

N° d'ordre : / Faculté / UMBB / 2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par :

KHARCHI Sofiane

Filière : Hydrocarbures

Option : Forage des puits

Thème

EVALUATION DE L'INHIBITION DU GONFLEMENT DES ARGILES :

APPLICATION AU CHAMP D'AIN SALEH.

Devant le jury :

MELLAK Abderrahmane	Professeur	UMBB	Président
BENYOUNES Khaled	MC (A)	UMBB	Encadreur
BENTRIOU Abdelhak	MC (A)	UMBB	Examineur
HADJADJ Ahmed	MC (A)	UMBB	Examineur
AZRIL Nadjet	MA (A)	UMBB	Examinatrice
BOUMAZA Nadia	MA(A)	UMBB	Examinatrice

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Département : gisements miniers et pétroliers

Filière : Hydrocarbures

Option : Forage des puits

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

EVALUATION DE L'INHIBITION DU GONFLEMENT DES ARGILES :
APPLICATION AU CHAMP D'AIN DALEH.

Présenté par :

KHARCHI Sofiane

Avis favorable de l'encadreur

BENYOUNES KHALED

Avis favorable Du Président du jury :

MELLAK Abderrahmane

REMERCIEMENT

D'abord je tiens à remercier mon dieu "ALLAH", notre créateur pour m'avoir donné la force et le courage pour accomplir ce travail.

Avant tous je tiens à remercier Dr. BENYOUNES Khaled, mon promoteur, pour sa disponibilité, et ses conseils précieux qui m'ont servi pour la réalisation de ce travail, ainsi que ses critiques constructives.

Je présente mes chaleureux remerciements aux enseignants du département gisement miniers et pétroliers pour leurs aides et orientations durant ma formation surtout Pr. MELLAK Abderrahmane et Mr. SAIFI Redha.

J'adresse mes vifs remerciements aux coordinateurs de BASP Mr MAHDJOUBI Yacine et ABDELLI Houria et le Directeur de la recherche SONATRACH CRD Dr. KHODJA Mohamed qu'ont beaucoup aidé durant mes stages pratiques.

Je n'oublierai pas de remercier les membres du jury qui vont m'honorer en acceptant de juger ce travail et leurs collaborations.

J'adresse reconnaissances aux mes amis RIKOUH Abderrahmane, IDIR Hammou, BENBOUDHIAF Marouan et LOUNAS Haroun qu'ils étaient présent pour me soutenir au mes critiques moments.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'aboutissement de ce présent mémoire, trouvent ici l'expression de mes profondes gratitude et respects.

Merci.

Dédicaces

Au nom d'Allah le plus grand merci lui revient de m'avoir guidé vers le droit chemin, de m'avoir aidé tout au long de mes années d'étude.

Je dédie ce modeste travail à ma mère, 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.

À mon père Zharchi Sahraoui. Rien au monde ne pourrait compenser les efforts et les sacrifices que tu as consentis jour et nuit pour mon éducation, mon bien-être et la poursuite de mes études dans des bonnes conditions.

À mes adorable frères Djamel et Mohamed Amine, puisse, ce petit mot t'exprime, mon grand amour pour vous. Je vous souhaite le bonheur dans votre vie.

À ma femme qui a été toujours là pour moi dans les moments difficiles, les mots ne suffisent pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour toi.

À mes chers grands parents symbole de tendresse et d'amour. Ce sont les moindres sentiments que je puisse vous témoigner.

À mes oncles, tantes, cousins et cousines. Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation. Affectueuse reconnaissance.

ZHARCHI Sofiane

Résumé :

En général, l'étude du comportement rhéologique, de filtration et d'inhibition du gonflement des argiles sont d'une importance capitale dans le but d'amener l'opération de forage du puit à terme sans aucun problème. Ces caractéristiques vont permettre de maîtriser les propriétés des fluides de forage à base de polymères. Le choix a été porté sur ce type de fluide pour des raisons environnementales en vue de leur généralisation sur nos sites de forage.

L'objectif de cette étude est l'évaluation du gonflement d'argile, ainsi que la détermination des paramètres optimums afin de diminuer ces problèmes pendant le forage du puits, L'utilisation des réseaux de neurones artificiel pour la modélisation mathématiques afin de prédire des phénomènes physiques.

Mots clés : argile, gonflement, érosion, corrélation, réseaux de neurones artificiels, boue salée saturée, alcalinité, rhéologie, viscosité plastique, yield-point.

Abstract:

Generally, the study of rheological, filtration and shale inhibition, are very important in purpose to accomplish the drilling operation in good ways without problems. The properties listed will permit the knowledge of the biopolymer based drilling fluids. The choice of this type of fluids is due to environment raisons and aims to theirs use on our drilling sites.

The main objective of this study is analyzing failure causes, in addition, the determination of optimum parameters to decrease shale swelling problems while drilling, the use of artificial neural network for the mathematical modeling to predict the physical phenomenon.

Keywords: shale, swelling, erosion, correlation, artificial neural network, saturated salt mud, alkalinity, rheology, plastic viscosity, yield-point.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	i
PARTIE BIBLIOGRAPHIE.....	1
CHAPITRE 01 GENERALITES SUR LES FLUIDES DE FORAGE.....	2
1. Les fluides de forage.....	2
1.1 Définition.....	2
1.2 Les principales fonctions de la boue de forage	3
1.3 Composition des différents types	4
1.3.1 Les fluides à base d'eau.....	5
1.3.2 Les fluides à base d'huile	6
1.3.3 Les fluides de forage gazeux	6
1.4 Propriétés des fluides de forage	7
1.4.1 Densité	8
1.4.2 Rhéologie.....	8
1.4.3 PH	12
1.4.3 Alcalinité	12
1.4.3 Propriétés de filtration des fluides de forage.....	13
1.4.3.1 Filtration statique	14
1.4.3.1 Filtration Dynamique.....	15
CHAPITRE 02 LA RHEOLOGIE DES FLUIDES DE FORAGE	16
2.1. Notion de mouvement laminaire de cisaillement.....	17
2.2. Contrainte de cisaillement	18
2.3. Déformation et vitesse de cisaillement	18
2.4. Equation d'état	19
2.5. La viscosité	20
2.5.1. La viscosité dynamique ou apparente (μ_a)	20
2.5.2. La viscosité cinématique (ν)	20
2.5.3. La viscosité relative, spécifique, intrinsèque	20
2.6. Typologie de l'écoulement	21
2.6.1. Les fluides indépendants du temps	21

2.6.1.1. Les fluides newtoniens.....	22
2.6.1.2. Les fluides non newtoniens	22
2.6.1.2.1. Fluides a contrainte critique	22
2.6.1.2.2. Les fluides sans contrainte critique.....	23
2.6.2. Les fluides dépendants du temps	25
2.6.2.1. Les fluides thixotropies	25
2.6.2.2. Les fluides rhéopexes	26
2.7. Les fluides viscoélastiques	26
2.7.1. Viscoélasticité linéaire	26
2.7.2. Paramètres complexes	28
CHAPITRE 03 LES POLYMERES.....	29
3.1. Définition du polymère	30
3.2. Classification des polymères	30
3. 3. Adsorption des polymères	32
3.4. Les polymères dans le fluide de forage	33
3.4.1. La gomme de xanthane (xanthane)	33
3.4.2. La carboxyméthylcellulose (CMC) et PAC.....	34
3.4.3. Le polyacrylamide partiellement hydrolysé PHPA	35
3.4.4. Amidon	36
3.4.5. Le glycol.	38
3.4.6. Les silicates de sodium	39
3.4.6.1. Mode d'action du système silicate.....	39
CHPITRE 04 LES ARGILES.....	40
4.1 Définition d'argile	41
4.2 Nomenclature et classification	41
4.3 Elements structure	41
4.4 Critères de classification	43
4.5. Classification des minéraux argileux simples	43
4.6. Classification des minéraux argileux interstratifiés	48

