous ne pouvons pas comparer les valeurs calculées au point A et au point B si les variances en ces points sont différentes.

Une première approche consiste à rendre l'erreur de prédiction identique pour tous les points situés à égale distance du centre du domaine, c'est-à-dire rendre la fonction de variance indépendante de l'orientation.

Cette propriété appelée isovariance par rotation est très importante.

CHAPITRE II
TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1. INTRODUCTION

Cette partie consiste à décrire les différentes techniques expérimentales utilisées afin de simuler la formation du dépôt généré par l'incompatibilité des eaux de gisement et des eaux d'injection dans les installations et au fond du puits dans l'industrie pétrolière. Les eaux utilisées proviennent du champ TFT et les expériences sont réalisées à pression atmosphérique. Les opérations effectuées pour chaque expérience sont les suivantes :

- Mélange des eaux de gisement et d'injection sous agitation,
- Filtration,
- Séchage du dépôt.

Pour réaliser cette étude, nous avons en premier lieu réalisé un criblage pour déterminer les facteurs influents sur la masse du dépôt parmi les cinq facteurs :

- Température,
- Temps d'agitation,
- Vitesse d'agitation,
- Nature anti-dépôt,
- Rapport : eau de gisement/ (Eau de gisement +Eau d'injection).

Une fois les facteurs réellement influents identifiés, nous utiliserons les surfaces de réponses pour pouvoir déterminer par le calcul la valeur de la réponse étudiée en tout point du domaine expérimental.

Pour atténuer les effets des variables incontrôlables, nous procédons pour chaque plan d'expériences à une randomisation.

II.2. MATERIELS UTILISES

II.2.1. Eaux d'injection et de gisement

Les eaux de gisement et d'injection utilisées proviennent de la région Tin Fouyé Tabankort (TFT) située dans la partie Nord-Ouest du bassin Illizi, à 500km au Sud-est de Hassi-Messaoud. Elles ont été prélevées en Février 2013.

La composition chimique de ces eaux est donnée par le tableau 3 [11]. On observe que l'eau de gisement (eau du TFT-Ordovicien) contient beaucoup d'ions alcalino-terreux (851mg/l de Sr^{2+} , 1051mg/l de Ba^{2+} , 5 408 mg/l de Mg^{2+} , 33 924 mg/l de Ca^{2+} ). Le pH est d'environ 5,4. Par contre, l'eau d'injection (LIAS) est fortement sulfatée (1300 mg/l). Son pH est de 7,3.

Tableau 3 : Composition chimique des eaux de gisement et d'injection utilisées

	Composition		LIAS (TFT622)	Ordovicien (BP CS5)
Cations [mg/l]	Sodium	Na^+	763	39 039
	Potassium	K^+	37	1 779
	Calcium	Ca^{2+}	269	33 924
	Magnesium	Mg^{2+}	64	5 408
	Strontium	Sr^{2+}	3	851
	Fer	Fe^{2+}	0	108
	Baryum	Ba^{2+}	0	1 051
Anions [mg/l]	Bicarbonates	HCO_3^-	204	129
	Carbonates	CO_3^{2-}	0	0
	Sulphates	SO_4^{2-}	1 300	0
	Chlorures	Cl^-	558	140 410

	pH	7,3	5,4
Autres	Extrait sec	4 110	232 810
	Turbidité NTU	2	406

II.2.2. Les inhibiteurs

Le dépôt généré par l'incompatibilité des eaux de gisement et d'injection et déposé en fond de puits et dans les installations de surface affecte la production de pétrole. Pour réduire ces concrétions très dures au niveau des installations de surface, on peut utiliser des inhibiteurs qui modifient la structure du précipité dès le début de sa formation. Dans la première étude (criblage), nous avons utilisé deux inhibiteurs :

L'Inipol AD 325

C'est un inhibiteur de dépôt de nature phosphonate développé pour les circuits d'eau. Il est utilisé pour éviter la précipitation de sels de calcium, de strontium et de baryum en association avec les carbonates et des sulfates, (tableau 4) [10].

Il est particulièrement recommandé pour les lignes de pétrole brut et pour les circuits d'injection d'eau afin de contrôler l'entartrage du tubing, des pompes, des conduites ...

Tableau 4 : Valeurs Indicatives de l'INIPOL.AD 325

Aspect à 25°C	Liquide
Densité à 25°C	1.20
Viscosité à 25°C	10 cps
pH produit pur	1.9
Température de solidification	-6 °C

Le Scaltreat 8246 :

Le CRD ne nous a pas communiqué ses caractéristiques

II.3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le système utilisé (figure 4) pour l'expérimentation comprend :

-Un réacteur en verre de 600 ml muni d'un reflux pour éviter les pertes d'eau a température élevée. L'agitation des eaux est assurée à l'aide d'un barreau magnétique ;

-Un bain marie contenant de l'huile de silicone qui a la propriété d'avoir une très bonne stabilité et une grande capacité calorifique comparée à celle de l'eau. Sa température de solidification est de -50°C et sa température d'ébullition de 200°C ;

- Une plaque chauffante (**Stuart**) munie d'un système pouvant assurer une agitation.

Pour déterminer le degré d'incompatibilité des eaux de gisement et d'injection en présence (ou en absence) d'inhibiteurs, des tests gravimétriques ont été réalisés à pression atmosphérique et à différentes températures. Le flowsheet mis en œuvre (figure 5) comprend les opérations suivantes :

d- Mise en contact intime des eaux

Les expériences de mise en contact sont réalisées dans les conditions suivantes :

❖ Proportion des eaux de gisement

Niveau bas → 40 %

Niveau haut → 80 %

❖ Température

Niveau bas → 40°C

Niveau haut → 80°C



Figure 4 : Photographie du montage réalisé

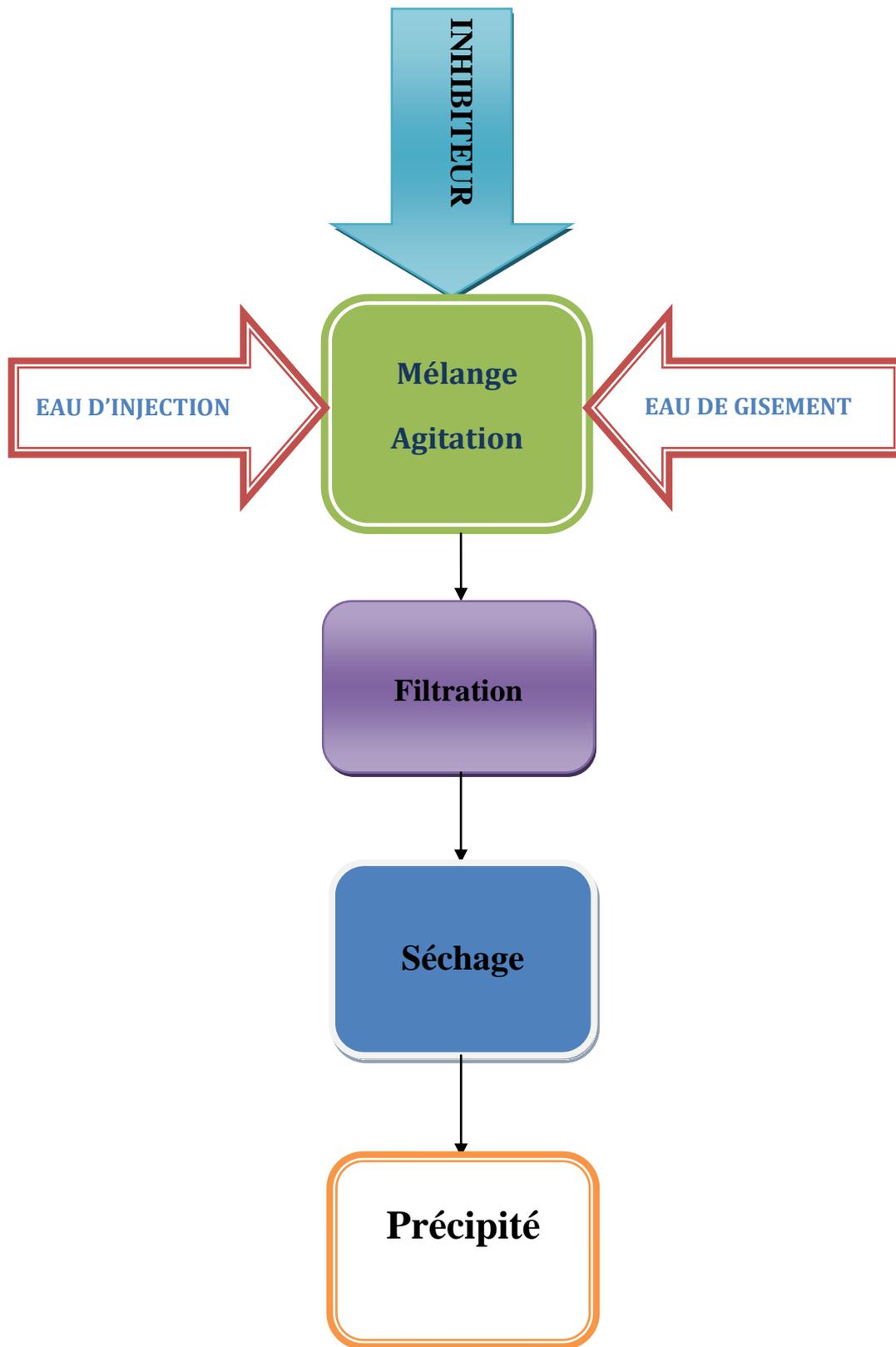


Figure 5: Flowsheet de production du précipité

❖ Temps de contact des eaux

Niveau bas → 45min

Niveau haut → 90min

❖ Vitesse d'agitation

Niveau bas → 200 tr/min

Niveau haut → 400 tr/min

❖ Nature d'inhibiteur

Niveau bas → AD 325

Niveau haut → Scaletreat 8246

NB : Pour chaque expérience, on introduit 1µl de l'un des inhibiteurs dans 100ml de solution.

e- Filtration

La séparation de la phase solide de la phase liquide est réalisée par la filtration sous vide en utilisant du papier filtre.

f- Séchage

L'ensemble (papier filtre + précipité) est porté à une température de 103 ± 1 °C dans une étuve durant 24 h environ jusqu'à ce que son poids devienne constant. La masse du précipité est obtenue en utilisant la relation :

$$m = m_1 - m_2$$

m : masse du précipité.

m_1 : masse totale (papier filtre + dépôt).

m_2 : masse du papier filtre.

CHAPITRE III
CRIBLAGE DE FACTEURS

III. CRIBLAGE DE FACTEURS :

La stratégie de criblage nous permettra d'identifier très rapidement parmi un ensemble de facteurs potentiellement influents ceux qui le sont réellement. Les facteurs que nous soumettrons à cette étude sont ceux qui peuvent éventuellement avoir une influence sur la masse du dépôt généré par l'incompatibilité des eaux de gisement et d'injection. Les paramètres qui peuvent avoir un impact sur cette réponse sont :

- Température.
- Temps de contact.
- Vitesse d'agitation.
- Nature de l'inhibiteur (anti-dépôt).
- Pourcentage en eau de gisement EG.

$$EG = [V_{EG} / (V_{EG} + V_{EI})] * 100$$

V_{EG} : Volume d'eau de gisement.

V_{EI} : Volume d'eau d'injection.

$$V_T = V_{EG} + V_{EI} = 100 \text{ ml}$$

Avec V_T : Volume total.

Dans l'étude de criblage, l'additivité étant une hypothèse forte, on ne détermine que le poids de chacun des facteurs car on considère qu'il n'y a pas d'interaction.

Le modèle mathématique à utiliser sera donc un modèle linéaire du 1^{er} degré :

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k \quad k = 1, 2, 3, \dots, N$$

III.1.1. Matrice d'expériences et plan d'expérimentation

La matrice utilisée est une matrice de Hadamard à 5 facteurs ($k=5$). Le nombre N d'expériences à réaliser doit être un multiple de 4 et satisfaire à la relation $N \geq k+1$. Donc nous devons réaliser 8 expériences.

Comme le nombre de facteurs à étudier n'est pas élevé, nous ne pouvons pas utiliser les outils d'aide à l'interprétation (approche de Lenth, Paréto, normal plot...). Donc la connaissance de la variance expérimentale devient nécessaire. On peut l'obtenir en répétant chaque expérience deux fois. Le nombre total d'expériences à exécuter sera porté à $N=16$.

Notons qu'on ne peut pas utiliser les points au centre pour déterminer la variance expérimentale car l'un des facteurs (nature de l'inhibiteur) est un facteur qualitatif.

La matrice d'expériences utilisée est construite par permutation circulaire à partir de la droite. Elle est donnée par le tableau 5.

La traduction de la matrice d'expériences en variables naturelles donne le plan d'expérimentation consigné dans le tableau 7.

Les résultats des expériences sont consignés dans le tableau 8.

III.1.2. Estimation des poids des facteurs

Les estimations des poids des facteurs b_j , des écart-types et le seuil de signification sont calculés par le logiciel Nemrodw [15].

Pour identifier les effets ayant un poids significatif sur la réponse, nous calculons l'écart-type le t de Student et le seuil de signification (%) pour chaque coefficient. Sachant que le plan a été répété deux fois, la variance expérimentale de la réponse $\text{var}(Y)$ devient accessible. On peut alors calculer:

$$\text{Var}(b_j) = \frac{\text{Var}(y)}{N} \quad ; \quad \sigma(b_j) = \sqrt{\text{Var}(b_j)}$$
$$t_{\text{exp}} = \frac{b_j}{\sigma(b_j)}$$

σ : écart-type.

N : nombre d'expériences.

Connaissant t_{exp} et le nombre de degrés de liberté (ddl), on détermine le seuil de signification (%) en utilisant la loi de Student.

On considère que l'effet est significatif si le seuil de signification est inférieur à 5%.

Tableau 5: Matrice d'expériences

N°Exp	X1	X2	X3	X4	X5
1	1	1	1	-1	1
2	1	1	1	-1	1
3	-1	1	1	1	-1
4	-1	1	1	1	-1
5	-1	-1	1	1	1
6	-1	-1	1	1	1
7	1	-1	-1	1	1
8	1	-1	-1	1	1
9	-1	1	-1	-1	1
10	-1	1	-1	-1	1
11	1	-1	1	-1	-1
12	1	-1	1	-1	-1
13	1	1	-1	1	-1
14	1	1	-1	1	-1
15	-1	-1	-1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1	-1

Les niveaux des facteurs choisis pour réaliser cette étude sont donnés par le tableau 6:

Tableau 6 : Conditions opératoires

Facteurs	Symboles	Niveau (-1)	Niveau (+1)
U ₁ Température (°C)	T	40	80
U ₂ Temps de contact (min)	ta	45	90
U ₃ Vitesse d'agitation (tr/min)	Va	200	400

U ₄ Nature inhibiteur	Nin	AD 325	Scaletreat 8246
U ₅ %Eau de gisement (%)	EG	40	80

Tableau 7 : Plan d'expérimentation

N°Exp	T °C	ta min	Va tr/min	Nin	EG %
1	80	90	400	AD 325	80
2	80	90	400	AD 325	80
3	40	90	400	Scaletreat 8246	40
4	40	90	400	Scaletreat 8246	40
5	40	45	400	Scaletreat 8246	80
6	40	45	400	Scaletreat 8246	80
7	80	45	200	Scaletreat 8246	80
8	80	45	200	Scaletreat 8246	80
9	40	90	200	AD 325	80
10	40	90	200	AD 325	80
11	80	45	400	AD 325	40
12	80	45	400	AD 325	40
13	80	90	200	Scaletreat 8246	40
14	80	90	200	Scaletreat 8246	40

15	40	45	200	AD 325	40
16	40	45	200	AD 325	40

Tableau 8 : Résultats des expériences (Criblage).