4.7. Propriétés des argiles.....	49
4.7.1. Forme et surface spécifique.....	49
4.7.2. Degré d'hydratation	50
4.7.3. Charge des surfaces argileuses.....	50
4.7.4. Capacité d'échange cationique.....	52
CHAPITRE 05 LE PROBLEME DE GONFLEMENT DES ARGILES...	53
5.1 Définition	54
5.2. Additifs utilisés pour inhiber le gonflement et la dispersion des argiles ...	54
5.2.1. Les sels minéraux (KCl, NaCl, CaCl ₂ , ...) et organiques :.....	55
5.2.2. Les sels organiques :	55
5.2.3. Les polymères cationiques, anioniques et non ioniques	66
5.2.4. Autres additifs	56
5.3. Signes indiquant des argiles gonflent	59
5.4. Mesures préventives	60
CHAPITRE 06 PHYSICO-CHIMIE DES FLUIDES DE FORAGE.....	61
6.1. Généralité sur les suspensions	62
6.1.1. Définition	62
6.2. Le mouvement brownien et la gravité	63
6.3. Interface minéral-solution	63
6.3.1. Double couche électrique	63
6.3.2. Adsorption des ions sur la surface du minéral	64
6.4. Les forces dans une suspension	64
6.4.1. Forces volumiques	64
6.4.2. Forces de surface	65
6.5. Adjuvants : cas des polymères	69
6.5.1. L'effet de la nature du polymère	69

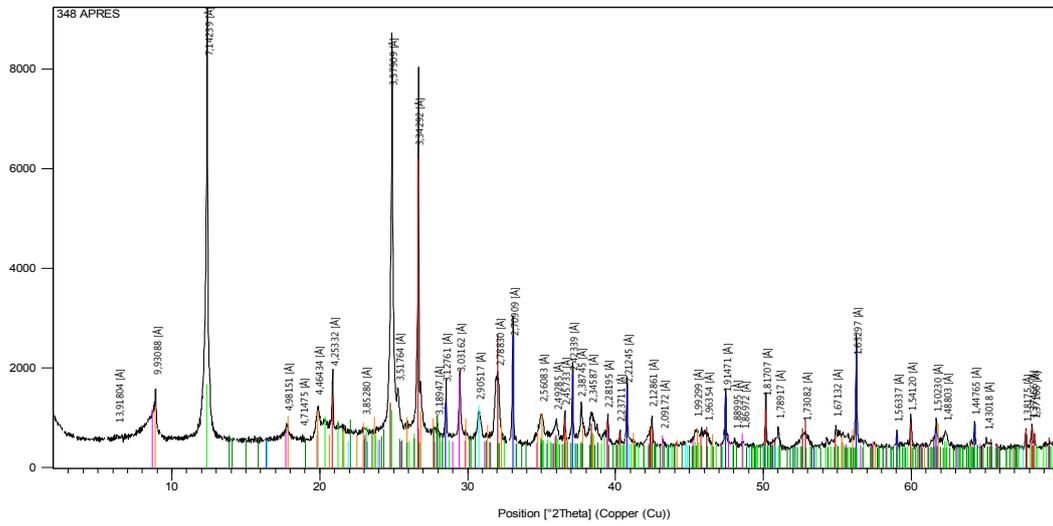


Figure A2: diffractogramme de l'échantillon 300-348 m après.

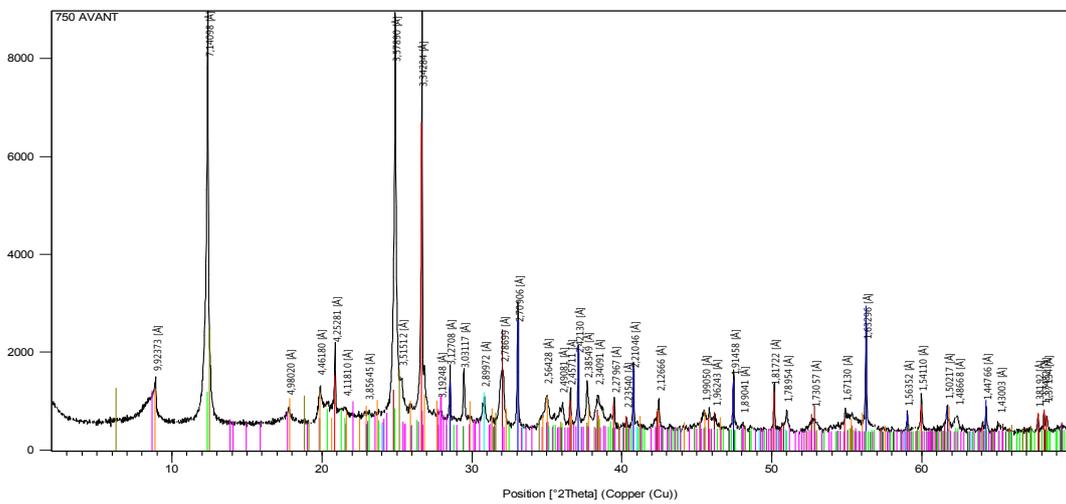


Figure A3: diffractogramme de l'échantillon 750 m avant.

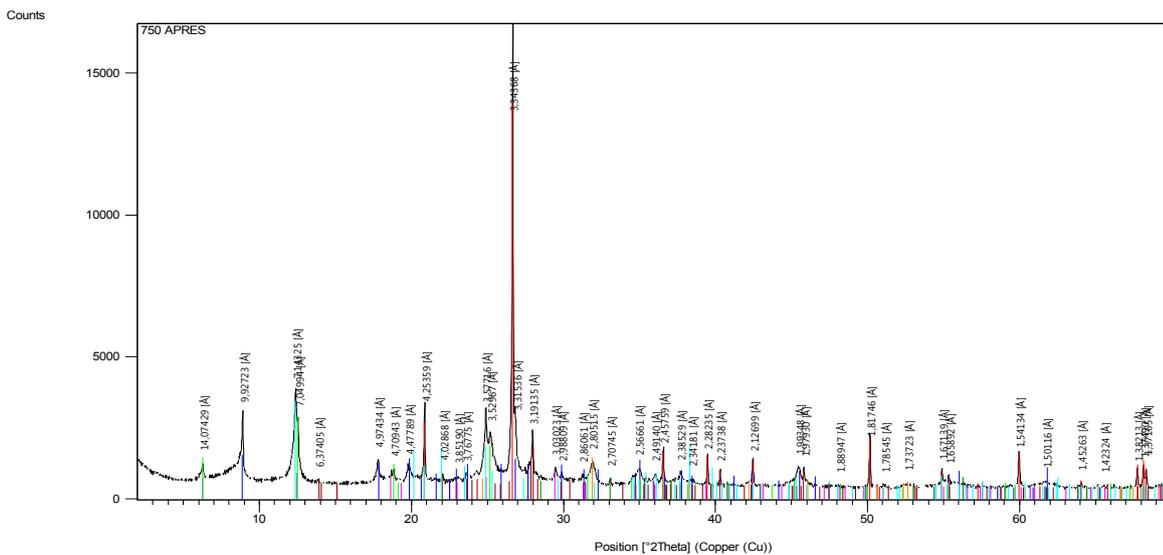


Figure A4: diffractogramme de l'échantillon 300-348 m après .

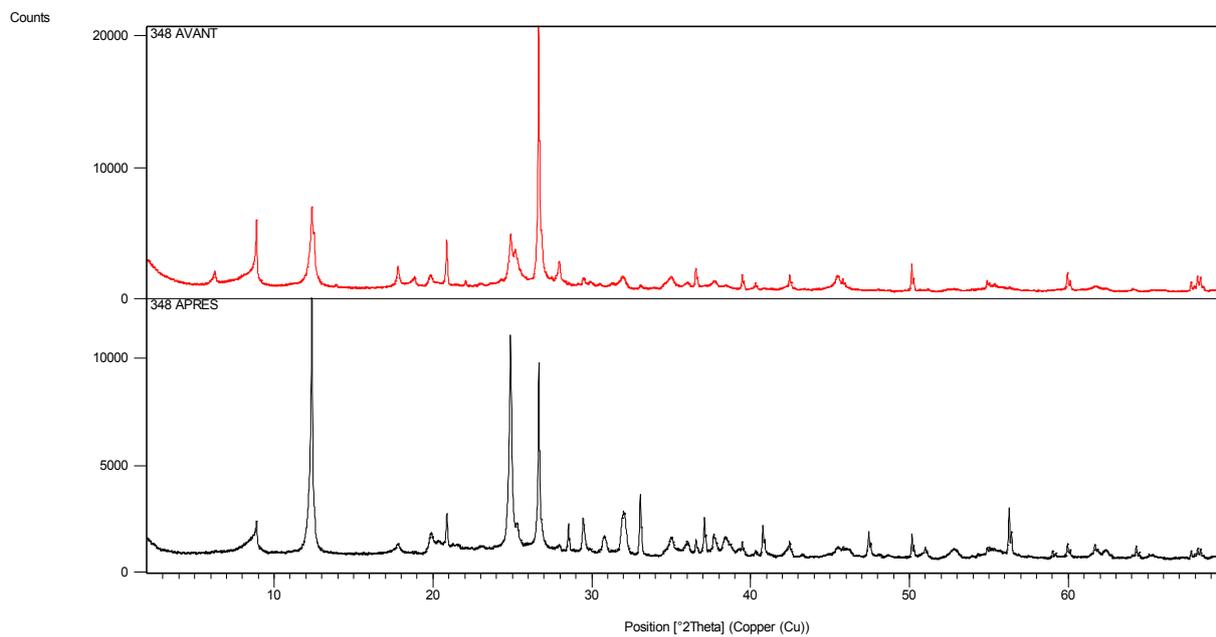


Figure A5: diffractogramme de l'échantillon 300-348 m avant vs après .

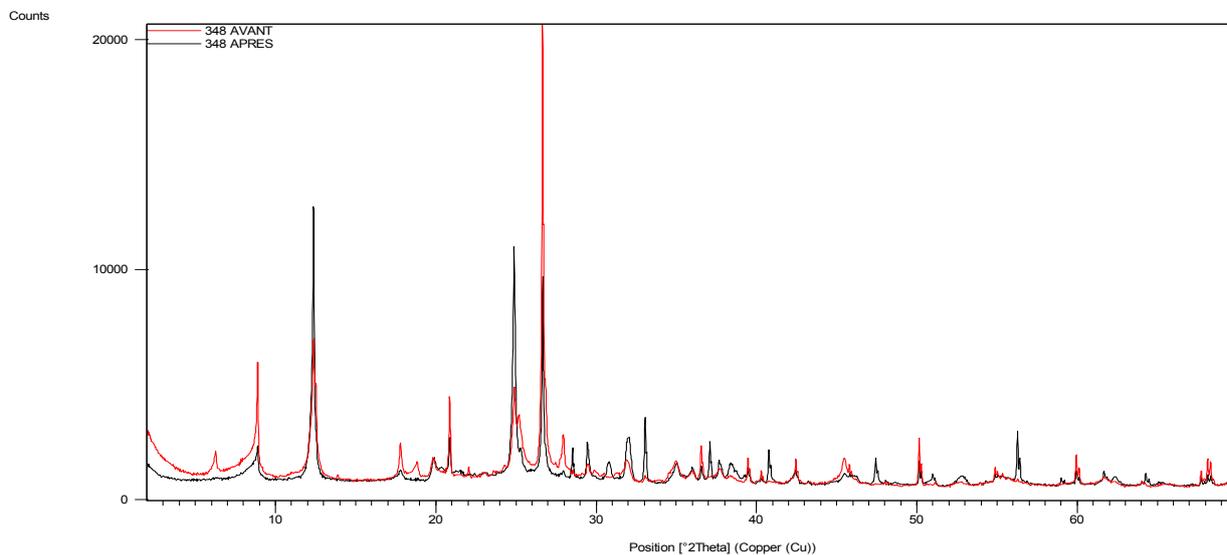


Figure A6: diffractogramme de l'échantillon 300-348 m avant vs après.

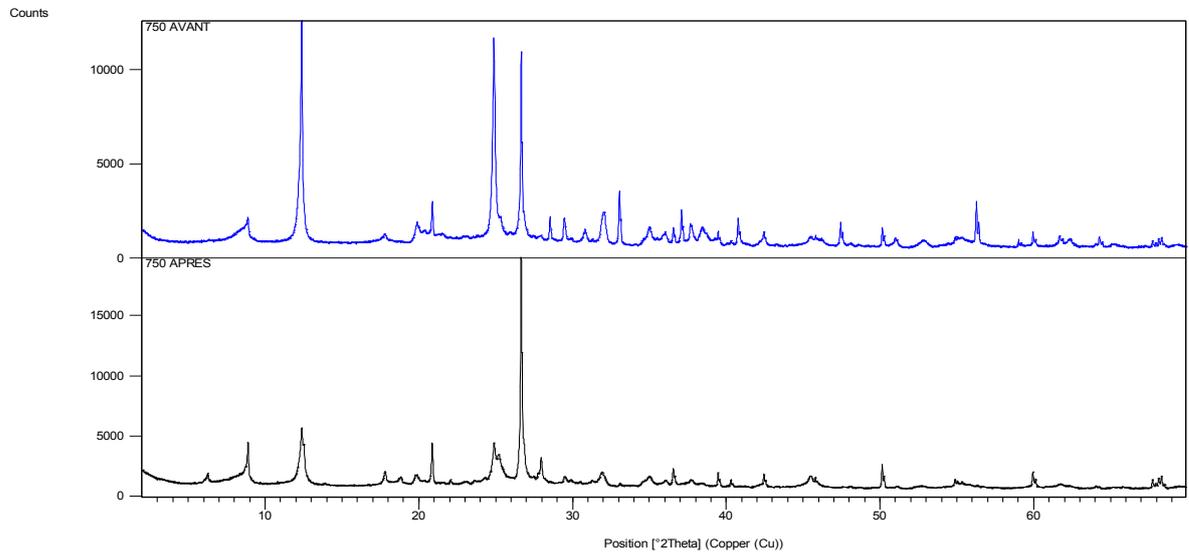


Figure A7: diffractogramme de l'échantillon 750 m avant vs après .