N° Expérience	Masse dépôt (g)	N° Expérience	Masse dépôt (g)
1	1,29	9	1,39
2	1,60	10	1,42
3	0,95	11	0,87
4	0,99	12	0,86
5	1,63	13	1,30
6	1,61	14	0,94
7	1,61	15	0,73
8	1,50	16	0,74

III.1.3. Interprétation des résultats:

Le tableau 9 et la figure 6 ci-dessous montrent que les facteurs qui ont un poids significatif sur la masse de dépôt formé (ayant un seuil de signification inférieur à 5%) sont les suivants :

- eau de gisement noté (b5).
- nature inhibiteur noté (b4).

On observe que les poids de ces deux facteurs sont positifs ; cela veut dire que la réponse augmente pour chacun de ces paramètres quand on passe du niveau bas au niveau haut.

Tableau 9 : Estimations et statistiques des coefficients

Ecart Type de la réponse	0.121
R^2	0.913
R_A^2	0.870
Nombre de degrés de liberté	10

Nom	Coefficient	F.Inflation	Ecart-Type	t.exp.	Signif. %
b0	1.214		0.030	39.98	< 0.01 ***
b1	0.032	1.00	0.030	1.05	31.9
b2	0.021	1.00	0.030	0.68	51.3
b3	0.011	1.00	0.030	0.35	73.4
b4	0.102	1.00	0.030	3.35	0.732 **
b5	0.292	1.00	0.030	9.61	< 0.01 ***

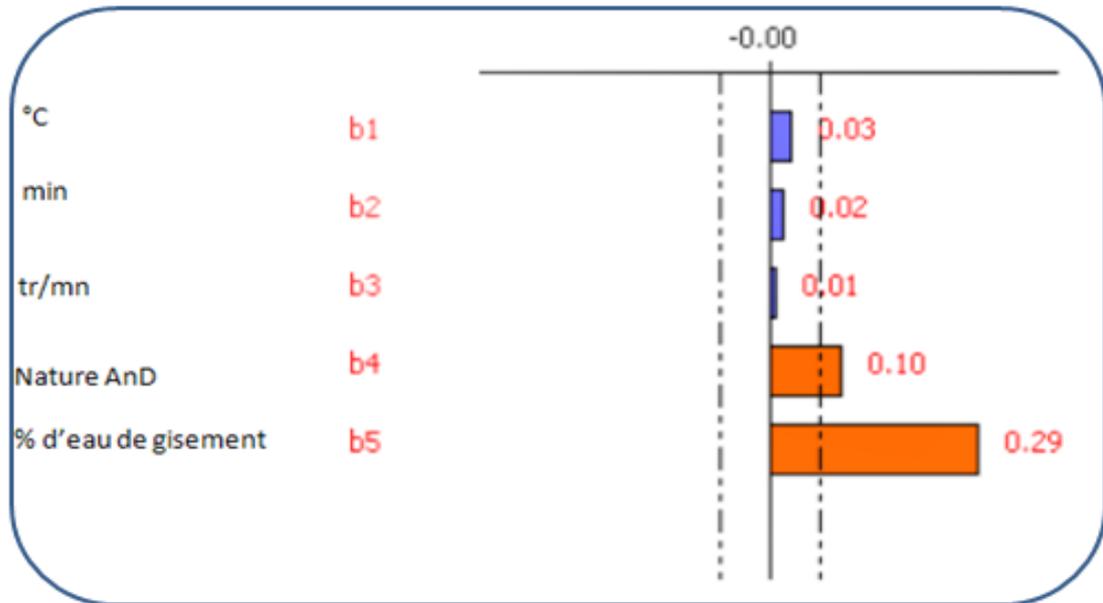


Figure 6 : Etude graphique des effets de la réponse

Conclusion :

Cette étude montre que la masse du dépôt augmente quand la proportion en eau de gisement passe de 40 à 80% et que l'anti-dépôt le plus efficace est l'AD 325. Les autres facteurs (Température, temps de contact et Vitesse d'agitation) ne présentent pas d'influence significative sur la réponse. Ces résultats confirment ceux trouvés par Hamlat [16].

CHAPITRE IV

ETUDE QUANTITATIVE DES SURFACES DE REPONSE

IV.1. PREPARATION DE L'EXPERIMENTATION

IV.1.1. Mise en place de la stratégie

L'étude des surfaces de réponse permet de calculer en n'importe quel point du domaine expérimental la valeur de la réponse avec une incertitude qui ne serait pas supérieure à celle qu'on obtiendrait si on faisait l'expérience en ce point.

Dans cette étude, les facteurs à prendre en compte sont les suivants :

- Le pourcentage en eau de gisement identifié comme étant un facteur influent dans l'étude du criblage.
- La concentration en anti-dépôt AD325. Nous avons montré précédemment que cet inhibiteur est plus efficace que le Scaletreat8246

- La température. Bien que le criblage de facteurs ait montré que ce paramètre n'a pas d'influence sur la masse de dépôt, ce facteur a été introduit car il a été montré [14] qu'il avait un impact sur la réponse dans un domaine expérimental différent de celui que nous avons utilisé dans l'étude du criblage. Comme le domaine expérimental utilisé dans cette seconde partie (surface de réponse) est un peu plus large, nous préférons en tenir compte.

c- Modèle mathématique

Le modèle mathématique postulé est un modèle polynomial du second degré :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3$$

Les coefficients du modèle sont estimés en utilisant les moindres carrés. L'analyse de la variance permettra de valider le modèle postulé. Les outils d'aide à l'interprétation (analyse canonique, chemin optimal), nous permettront d'accéder aux meilleures conditions expérimentales pour minimiser la masse du dépôt.

d- Matrice d'expérience et plan d'expérimentation

Les niveaux des facteurs sont consignés dans le tableau 11. La matrice d'expérience choisie est une matrice composite centrée sphérique (représentation normale).

Le nombre d'expériences N à réaliser est donné par la relation :

$$N = N_f + N_\alpha + N_0$$

N_f : nombre d'expériences du plan factoriel complet 2^k

N_α : nombre d'expériences sur les axes (deux par axe)

N_0 : nombre de points au centre.

Le nombre de facteurs à étudier étant $k = 3$, nous aurons :

$$N_f = 2^3 = 8 \text{ expériences}$$

$$N_\alpha = 2 \cdot 3 = 6 \text{ expériences}$$

Pour respecter l'isovariance par rotation, on prend $\alpha = (Nf)^{1/4}$ où α est la distance entre le centre du domaine et le point étoile \rightarrow dans notre cas $\alpha = 1,6817$.

Le nombre minimum de points au centre conseillé est de trois (3). Nous avons réalisé cinq (5). Nous avons complété ces 19 expériences, $(8+6+5=19)$ par quatre autres (points tests) qui nous permettront de tester le modèle mathématique postulé en des points particuliers du domaine expérimental d'intérêt. Ainsi, nous obtenons un ensemble de 23 expériences dont la matrice d'expériences est donnée par le tableau 10.

Tableau 10 : Matrice d'expérience.