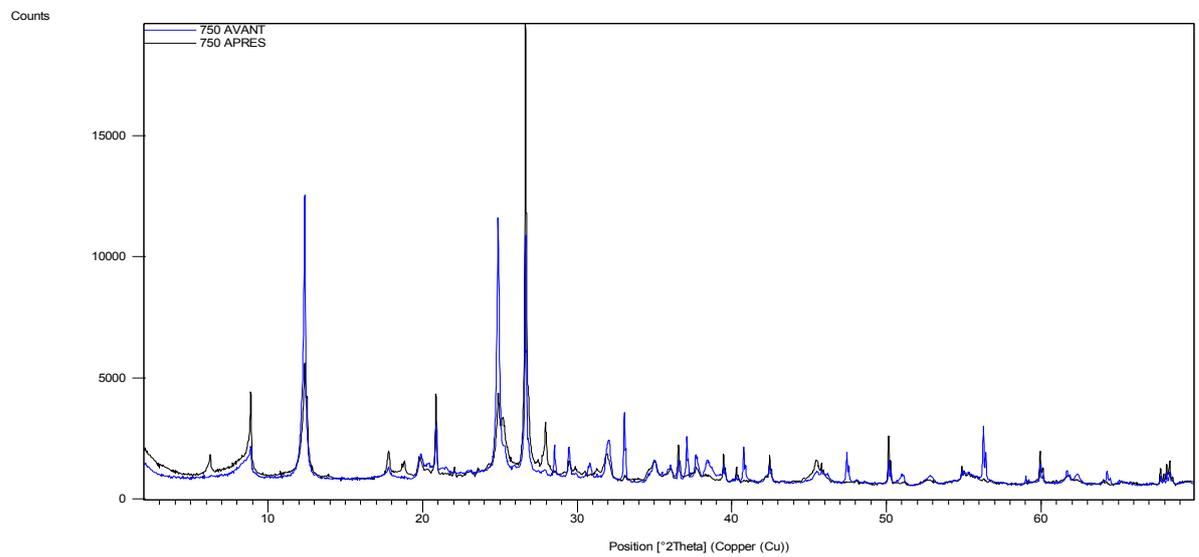


Figure A8: diffractogramme de l'échantillon 750 m avant vs après .

6.5.2. L'effet de la concentration	69
6.6. Étude de l'effet des polymères sur propriété physico-chimiques	70
6.6.1. Mesures de potentiel électrocinétique des systèmes	70
6.6.2. Caractéristiques rhéologique et physico-chimique de Xanthane.....	72
PARTIE EXPERIMENTAL	74
CHAPITRE 07 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	75
7. Région d'In Salah	76
7.1. Situation géographique	76
7.2. Contexte Géologique	76
7.2.1. La Structure Géomorphologique	77
7.2.2. La Géologie régionale	77
7.2.3. La Stratigraphie	78
CHAPITRE 08 LA COMPOSITION MINERALOGIQUE.....	81
8.1. Analyse par diffraction des rayons X	82
8.1.1 Procédure	82
8.1.3. Interprétation	83
CHAPITRE 09 LES CARACTERISTIQUES RGEOLOGIQUES	84
9.1. Préparation de la formation de la boue.....	85
9.2. Les produits de boue.....	85
9.3. Les avantages et les inconvénients de la formulation.....	88
9.4. Protocole expérimental et condition de travail	88
9.6. Comportements rhéologique et typologique de la formulation.....	90
9.7. Effet de la température sur le comportement rhéologique	94
9.7.1. Effet de la température sur le comportement rhéologique de Xanthane. ...	94

9.8. Le traitement de la contamination de la boue KAc-Polymère.....	96
CHAPITRE 10 EVALUATION D'INHIBITION DU GONFLEMENT...	97
10.1. Essai de temps de section capillaire (capillary section timer)	98
10.1.1. Le dispositif	98
10.1.1. Méthodes expérimentales.....	99
10.1.2 Résultats et discussion	99
10.2. Essai de la dispersion d'argile (Shale Erosion Test)	101
10.2.1. Procédure	101
10.2.3. Interprétation des résultats.....	104
10.3. Essais de filtration sur pastilles (linéair swell meter test).....	105
10.3.1. Procédure	105
10.3.3. Interprétation des résultats	107
10.1. Analyse par le scanne d'échantillon d'argile	109
CHAPITRE 11 MODELISATION LSM ET SET A L'AIDE DE RESEAUX DE NEURONES ARTIFICAIL.....	110
11.1. Définition	111
11.2. La modélisation Computationnelle de RNA	111
11.3. L'étude computationnelle : modélisation de gonflement	113
11.4. Résultats et discussion.....	114
11.5. Le Modélisation de pourcentage d'argile récupérable	121
11.4. Résultats et discussion	122
CONCLUENCE GENERAL	128
BIBLIOGRAPHIE.....	130
Annexe	134

TABLE DES FIGURES

Figure I.1.1 :	Cycle du fluide sur le site de forage (Schlumberger, 1997).....	03
Figure I.1.2 :	Formation du cake interne et du cake externe.....	14
Figure I.2.1 :	Forces agissant sur éléments de couches voisines.....	18
Figure I.2.2 :	Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles....	19
Figure I.2.3 :	Courbes d'écoulement.....	22
Figure I.2.4 :	Courbes d'écoulement des principales catégories de fluide sans contrainte.....	24
Figure I.2.5 :	Boucle d'hystérésis du fluide thixotrope	25
Figure 2.6 :	Représentation comportement élastique du corps solide.....	27
Figure 2.7 :	Représentation comportement visqueux du liquide.....	27
Figure 3.1 :	Structure chimique de PAC	34
Figure 3.2 :	Disposition des molécules d'amylose dans le granule d'amidon.....	36
Figure 3.3 :	Rétention d'eau par l'amidon.....	37
Figure 3.4 :	Disposition des molécules d'amylopectme dans la granule d'amidon.....	37
Figure 3.6 :	Hydrolyse de l'amidon.....	38
Figure 4.2abc:	Éléments structuraux : les tétraèdres (Eslinger & Peaver, 1988)	42
Figure 4.2de :	Éléments structuraux : les octaèdres (Eslinger & Peaver, 1988)	42
Figure 4.3a :	Agencements des tétraèdres et des octaèdres (Moore & Reynolds,)	42
Figure 4.3b :	Agencements des tétraèdres et des octaèdres en feuillets 1/1 (Rslinger & Peaver,1988 ; Weaver, 1989)	43
Figure 4.4b :	Formation de l'halloysite (Manning, 1995)	44
Figure 4.5a :	Ex de minéral à S 2/1(Eslinger & Peaver, 1988)	45
Figure 4.5b :	Ex de minéral à S 2/1(White, 1999)	45
Figure 4.6 :	Classification des minéraux argileux 2/1 dioctaédriques (Eslinger & Peaver, 1988)	45
Figure 4.7 :	Représentation d'une vermiculite (White, 1999)	46
Figure 4.8 :	Représentation du chlorite (White, 1999)	48
Figure 4.9a :	Capacité d'adsorption d'eau par les particules argileuses (Velde, 1992 ; 1995)	50
Figure 4.9ab :	Adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).....	51
Figure 4.9cd :	Adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002)	51

Figure 4.10 :	Charge de surface (Schroeder, 2002)	52
Figure 4.11 :	Mesure de la CEC (Eslinger & Peaver, 1988)	52
Figure 6.1 :	Trois échelles caractéristiques dans une suspension.....	62
Figure 6.2 :	(a) Structure de la double couche électrique diffuse a la surface d'une particule d'argile, et (b) distribution de la concentration en anions (n-) et les cations (n+) en fonction de la distance de la surface avec une concentration en bloc de <i>no</i>	63
Figure 6.3 :	Représentation de la double couche électrique.....	64
Figure 6.4 :	Potentiels d'Interaction de surface en fonction de la distance à la surface.....	66
Figure 6.5 :	Attraction des particules sous l'effet des fortes de van der Waals	68
Figure 6.6 :	Répulsion des particules sous l'effet des forces électrostatiques.....	68
Figure 6.7 :	Effet de la concentration de la xanthane sur le potentiel et PH.....	70
Figure 6.8 :	L'effet de la concentration de Xanthane sur la transmission et la viscosité.....	70
Figure 6.9 :	La rhéogrammes des solutions de la gamme de xanthane.....	71
Figure 6.10 :	Viscosité de la gamme de xanthane dans l'eau en fonction de vitesse de cisaillement.....	71
Figure 7.1 :	Situation géographique de d'In Salah.....	76
Figure 9.1 :	Viscosimètre FANN 35 SA.....	89
Figure 9.2 :	Mixeur HAMILTON BEACH.....	89
Figure 9.3. et 9.4 :	La contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement....	91
Figure 9.5 :	La viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement.....	93
Figure 9.6 :	Effet de la température sur la viscosité apparente de Xanthane.....	94
Figure 9.7 :	Effet de la température sur la yield point de Xanthane.....	95
Figure 10.1:	Dispositif de filtration temps de section capillaire.....	98
Figure 10.2:	CST en fonction de la concentration de KAc ech 1	100
Figure 10.3:	CST en fonction de la concentration de KAc ech 2	100
Figure 10.4:	CST en fonction de la concentration de KAc ech 3	101
Figure 10.5:	Récupération en fonction de la concentration ech 1	102
Figure 10.6:	Récupération en fonction de la concentration ech 2	103
Figure 10.7:	Récupération en fonction de la concentration ech 3	103
Figure 10.8:	Gonflement des argiles en fonction de temps Ech1	106
Figure 10.9:	Gonflement des argiles en fonction de temps Ech2.....	106

Figure 10.10 :	Gonflement des argiles en fonction de temps Ech3.....	107
Figure 11.1 :	Modèle des neurones artificiels.....	112
Figure 11.1 :	Modèle des neurones artificiels pour le paramètre A.....	115
Figure 11.2 :	La prédiction de modèle RNA pour la saturation de gonflement A...	115
Figure 11.3 :	Modèle des neurones artificiels pour le paramètre B.....	116
Figure 11.4 :	La prédiction de modèle RNA pour la saturation de gonflement B...	117
Figure 11.5 :	Model des neurones artificiel pour paramètre B.....	118
Figure 11.6 :	La prédiction de modèle RNA pour la saturation de gonflement C...	119
Figure 11.6 :	Le modèle RNA Vs expérimental de LSM pour le gonflement d'argile.....	119
Figure 11.7 :	Modèle des neurones artificiels pour le pourcentage d'argile récupérable.....	122
Figure 11.9 :	La prédiction de modèle RNA pour le pourcentage d'argile récupérable.....	123
Figure 11.10 :	Histogramme des erreurs RNA Vs expérimental.....	123
Figure 11.11 :	Shale erosion test vs yield point.....	124

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage. tt.....	05
Tableau 1.2	Caractéristiques du milieu filtrant (Gray et al., 1980)	14
Tableau 2.1	Quelques ordres de grandeur des valeurs des viscosités de différents matériaux à température ambiante (ta).....	20
Tableau 2.2	Modèles rhéologique décrivant l'écoulement de fluide a contrainte à seuil (Midoux, 1988)	23
Tableau 2.3	Lois rhéologiques de fluide ne présentant pas de contrainte (Midoux,88).....	24
Tableau 3.1	Représentation schématique des structures de polymère.....	31
Tableau 4.1	Classification des minéraux argileux 1/1 (Caillière et al, 1982)	44
Tableau 4.2	Classification des minéraux argileux 2/1 trioctaédriques.....	46
Tableau 4.3	Types de smectites (Clauer & Chauduri, 1995)	47
Tableau 4.4	Composition des smectites (Manning, 1995)	47
Tableau 4.5	CEC des minéraux argileux (Eslinger & Peaver, 1988)	53
Tableau 6.1	Constante de Hamaker de quelques milieux.....	67
Tableau 8.1	la composition minéralogique des échantillons.....	83
Tableau 8.2	Le pourcentage des argiles.....	83
Tableau 9.1	La formation de la boue utilisée.....	87
Tableau 9.2	Les formulations de la boue utilisées.....	90
Tableau 9.3	Les résultats des paramètres.....	92
Tableau 9.4	La viscosité en fonction du taux de cisaillement.....	93
Tableau 9.5	La viscosité apparente en fonction de la température.....	94
Tableau 9.6	La viscosité apparente en fonction de la température.....	94
Tableau 10.1	CST en fonction de la concentration de KAc ech 1	99

Tableau 10.2:	CST en fonction de la concentration de KAc ech 2	100
Tableau 10.3:	CST en fonction de la concentration de KAc ech 3	101
Tableau 11.1:	Les entiers et sortie pour la modélisation de RNA de A.....	114
Tableau 11.2:	Les entiers et sortie pour la modélisation de RNA de B.....	116
Tableau 11.3:	Les entiers et sortie pour la modélisation de RNA de C.....	118
Tableau 11.4:	Les paramètres de gonflement d'argile par le modèle RNA Vs expérimental.....	120
Tableau 11.5:	Les entiers et sortie pour la modélisation de RNA de C.....	121

NOMENCLATURE

P et d	La pression et la densité
V_A et V_P	Viscosité apparent et plastique
Y_A	Yield point
K_0	Perméabilité initial
Q_0	Débit de fluide au temps $t=0$
τ	La contrainte de cisaillement
Γ	La déformation de cisaillement
$\dot{\gamma}$	La vitesse de cisaillement
ν	La viscosité cinématique
M	La viscosité dynamique de fluide
$G'(\omega)$	La rigidité d'accumulation
$G''(\omega)$	La rigidité dissipation
PAC	Polyanionique cellulose
CMC	Carboxyméthylcellulos
CEC	Capacité d'échange cationique
PHPA	Polyacrylamide partiellement hydrolysé
DRX	La diffraction des rayons X
n	Nombre entier correspondant à l'ordre de la diffraction
λ	Longueur d'onde du rayonnement utilisé
d	Espace basal (espace atomique ou inter-réticulaire),
ϑ	Angle de diffraction.
P_M	Alcalinité de la boue.
P_F	Alcalinité du filtrat
F_W	Fraction de Volume d'eau.
τ_0	Contrainte seuil.
K	Indice de consistance.
n	Indice d'écoulement.
r_f	Résistance du filtre
r_k	Résistance du cake.
Δt	Différence du temps
CST	Capillary section timer
SET	Shale Erosion Test
LSM	Linear swell meter
ε	Le pourcentage de gonflement linéaire .
Δl	Le changement de longueur d'argilel
RNA	réseaux de neurones artificiel
ψ_s	Potentielle de surface

Introduction

Le forage est un secteur clé de l'industrie pétrolière et regroupe différents métiers très spécialisés. Aussi, il permet de connaître les caractéristiques et les contenus du gisement, afin de décider s'il est intéressant de mettre ce gisement en production ou non.