	X1	X2	X3
1	-1.00000	-1.00000	-1.00000
2	1.00000	-1.00000	-1.00000
3	-1.00000	1.00000	-1.00000
4	1.00000	1.00000	-1.00000
5	-1.00000	-1.00000	1.00000
6	1.00000	-1.00000	1.00000
7	-1.00000	1.00000	1.00000
8	1.00000	1.00000	1.00000

9	-1.68179	0.00000	0.00000
10	1.68179	0.00000	0.00000
11	0.00000	-1.68179	0.00000
12	0.00000	1.68179	0.00000
13	0.00000	0.00000	-1.68179
14	0.00000	0.00000	1.68179
15	0.00000	0.00000	0.00000
16	0.00000	0.00000	0.00000
17	0.00000	0.00000	0.00000
18	0.00000	0.00000	0.00000
19	0.00000	0.00000	0.00000
20	-0.70711	-0.40825	-0.28868
21	0.70711	-0.40825	-0.28868
22	0.00000	0.81650	-0.28868
23	0.00000	0.00000	0.86603

Tableau 11 : Domaine de variation de chaque facteur : Conditions opératoires

Facteurs	Centre	Pas	Niveau (-1)	Niveau (+1)
U1 : Température (°C)	60	20	40	80
U2 : [Anti-dépôt] (micro L)	1	0,6	0,4	1,6

U3 : Eau de gisement (%)

60

20

40

80

En tenant compte du domaine de variation de chaque facteur (tableau11), nous pouvons construire le plan d'expérimentation (tableau 12)

Tableau 12 : Plan d'expérimentations.

N°Exp	Rand	Température	[Anti-dépôt]	% Eau gisement
		°C	microL	%
1	11	40.0	0.4	40
2	19	80.0	0.4	40
3	3	40.0	1.6	40
4	20	80.0	1.6	40

5	10	40.0	0.4	80
6	16	80.0	0.4	80
7	8	40.0	1.6	80
8	14	80.0	1.6	80
9	18	26.4	1.0	60
10	6	93.6	1.0	60
11	4	60.0	-0.0	60
12	13	60.0	2.0	60
13	5	60.0	1.0	30
14	15	60.0	1.0	90
15	1	60.0	1.0	60
16	2	60.0	1.0	60
17	9	60.0	1.0	60
18	21	60.0	1.0	60
19	12	60.0	1.0	60
20	23	45.9	0.8	50
21	17	74.1	0.8	50
22	22	60.0	1.5	50
23	7	60.0	1.0	80

Pour les deux facteurs non influents qui sont: la vitesse d'agitation et le temps de contact, nous allons prendre leurs valeurs minimales pour des raisons économiques soit, la vitesse d'agitation a 200 tr/min et 45 min pour le temps de contact.

IV.1.2. Qualité de la prédiction

IV.1.3. Fonction de variance

Dans l'étude des surfaces de réponse, il est inutile de faire une interprétation des coefficients du modèle. Il suffit de valider le modèle mathématique postulé et de vérifier que ce modèle représente bien le phénomène dans le domaine expérimental d'intérêt pour

l'utiliser afin de prédire en tout point de ce domaine la valeur de la réponse étudiée. La qualité de la prévision est représentée par la fonction de la variance qui est indépendante de la valeur des coefficients du modèle et donc des résultats des expériences.

La fonction de la variance au point A dépend seulement des coordonnées du point A, de la matrice d'expériences et du modèle postulé.

$$\text{Var}(Y_A) = d_A \sigma^2$$

Y_A : valeur de la réponse au point A

d_A : fonction de la variance au point A

σ^2 : variance de l'erreur expérimentale

$$d_A = X_A^t (X_A^t X_A)^{-1} X_A$$

X_A : matrice du modèle au point A

Pour obtenir une précision de qualité, la fonction de variance maximale doit être inférieure ou voisine de l'unité.

$$d_{\max} \leq 1.$$

La connaissance de la valeur de d_{\max} permet de juger l'opportunité de réaliser l'expérimentation. C'est un critère a priori de qualité.

Dans notre cas, on trouve $d_{\max} = 0,67$. Nous pourrions donc passer à l'exécution des expériences.

IV.1.4. Isovariance par rotation

Comme la fonction de variance dépend des coordonnées du point considéré, nous ne pourrions pas comparer les valeurs calculées de la réponse au point A et au point B si les variances en ces points sont différentes.

On peut rendre l'erreur de prédiction identique pour tous les points situés à égale distance du centre du domaine. Ainsi, la fonction de variance devient indépendante de l'orientation. Cette propriété appelée isovariance par rotation est assurée dans le cas de notre étude comme le montre la figure 7.

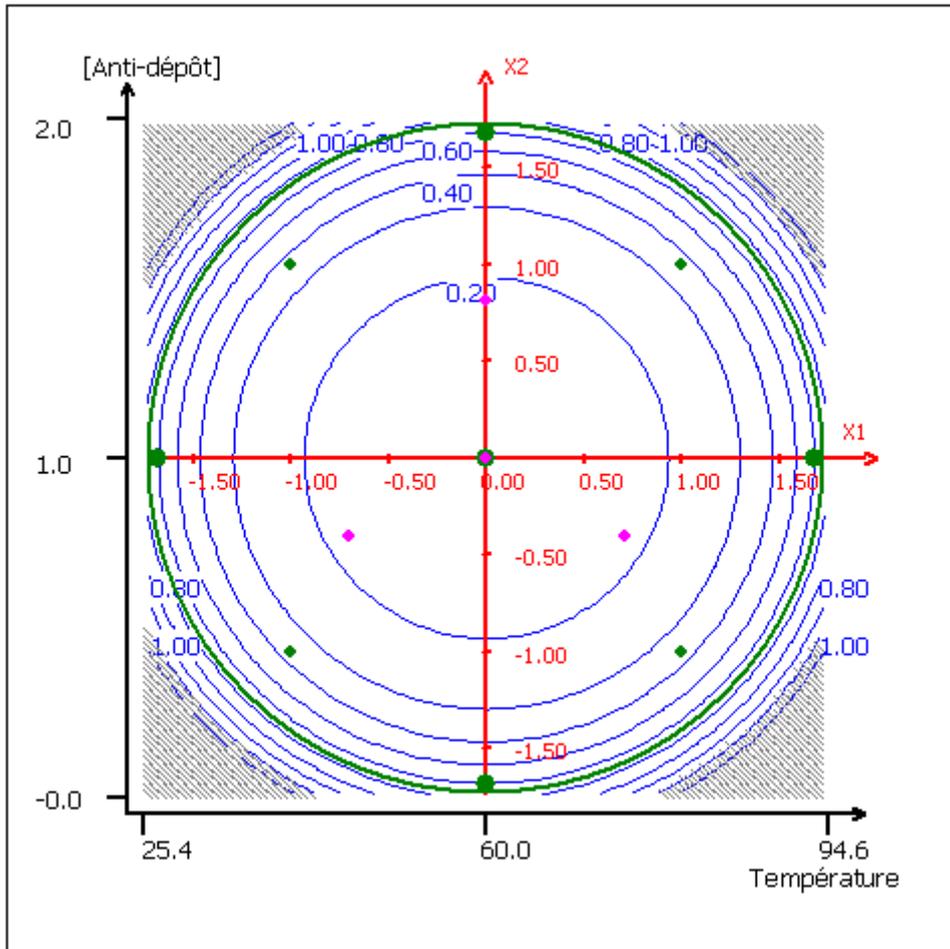


Figure 7 : Variation de la fonction de variance - dans le plan : Température, [Anti-dépôt]

FACTEURS FIXES : % Eau de gisement = 60 %

IV.2. EXPERIMENTATION

La valeur maximale de la fonction de variance d_{\max} étant inférieure à l'unité et l'isovariance par rotation assurée, nous pouvons réaliser l'expérimentation.

Les résultats des expériences sont donnés par le tableau 13

Tableau 13 : Résultats des expériences –Surface de réponse-

N°expériences	Masse du dépôt	N°expérience	Masse du dépôt	N°expérience	Masse du dépôt
---------------	----------------	--------------	----------------	--------------	----------------

1	0,83	9	1,31	17	1,06
2	0,77	10	1,42	18	0,97
3	0,73	11	1,44	19	1,21
4	0,68	12	0,95	20	0,96
5	1,73	13	0,43	21	0,89
6	1,67	14	1,74	22	0,84
7	1,44	15	1,20	23	1,59
8	1,57	16	1,14		

IV.3. INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.3.1. Equation du modèle sans les points tests

Les coefficients du modèle mathématique sont donnés par le tableau 14. Les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du coefficient de détermination ajusté R_A^2 ($R^2 = 0,97$ et $R_A^2 = 0,94$) montrent que nous obtenons un bon ajustement.