Pour atteindre l'objectif de forer un puits avec un prix de revient minimal, plusieurs équipements et techniques ont été développés selon les besoins et les difficultés rencontrés pendant le forage.

Malgré toutes les améliorations qui ont été faites, on rencontre toujours des problèmes lors de la réalisation du puits pétrolier parmi lesquels on note le problème de gonflement des argiles, ceci coûte à l'industrie pétrolière plusieurs milliards de dollars par an en temps perdu.

L'évaluation de gonflement d'argile est la prévention de l'élargissement des formations de nature plastique entourant le puits. De ce fait, elle s'appuie profondément sur les caractéristiques des couches argileuses qui ont une potentielle de gonflement très élevé.

Nous avons commencé notre travail par une présentation de la zone d'étude d'Ain Salah dans la région de sud Algérien, celle-ci contient les argiles qui sont connues par leurs potentiels de gonflement qui provoquent l'instabilité des parois, pour cela nous avons fait ce sujet de recherche.

Tout d'abord, il faut déterminer la composition minéralogique des cuttings choisis, en utilisant la technique de diffraction des rayons X.

Ensuite, on a étudié le comportement rhéologique de la boue de forage à base de polymère en présence de potassium acétate polymère afin de comprendre l'interaction argile-fluide.

Les techniques de laboratoire utilisées pour la détermination du caractère d'inhibition des argiles ont été effectuées par les essais entre autres, l'essai de temps de section capillaire, l'essai de la dispersion d'argile et l'essai de filtration sur les pastilles pour établir la concentration optimale du KAc et de clayseal.

La modélisation de linéaire swell meter et shale erosion test a été effectuée à l'aide de réseaux de neurones artificiel. Le modèle peut fournir une mesure rapide et directe sur la performance de la formulation et son optimisation pour empêcher le gonflement d'argile, sans oublier de réduire les nombres des essais requis dans les laboratoires de recherche qui coûtent très cher.

CHAPITRE 1.

GENERALITES SUR LES FLUIDES DE FORAGE.

Introduction :

L'opération de forage constitue une phase clef dans l'exploitation des gisements d'hydrocarbures. Cette technique est en évolution, aussi bien en ce qui concerne l'outil de forage que le fluide injecté. Le succès du forage d'un puits dépend essentiellement du bon choix du fluide de forage utilisé. L'optimisation d'une bonne formulation d'une boue de forage permet de réduire d'une manière significative le coût global d'un forage. A cet effet, la boue est choisie en fonction de la nature de la formation, de l'architecture du puits, des objectifs de sondage et des contraintes environnementales et économiques [Cartalos et al. (1997)].

1 Les fluides de forage

1.1 Définition

Le fluide de forage, appelé aussi boue de forage, est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments, ...). Le fluide de forage était déjà présenté en 1933 lors du premier Congrès Mondial du Pétrole, où il a fait l'objet de cinq communications (Darley et Gray, 1988). Le premier traité sur les fluides de forage a été publié en 1936 par Evans et Reid. En 1979, l'American Petroleum Institute (API) définit le fluide de forage comme un fluide en circulation continue durant toute la durée du forage, aussi bien dans le sondage qu'en surface.

Le fluide est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille (**Figure 1.1**). A la sortie du puits, il subit différents traitements, tamisage, dilution, ajout de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales. Il est ensuite réutilisé (**Landriot, 1968**).

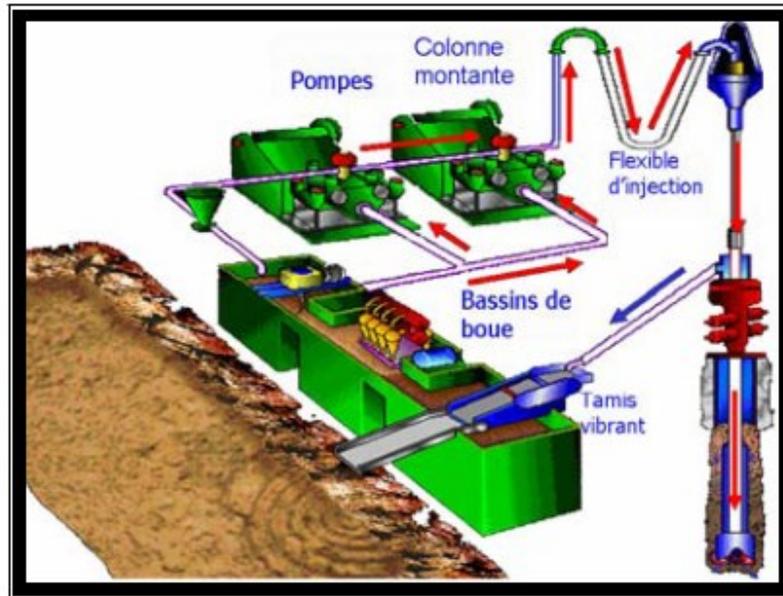


Figure 1.1 : Cycle du fluide sur le site de forage (**Schlumberger, 1997**).

1.2 Les principales fonctions de la boue de forage.

La plupart des manuels sur les fluides de forage énumèrent entre 10 et 20 fonctions assurées par ces fluides dans le puits (**Chillingarian et Vorabutr, 1983 ; Darley et Gray, 1988**). En général, les principaux rôles du fluide de forage sont :

- ▶ Assurer la remontée des déblais du fond du puits jusqu' à la surface par la circulation d'un fluide visqueux dans l'espace annulaire. Ces déblais donnent des informations géologiques sur les formations traversées lors du forage.
- ▶ Maintenir les déblais en suspension lors d'un arrêt de circulation dans le but d'empêcher la sédimentation des déblais afin de redémarrer le forage sans coincement et ceci est possible grâce à la nature thixotrope du fluide.
- ▶ Refroidir et lubrifier l'outil pour éviter l'usure rapide des pièces métalliques en mouvement.
- ▶ Maintenir les parois du puits en raison de la pression hydrostatique exercée par le fluide en écoulement et permettre de contrôler la venue des fluides des formations rocheuses traversées.

Du fait de cette différence de pression, le fluide va "filtrer" dans les formations perméables et déposer un film sur la paroi appelé "**cake de filtration**". Ce gâteau permet de réduire la perméabilité des parois et d'isoler le fluide de forage de la formation mais ne doit pas être épais afin d'éviter une diminution du diamètre nominal du trou et un risque de coincement de l'outil.

Le fluide de forage joue donc un rôle déterminant dans la résolution du problème de stabilité des parois du puits de par sa densité mais également de par sa capacité à former une barrière limitant les transferts de fluides entre l'espace annulaire et la formation.

► Enfin la boue ne doit être ni corrosive ni abrasive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et elle ne doit pas présenter de risque d'incendie.

A la fin des années 1950, l'utilisation sur chantier d'une grande variété de produits soumis à des spécifications rigoureuses réglementant les propriétés des fluides, a permis de développer la chimie des fluides de forage. Cependant, il a été impossible de lier automatiquement les problèmes du forage aux fluides, vu la complexité des problèmes liés aux argiles.

Depuis les années 1990, les contraintes environnementales et les restrictions gouvernementales limitant l'utilisation des produits toxiques et non biodégradables, un intérêt particulier a été apporté à de nouveaux types de fluides.

1.3 Composition des différents types :

Historiquement, les fluides de forage ont évolué d'un simple mélange d'eau et d'argile appelé "boue " vers des systèmes de plus en plus complexes composés d'eau ou huile avec une multitude d'additifs répondant aux caractéristiques requises et aux problèmes rencontrés. Les fluides de forage sont des fluides complexes classés en fonction de la nature de leurs constituants de base. Traditionnellement, les fluides de forage ont été classés en trois catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation : l'air, l'eau ou l'huile (**Ryan et Chillingar, 1996**). Les propriétés exigées des boues de forage sont multiples et peuvent parfois même être contradictoires.

Les boues doivent par exemple être très visqueuses pour assurer la remontée des déblais, mais la viscosité ne doit pas être trop élevée afin de limiter les pertes de charge dues à l'écoulement et afin d'éviter la fracturation de la formation. De nombreux composants multifonctions sont donc ajoutés à la boue pour lui conférer les propriétés désirées. Il est possible de classer grossièrement ces composants en 20 catégories (**Economides et al., 1988, Tableau I.1.1**).

Tableau 1.1 : Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage.

01	Contrôleurs d'alcalinité	11	Lubrifiants
02	Bactéricides	12	Décoincants (ou dégrippants)
03	Anti-calcium	13	inhibiteurs de gonflement des argiles
04	Inhibiteurs de corrosion	14	Produits facilitant la séparation
05	Anti-mousses	15	Stabilisants haute température
06	Agents moussants	16	Défloculants
07	Emulsifiants	17	Viscosifiants
08	Réducteurs de filtrat	18	Alourdissants
09	Floculants	19	Saumure
10	Colmatants	20	Huile minérale ou organique

1.3.1 Les fluides à base d'eau

Ces fluides sont souvent désignés par "Water-Based Muds" ou **WBM**. Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de bentonites dans l'eau (30 à 60 g/L) dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont souvent ajustées par des polymères.

La nature des électrolytes et leur concentration dans les formulations de boues à l'eau sont choisies en prenant en compte les caractéristiques de la formation (activité de l'eau des formations argileuses dissolution des formations salines).

Parmi les additifs on peut trouver

i) des viscosifiants : argiles naturelles (souvent des bentonites), polymères synthétiques ou biopolymères ;

ii) des réducteurs de filtrat servant à consolider le cake de filtration pour limiter l'invasion par le fluide : amidons, carboxyméthylcelluloses ou CMC, celluloses polyanioniques (PAC), ou résines ;

iii) des inhibiteurs de gonflement et de dispersion des argiles : KCl, glycérol, silicates ou divers polymères comme le polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA), les polyalkylèneglycols (PAG) ;

iv) des agents alourdissants comme la barytine ("barite" ou sulfate de baryum $BaSO_4$) et la calcite (carbonate de calcium $CaCO_3$) qui sont les plus utilisés pour assurer à la boue une densité convenable. On note aussi l'utilisation de l'hématite (Fe_2O_3) ou de la galène (PbS). La calcite est souvent recommandée pour le forage de la phase réservoir à cause de sa solubilité dans l'acide et de son utilisation selon une granulométrie variable pour réduire les problèmes de pertes et d'endommagement ; et enfin

v) des colmatants, additifs plutôt exotiques comme des granuleux (coquilles de noix), des fibreux (fibres de bois, canne à sucre), et des lamellaires (coquilles d'huîtres, céréales) (**Herz haft, 2001 ; Peysson, 2004**).

1.3.2 Les fluides à base d'huile

L'origine de l'utilisation de l'huile dans les fluides de forage remonte aux premiers forages effectués à Oklahoma City (1934-1937) au cours desquels on a constaté une amélioration des performances de forage après ajout de l'huile brute (**Lummus et al., 1953**).

Les fluides à base d'huile sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gazole, ...) et la phase dispersée est de l'eau. Par définition les fluides de forage à base d'huile contenant plus de 5% d'eau sont appelés boues de forage en émulsion inversé ; avec moins de 5% d'eau, on a les boues à l'huile (**IDF, 1988**). Ces fluides sont souvent désignés par "Oil-Based Muds" ou **OBM**. La phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gazole, mais actuellement la législation relative à la protection de l'environnement impose l'utilisation d'huiles minérales ou "synthétiques", ne contenant plus de composés aromatiques. Des agents émulsifiants et mouillants sont alors utilisés pour favoriser la stabilité de l'émulsion.

Les propriétés rhéologiques (thixotropie) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents Viscosifiants, généralement des argiles organophiles. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (composés asphalténiques et polymères) et d'autres additifs spéciaux. Il faut signaler qu'aujourd'hui la plupart des travaux de recherche portent sur l'amélioration des boues inverses synthétiques, vu leurs avantages économiques et environnementaux, comparativement aux fluides classiques à base de gazole (**M. Khodja, 2008**).

1.3.3 Les fluides de forage gazeux

Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables provenant de la formation traversée (inévitablement) ou ajoutée intentionnellement. Le gaz peut être de l'air ou du gaz naturel, et peut appartenir à une mousse ou à un brouillard. Citons brièvement les fluides gazeux utilisés :

► Forage à l'air :

L'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité et le prix de revient le moins élevé, mais le forage à l'air qui a commencé en 1940, devient difficile lors de venues importantes d'eau. Il apporte une solution à des problèmes compliqués parfois impossibles à résoudre avec les méthodes de forage à la boue conventionnelle. Il est recommandé dans le cas des pertes totales répétées de la boue lors de la circulation ainsi que dans le forage des couches productrices sous faible pression. En Algérie, les premiers forages à l'air ont été réalisés entre 1954 et 1960 dans la région de Tebessa sur les puits Djebel Foua,

Djebel Onk (**Abid, 1995**) suite aux pertes importantes rencontrées dans la région (**S.N.Repal, 1961**). D'autres forages ont été réalisés en 1970 à Djebel Lazreg. D'une façon générale, le forage à l'air a réduit le coût du forage de 50 à 60% par rapport au forage à la boue dans le bassin (**Hannachi, 1972**).

► **Forage à la mousse :**

Les mousses sont des dispersions d'un volume de gaz (relativement) important dans un volume de liquide relativement faible. Elles sont utilisées comme fluides de forage lorsque les terrains traversés sont fracturés, ou lorsque le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier. L'avantage du forage à la mousse se résume par sa faible pression hydrostatique au fond et par son excellent pouvoir de remontée des déblais à moins que la mousse ne refroidisse pas convenablement les terrains traversés ainsi que le train de sonde et ne contrôle pas la tenue des parois du puits (pas de cake). Des problèmes de sécurité au sujet de l'utilisation de la mousse en réservoir sont à signaler, notamment des explosions dans le cas où le volume d'hydrocarbures gazeux est compris entre 3 et 10% par rapport à l'air. C'est le cas en 1992, du puits RB-13 en Algérie, où lors d'une opération de reprise de puits (de "work-over") avec une boue à la mousse pour éviter les pertes de circulation, une explosion s'est produite suite à une contamination de la boue par une venue d'huile ou de gaz (**Abid, 1995**).