Tableau 14 : Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1: Masse du dépôt

Ecart Type de la réponse	0.093
R^2	0.971
R_A^2	0.941
Nombre de degrés de liberté	9

Nom	Coefficient	F.Inflation	Ecart-Type	t.exp.	Signif. %
b0	1.118		0.041	26.94	< 0.01 ***
b1	0.011	1.00	0.025	0.42	68.3
b2	-0.103	1.00	0.025	-4.09	0.272 **
b3	0.410	1.00	0.025	16.32	< 0.01 ***
b1-1	0.079	1.04	0.025	3.13	1.21 *
b2-2	0.019	1.04	0.025	0.74	47.7
b3-3	-0.020	1.04	0.025	-0.80	44.2
b1-2	0.025	1.00	0.033	0.76	46.6
b1-3	0.022	1.00	0.033	0.69	51.1
b2-3	-0.025	1.00	0.033	-0.76	46.6

Les relations permettant le calcul de ces coefficients sont les suivants :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{cal} - Y_{exp})^2}{\sum(Y_{exp} - Y_{moy})^2}$$

$$R_A^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{cal} - Y_{exp})^2 / (N - P)}{\sum(Y_{exp} - Y_{moy})^2 / (N - 1)}$$

Pour valider le modèle, nous avons réalisé des expériences en des points tests de telle façon qu'ils soient les plus éloignés possible des points expérimentaux dont les résultats ont servi à calculer les estimations des coefficients du modèle. Les tests statistiques appliqués à la

différence entre Y_{cal} et Y_{exp} ne permettent pas de dire que les points tests sont mal représentés par le modèle, (tableau 15).

La variation de la différence ($Y_{cal} - Y_{exp}$) est calculée en utilisant la relation suivante :

$$\text{Var [différence]} = [1 + d \text{ (au point)}] \sigma^2$$

Tableau 15 : Résidus : réponse Y1 : Masse du dépôt

N°Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	t.exp.	dU	Nombre de degrés de liberté	Ecart-Type	Signif. %
20	0.960	1.083	-0.123	-1.216	0.193	9	0.101	25.5
21	0.890	1.075	-0.185	-1.821	0.193	9	0.101	10.2
22	0.840	0.932	-0.092	-0.906	0.193	9	0.101	38.9
23	1.590	1.458	0.132	1.303	0.193	9	0.101	22.5

IV.3.2. Equation affinée du modèle

Le modèle mathématique est affiné en intégrant dans le calcul des coefficients du modèle les valeurs de la réponse obtenues aux points tests. Les nouvelles estimations du modèle sont données par le tableau 16.

Tableau 16 : Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1 : Masse du dépôt

Ecart Type de la réponse	0.104
R2	0.953
R2A	0.921
Nombre de degrés de liberté	13

Nom	Coefficient	F.Inflation	Ecart-Type	t.exp.	Signif. %
b0	1.090		0.039	27.98	< 0.01 ***
b1	0.008	1.00	0.027	0.28	78.1
b2	-0.099	1.00	0.027	-3.64	0.299 **
b3	0.426	1.00	0.027	15.58	< 0.01 ***
b1-1	0.082	1.02	0.027	3.03	0.962 **
b2-2	0.024	1.02	0.027	0.90	38.7
b3-3	-0.005	1.02	0.027	-0.17	86.8
b1-2	0.027	1.00	0.037	0.74	47.3
b1-3	0.024	1.00	0.037	0.65	52.7
b2-3	-0.027	1.00	0.037	-0.73	48.1

c) Analyse des résidus

Sur la figure 8 apparaissent les valeurs des résidus en fonction des réponses prédites. Nous considérons que rien de particulier n'apparaît sur ce graphique et que les résidus sont bien répartis au hasard.

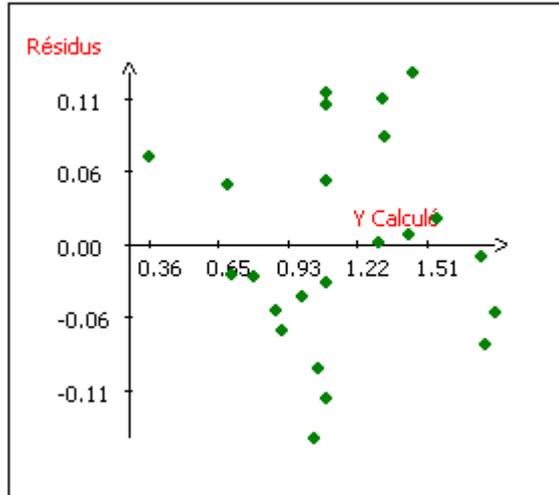


Figure 8: Résidus en fonction des réponses prédites.

La faible valeur des résidus qui est de l'ordre de l'erreur expérimentale est confirmée par le Normal Plot ou droite de Henry (figure 9). En effet, les résidus semblent alignés sur une droite. Ils respectent l'hypothèse de normalité.

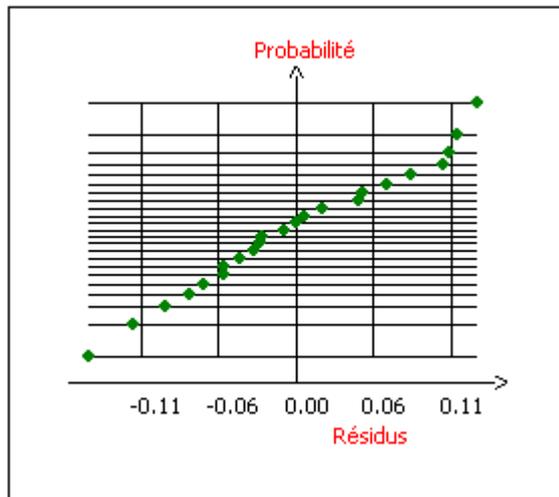


Figure 9 : Normal Plot

d) Analyse de la variance

Les résultats de l'analyse de la variance sont regroupés dans le tableau 17. Le modèle représente bien le phénomène si les résidus qui correspondent à la différence entre la valeur expérimentale et la valeur calculée ne sont dus qu'à l'erreur expérimentale.

$$r_i = Y_{\text{exp},i} - Y_{\text{cal},i} = e_i$$

Tableau 17 : Analyse de la variance : réponse Y1 : Masse du dépôt

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	2.8981	9	0.3220	29.5099	< 0.01 ***
Résidus	0.1419	13	0.0109		
Validité	0.1009	9	0.0112	1.0963	50.3
Erreur	0.0409	4	0.0102		
Total	3.0400	22			

On peut accéder à la variance expérimentale si l'hypothèse précédente est vérifiée en calculant la somme des carrés des écarts (SCE) et en la divisant par (N-p) pour obtenir la moyenne de la somme des carrés des écarts (MSCE)

$$SCE = \sum (Y_{\text{exp},i} - Y_{\text{cal},i})^2 = 0,1419$$

$$MSCE = \frac{SCE}{N-P} = \frac{0,1419}{13} = 0,0109$$

N est le nombre d'expérience et P le nombre de coefficients du modèle.

Nous pouvons vérifier si cette hypothèse est acceptable en comparant ces résidus à l'erreur expérimentale.

Nous pouvons à partir de l'ensemble des points expérimentaux obtenir deux sortes d'informations indépendantes :

Aux points répétés :

L'expérience a été répétée 4 fois au centre du domaine. Comme la dispersion des résultats obtenus ne dépend pas du modèle mais seulement de l'erreur expérimentale, on peut donc avoir une estimation de la variance expérimentale à partir de ces résultats.

$$S^2 = [\sum (Y_{0,i} - \bar{Y}_0)^2] / (N_0 - 1) = \frac{0,0409}{4} = 0,0102$$

Où \bar{Y}_0 est la moyenne des valeurs de la réponse au centre du domaine et N_0 le nombre d'expériences en ce point.

Aux autres points :

La somme des carrés des écarts calculée précédemment peut être scindée en deux parties.

$$SCE = SCE1 + SCE2$$

SCE1 : Somme des carrés des écarts pour les points au centre.

SCE2 : somme des carrés des écarts pour les autres points

$$SCE2 = SCE - SCE1 = 0,1419 - 0,0409 = 0,1010$$

Si l'hypothèse est vérifiée, on peut obtenir une autre estimation de la variance expérimentale en utilisant la relation: $SCE2 / [(N-P) - (N_0 - 1)]$.

Nous disposons donc de deux estimations indépendantes de la variance :

$$MSCE1 = SCE1 / (N_0 - 1) = 0,0102 \quad \text{avec} \quad \text{ddl} = 4$$

$$MSCE2 = SCE2 / [(N - P) - (N_0 - 1)] = 0,01010 / (13-4) = 0,0112 \quad \text{avec} \quad \text{ddl} = 9.$$

MSCE1 et MSCE2 sont deux estimations indépendantes d'une même variance.

$$MSCE2 / MSCE1 = 0,0112 / 0,0102 = 1,096$$

Le test statistique montre que la probabilité pour que ces deux valeurs représentent une même variance est de 50,30%. Le modèle peut donc être validé.

- Représentativité du modèle :

Le modèle étant validé, nous pouvons prendre comme variance expérimentale

$$MSCE = (SCE1 + SCE2) / (N - P) = 0,0109 \quad \text{avec} \quad \text{ddl} = 13.$$

Le modèle apporte-t-il quelque chose ? Pour le savoir calculons :

$$SCR = \sum (Y_{\text{cal},i} - Y_{\text{moy}})^2 = 2,8981$$

$$MSCR = SCR / (P-1) = 2,8981/9 = 0,3220$$

Si la variance ($Y_{\text{cal},i} - Y_{\text{moyen}}$) est de l'ordre de l'erreur expérimentale, on peut écrire

$$E(\text{MSCR}) = \sigma^2 \text{ avec ddl} = 9$$

E (MSCR) : Expérience mathématique.

On peut comparer E (MSCR) avec l'estimation de la variance expérimentale calculée plus haut.

Le test statistique (loi F) permettant de voir si les deux estimations indépendantes MSCR et MSCE représentent la même variance conduit à une probabilité inférieure à 0,1%. Donc la variation de la réponse calculée n'est pas due à l'erreur expérimentale.

Le modèle postulé étant déjà validé, il peut être maintenant utilisé pour calculer la valeur de la réponse en tout points du domaine expérimental.

IV.3-3) Conditions opératoires pour minimiser la masse de dépôt :

Comme il est difficile d'interpréter un modèle mathématique contenant beaucoup de coefficients (10 dans notre cas), nous allons faire appel à l'un des outils d'aide à l'interprétation :

- L'analyse Canonique :

Le modèle mathématique adopté est le suivant :

$$Y = 1,090 + 0,008X_1 - 0,099 X_2 + 0,426 X_3 + 0,082 X_1^2 + 0,024 X_2^2 - 0,005 X_3^2 + 0,027X_1 X_2 + 0,024X_1 X_3 - 0,027 X_2 X_3.$$

Mettons ce polynôme sous la forme matricielle suivante :

$$Y = b_0 + X^t b + X^t B X$$

X : vecteur des coordonnées d'un point.

b : vecteur des coefficients des termes du 1^{er} degré.

B : matrice des termes rectangles et carrés.

b₀ : valeur de la réponse à l'origine du repère initial.

On obtiendra :

$$Y = 1,090 + (X_1 \ X_2 \ X_3) \begin{pmatrix} 0,008 \\ -0,099 \\ 0,426 \end{pmatrix} + (X_1 \ X_2 \ X_3) \begin{pmatrix} 0,0820 & 0,0135 & 0,0120 \\ 0,0135 & 0,0240 & -0,0135 \\ 0,0120 & -0,0135 & -0,0050 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix}$$

Les coordonnées du point stationnaire S sont calculées à l'aide de l'équation :

$$X_s = -\frac{1}{2} B^{-1} b$$

$$\text{On trouve : } X_1 = 3,145 \quad X_2 = 9,556 \quad X_3 = 10,448$$

$$\text{La distance OS est } OS = (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2)^{1/2} = 14,50$$

Le point stationnaire est situé en dehors du domaine d'étude car la distance OS est supérieure au rayon du domaine expérimental (1,68). Pour utiliser l'analyse canonique, nous devons faire une translation pour ramener le point stationnaire S à l'intérieur du domaine (point S').

Après translation, la fonction de la réponse peut donc être réécrite en fonction des axes principaux Zi de la conique.

$$Y = 1.088 + 0.000 Z_1 - 0.267 Z_2 + 0.345 Z_3 \\ + 0.086 Z_1^2 + 0.028 Z_2^2 - 0.013 Z_3^2$$

Les équations permettant de passer des axes Zi aux axes Xi sont :

$$X_1 = 0.98 Z_1 - 0.13 Z_2 - 0.17 Z_3 - 0.178$$

$$X_2 = 0.19 Z_1 + 0.90 Z_2 + 0.39 Z_3 - 0.035$$

$$X_3 = 0.10 Z_1 - 0.41 Z_2 + 0.90 Z_3 - 0.018$$

Les coefficients de l'équation canonique sont :

$$a_1 = 0,000 \quad a_2 = - 0,267 \quad a_3 = 0,345$$

$$a_{11} = 0,086 \quad a_{22} = 0,028 \quad a_{33} = - 0,013$$

Comme a_1 est nul et $a_{11} = + 0,086$, tout déplacement le long de Z_1 dans le sens positif ou négatif entraîne une augmentation de la valeur de la réponse. Pour obtenir la masse de dépôt la plus petite, il est nécessaire de prendre $Z_1 = 0$.

Les équations de passage de Z_i à X_i se simplifient :

$$X_1 = - 0.13 Z_2 - 0.17 Z_3 - 0.178$$

$$X_2 = 0.90 Z_2 + 0.39 Z_3 - 0.035$$

$$X_3 = - 0.41 Z_2 + 0.90 Z_3 - 0.018$$

Nous pouvons considérer que les coefficients $a_{22} = 0,028$ et $a_{33} = - 0,013$ sont faibles. Ils peuvent donc être négligés.

L'équation canonique de la réponse devient :

$$\rightarrow Y = 1.088 - 0.267 Z_2 + 0.345 Z_3$$

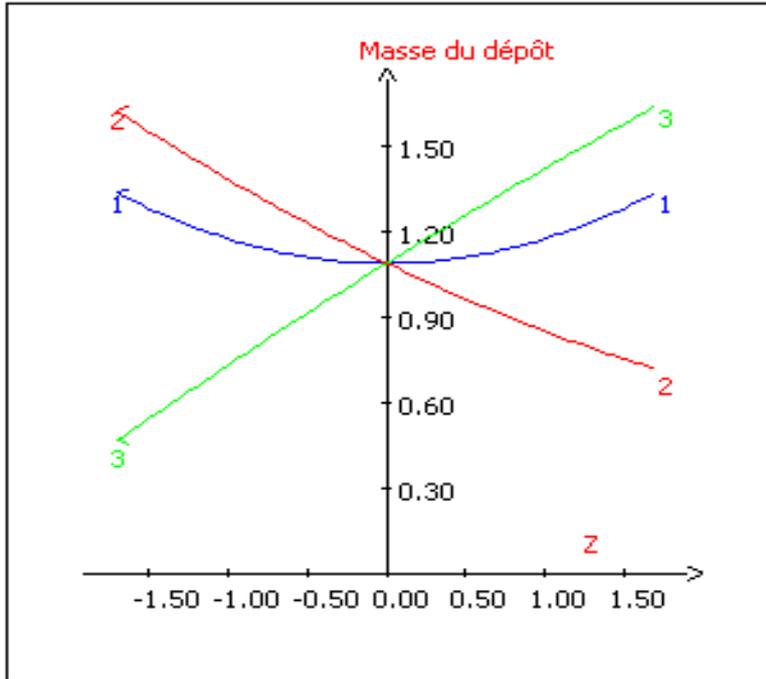
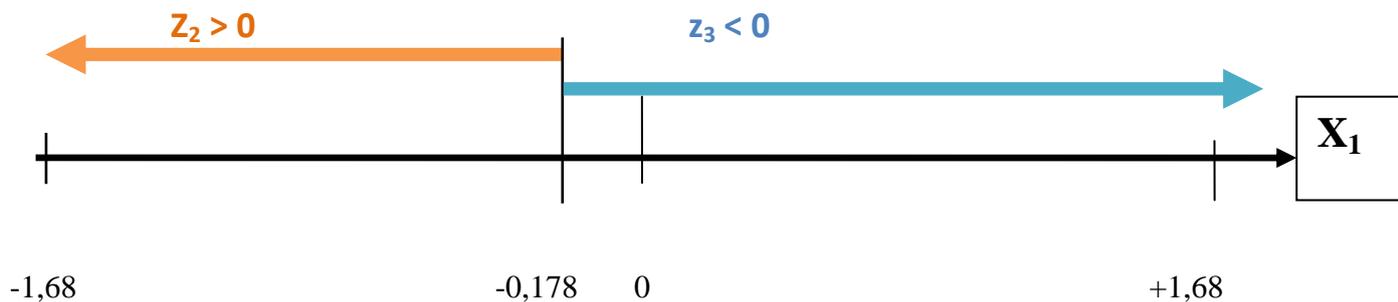
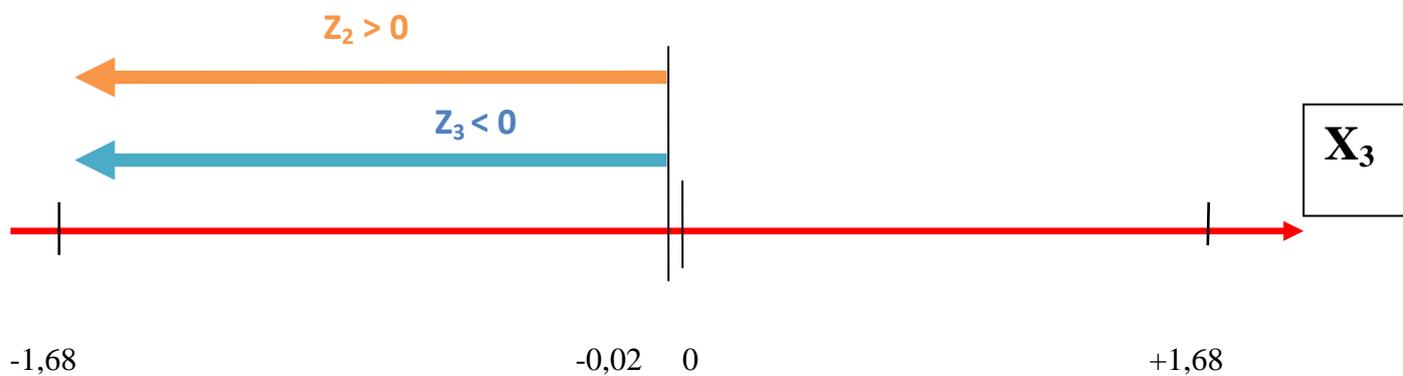
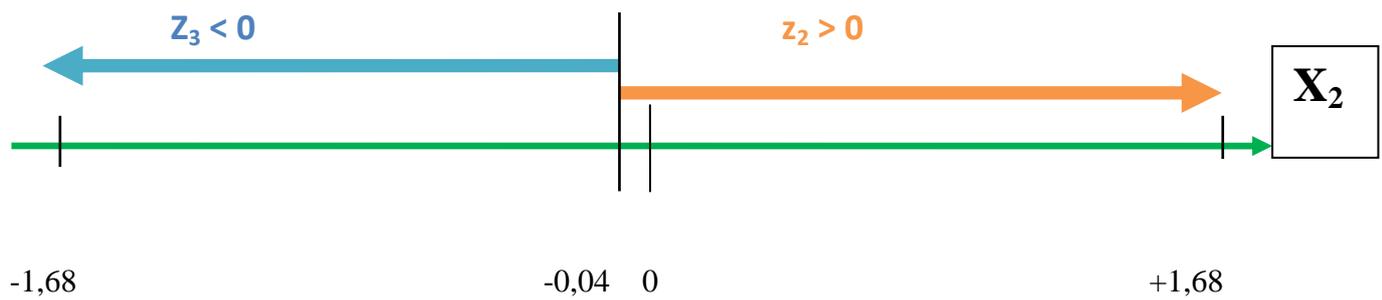


Figure 10 : Analyse canonique par rapport au point stationnaire après translation

Courbure de l'équation canonique : réponse Y1 : Masse de dépôt

Pour diminuer la valeur de la réponse, il est nécessaire de se déplacer dans le sens positif le long de Z_2 et dans le sens négatif le long de Z_3 . On peut maintenant chercher dans quel sens évolue X_1 , X_2 et X_3 pour ces déplacements le long de Z_2 et Z_3 à partir du point (S') en utilisant les équations permettant le passage de Z_i à X_i .





On observe que :

- La diminution de X_1 quand on se déplace sur l'axe Z_2 suivant le sens positif est contre balancée par le déplacement sur l'axe Z_3 dans le sens négatif.
- L'augmentation de X_2 quand on se déplace sur l'axe Z_2 suivant le sens positif est contrariée par le déplacement sur l'axe Z_3 dans le sens négatif.
- Les déplacements sur l'axe Z_2 dans le sens positif et sur l'axe Z_3 dans le sens négatif diminuent la valeur de X_3 . Donc on peut prendre $X_3 = -1,68$ c'est-à-dire $R = 0,3$.
- La connaissance de la valeur optimale de X_3 permet d'obtenir les surfaces de réponses (figure 11) en fonction de X_1 et X_2 .

Cette figure permet de trouver les valeurs minimale ($Y = 0,35 \pm 0,18$ g) et de dégager les conditions optimales qui sont :

$$T = 60 \text{ à } 66^\circ\text{C}$$

$$\text{AnD} = 1,1 \text{ à } 1,2 \mu\text{l}$$

$$\text{EG} = 30\%$$

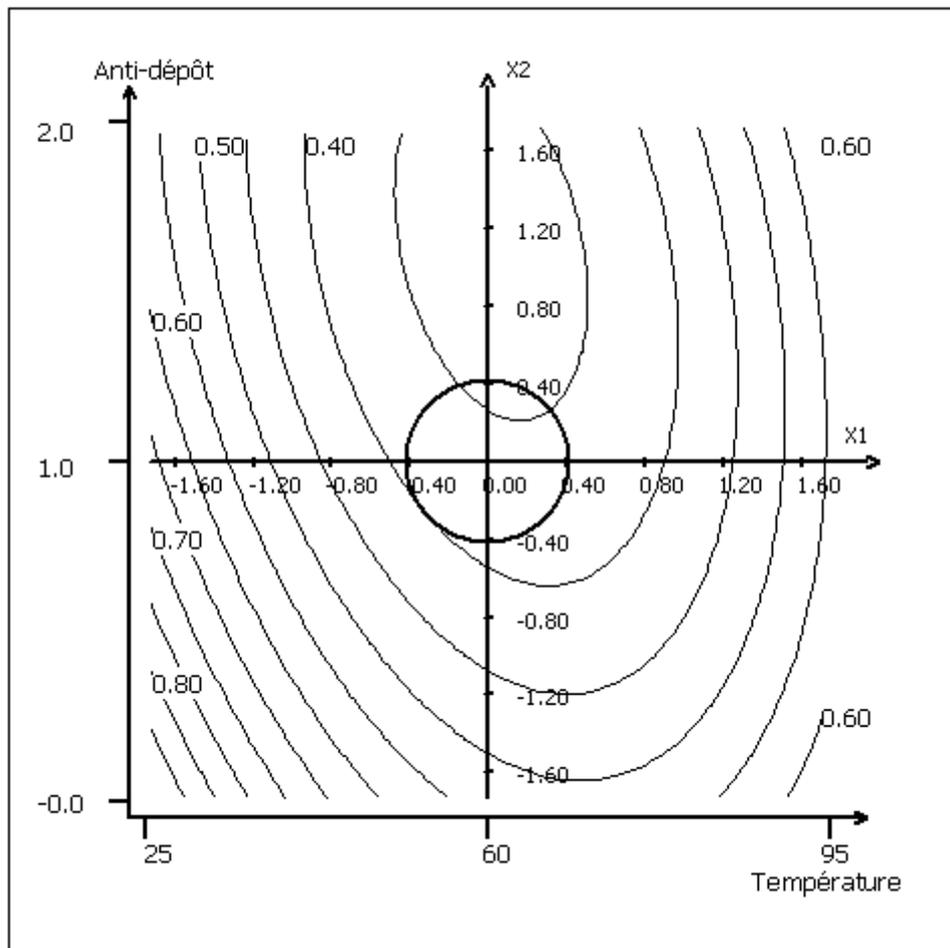


Figure 11 : Variation de la réponse - Masse du dépôt dans le plan : Température, Anti-dépôt

FACTEURS FIXES : Eau de gisement = 30 %

Pour confirmer ces résultats, nous avons réalisé quatre expériences dans les conditions optimales trouvées (Température 62°C , $[\text{AD } 325] = 1,2 \mu\text{l}$ et $\text{EG} = 30\%$). La masse de dépôt obtenue ($Y = 0,38 \pm 0,02$ g) est en accord avec celle donnée par le modèle.

L'étude du chemin optimal (figure12) pour minimiser la masse de dépôt confirme ces conditions optimales données par l'analyse canonique.

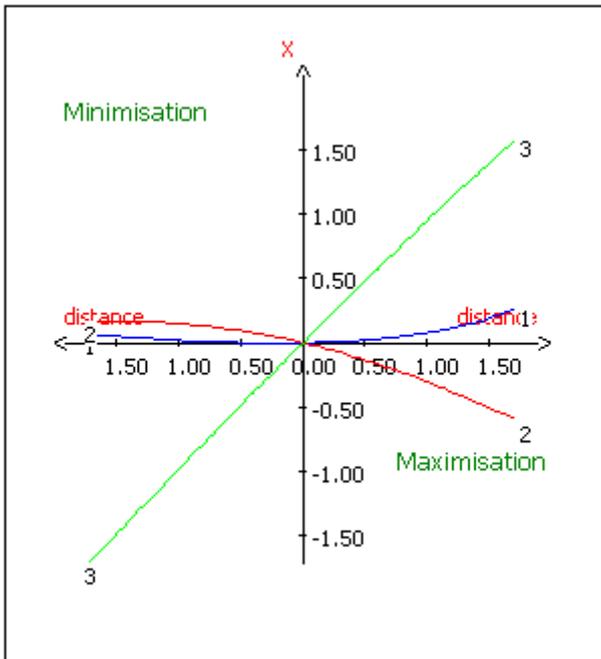


Figure 12 : Etude du chemin optimal pour la réponse : Masse de dépôt

CONCLUSION GENERALE

L'industrie pétrolière se heurte à une multitude de problèmes comme celui des dépôts induits par l'incompatibilité des eaux de gisement et d'injection qui provoquent des perturbations au niveau des installations de surface. Pour étudier la variation de la masse de ce précipité en fonction de divers paramètres, nous avons procédé à un criblage de facteurs suivi d'une optimisation en utilisant les surfaces de réponse.

Pour identifier rapidement les facteurs ayant un poids significatif sur la masse de dépôt formé, nous avons dans le cadre du criblage utilisé une matrice de Hadamard à cinq facteurs.

Les facteurs étudiés sont:

- Température,
- Temps de contact,
- Vitesse d'agitation,
- Nature anti-dépôt,
- Rapport : eau de gisement / (Eau de gisement + Eau d'injection)

Cette étude a montré que seuls le rapport des eaux et la nature de l'anti-dépôt ont un effet significatif sur la formation du précipité. Pourtant non significative, la température a été introduite par précaution dans les surfaces de réponse. Cette décision est motivée par le fait que le domaine expérimental dans cette seconde étude est plus étendu (26-94°C), domaine peu différent de celui où Hamlat [16] a montré que la température a un effet.

Après avoir validé le modèle mathématique en utilisant les points tests et l'analyse de variance, l'analyse canonique nous a permis de déterminer les conditions optimales conduisant à la formation de la masse minimale de dépôt ($0,35 \pm 0,18$ g). Ce résultat confirmé expérimentalement consacre une fois de plus la validité du modèle mathématique mis en place qui peut être utilisé dans tout le domaine expérimental.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] VETTER, O.J & PHILIPS, R.C. (1970). Prediction of deposition of calcium sulfate scale under down hole conditions. J. Petroleum technology, October: 1299.
- [2] VETTER, O.J.; KANDARPA, V. & HAROUKA, A (1982) Prediction of scale problems due to injection of incompatibility waters. J. Petroleum technology. February: 273 – 284.
- [3] KEMA.(1997). PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM NORM I (Radiological Problems with Natural radioactivity in the Non Nuclear Industry). Amsterdam, September 08 – 10.
- [4] Origine et formation des gisements de pétrole, types de pétrole. Samuel.benoit.online.fr
- [5] DELUZARCHE, C. (2006). Comment se forme le pétrole ? Magazine des Sciences. Décembre 2006 : 315
- [6] Cours Industrie Pétrolière, Pétrochimie. Université de Skikda. Auteur inconnu.
- [7] BELAZZOUG, F. (2012). Etude des problèmes des venues d'eau dans les champs d'huile. Thèse de Magister, Université Kasd Merbah Ouargla.
- [8] RENARD, G. (2006) Comment augmenter le taux de récupération du pétrole dans les gisements ? Institut Français De Presse. Mai 2006
- [9] MESSAOUDENE N. (1990). Etude de la formation et de l'inhibition des dépôts de sulfate de baryum dans les champs pétroliers. Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse.
- [10] C.R.D. (2009) Tin Fouyé Tabankourt, La gestion de l'eau. Amélioration du système – production de TFT-Ordovicien. Sonatrach , le 9 avril 2009.
- [11] GOUPY, J. (2006). LES PLANS D'EXPERIENCES, Revue MODULAD,. Numéro 34.
- [12] BOUDISSA, F & KADI, H. (2013).Transfer of phenolic from Olive Mill Wastewater to Olive Cake Oil.journal of the american oil chimists'society.23 january.

[13] RABIER, F. (2007). Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

[14] HAMLAT M.S, FELLAG.H, KADI.H (2003), Precipitate containing norm in the oil industry: modelling and laboratory experiments, Applied Radiation and Isotope. 19 April.

[15] Mathieu D, Nony J,Phan-tan-tui R, (2007), Nemrodw software. LPRAI, Marseille.

[16] HAMLAT, M.S. (2003). Interactions géochimiques et processus de transfert des NORM dans l'industrie pétrolière et gazière. Thèse de Doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.