► **Forage à la boue aérée :**

Le forage à la boue aérée est utilisé afin d'éviter les pertes de circulation et pour avoir un fluide de forage plus léger. Les avantages sont une bonne tenue des parois grâce à un cake contrôlé, une tendance aux pertes de circulation fortement réduite et une vitesse d'avancement plus grande, une assez bonne capacité de refroidissement des terrains traversés et du train de sonde, à moins que la stabilité de la boue aérée ne soit liée à une circulation effective des fluides.

1.4 Propriétés des fluides de forage :

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes précises éditées par l'API (**API 13A, 2004**). Les tests relatifs à l'étude des caractéristiques des fluides de forage sont généralement basés sur quatre paramètres : **densité, viscosité, filtrat et réactivité** (**Ryan et Chillingar, 1996**).

Certaines mesures sont réalisées systématiquement sur tous les forages (viscosité, densité, filtration) et d'autres en fonction des besoins (taux de gaz, alcalinité). A partir des mesures réalisées et des connaissances acquises, on ajuste si nécessaire la composition de la boue en "temps réel" en ajoutant certains produits ou en reformulant la boue.

Historiquement, face aux problèmes majeurs rencontrés dans les premiers forages, la densité est le premier paramètre fondamental pour la caractérisation des fluides de forage.

1.4.1 Densité

La densité est un paramètre important des boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour contrebalancer la pression exercée par les venues d'eau, d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions. Cependant elle ne doit pas dépasser la limite de résistance des parois du puits (formations traversées) pour ne pas les fracturer et ne pas risquer une perte de boue au cours de la circulation. Pour l'alourdissement de la boue, la barite (BaSO_4) a été utilisée dès 1922 (**Stroud, 1925**).

La pression exercée par la boue sur les parois du puits, est donnée par l'expression suivante (**Garcia et Parigot, 1968**):

$$P = \frac{hc \cdot d}{10} \quad \dots \text{équation 1.1}$$

Avec P : Pression de la formation (kgf/cm^2), hc : Profondeur de la couche traversée (m) et d : Densité de la boue.

A cause de cette pression de contre-balancement en conditions normales de forage, une diffusion du fluide dans les milieux poreux est possible. Pour diminuer autant que possible cette invasion, un produit de filtration, de faible épaisseur, appelé cake, est formé sur les parois du trou foré. Ce cake doit être de perméabilité faible et doit être facilement enlevé avant la cimentation (**Peysson, 2004**).

1.4.2 Rhéologie: Importance de la rhéologie pour la résolution des problèmes de forage

Une littérature assez développée existe au sujet du comportement rhéologique des fluides de forage. Les fluides de forage sont souvent des suspensions colloïdales qui ont un comportement complexe et variable suivant leur composition et les conditions d'utilisation (**Garcia et Parigot, 1968 ; Forage Rotary, 1972**). Ce sont le plus souvent des fluides non-newtoniens, visqueux ou viscoélastiques, éventuellement thixotropes (**Nguyen, 1993**). De nombreux modèles rhéologiques ont été proposés et traités dans l'industrie pétrolière, par plusieurs auteurs (**Prandtl, 1928 ; Philippoff, 1935; Eyring, 1936; Sisko, 1958; Cross, 1965; Sutterby, 1966; Ellis et al., 1967; Taylor et Smalling, 1973; Robertson et Stiff, 1976; Graves et Collins, 1978; Lauzon et Reid, 1979; Gavignet et Wick, 1987; Hemphill et al., 1993 ; Bailey et al., 1996; Al-Zharani, 1997**).

L'objectif principal des études rhéologiques est de caractériser et de quantifier les effets des interactions entre particules sur les propriétés macroscopiques de suspensions (**Buscall et White, 1974**). Les hauts polymères possèdent la capacité d'augmenter fortement la viscosité du fluide dans lequel ils sont dissous même à très faible concentration. Suivant la composition des fluides, les courbes d'écoulement des fluides de forage peuvent être de plusieurs types dont et les plus usuels sont le modèle le plus simple de Bingham et le modèle en loi de puissance (**Parigot, 1968**). Selon **Versan Kok et Alikaya (2004)** le modèle en loi de puissance décrit bien le comportement des systèmes de fluides KCl/polymères. Selon **Tschirley (1983)** la majorité des fluides de forage obéit aux modèles de Bingham (**Lauzon et Reid, 1979**), d'Ostwald-de Waele, de loi de puissance (**Lauzon et Reid, 1979**) ou bien de Robertson-Stiff (modèle pseudoplastique à seuil) (**Robertson et Stiff, 1976**).

Les boues de forage, souvent décrites comme des fluides rhéofuidifiants et thixotropes à seuil, ont une structure interne susceptible de se modifier selon les conditions d'écoulement et/ou de cisaillement, et pouvant mener à des phénomènes non homogènes au sein du matériau. Dans leur travail de caractérisation des fluides de forage par Imagerie à Résonance Magnétique (IRM) **Coussot et al., (2004)** ont montré qu'au-dessus d'un gradient de vitesse critique, les fluides présentent un comportement rhéofuidifiant avec seuil d'écoulement apparent, et qu'au -dessous de ce gradient critique, on observe un comportement visqueux simple sans seuil d'écoulement.

L'utilisation de l'IRM montre qu'en fait, au-dessous de ce gradient critique, un écoulement stable n'est pas possible, la déformation se localise dans une zone dont la dimension peut dépendre de la taille des éléments constitutifs. Le comportement rhéologique apparent observé lors des mesures rhéologiques conventionnelles est donc la signature de cette zone cisailée et ne représente pas le comportement du matériau dans son ensemble. Du point de vue équipement, plusieurs travaux (**Bingham, 1916; de Waele, 1923; Farrow et Lowe, 1923; Ostwald, 1925**) ont établi des modèles d'écoulement des fluides de forage en utilisant des viscosimètres rotatifs spécifiques. L'API recommande l'utilisation du viscosimètre Fann 35 A. Dans le cas des forages profonds, l'échec de la prévision des propriétés des fluides par simulation numérique est dû à une mauvaise connaissance de la variation des propriétés des fluides en fonction de la température (**Beirute, 1991**). Face à cette situation, la technologie des fluides de forage a été aussi suivie par un développement important d'outils d'évaluation et de contrôle. Dans le cas des forages profonds à haute température, on note la commercialisation de viscosimètres travaillant sous haute pression et à haute température (Fann 50 C).

Les caractéristiques les plus utilisées et recommandées par l'API sont la viscosité, la contrainte seuil et la thixotropie.

► **La viscosité** : La viscosité dépend avant tout de la teneur en solides contenue dans la boue et de la présence des polymères. Une augmentation de viscosité ne pourra donc être combattue que par l'élimination de solides. D'un point de vue pratique, on définit deux types de viscosité (exprimées en cP) : une viscosité apparente (VA) et une viscosité plastique (VP) souvent liée à la taille des particules, et à leur forme.

$$VA = L600 / 2 \quad \dots \text{équation 1.2}$$

$$VP = L600 - L300 \quad \dots \text{équation 1.3}$$

Où L600 et L300 représentent respectivement les lectures à 600 et 300 tr/mn sur le rhéomètre fann 35.

Le rhéomètre utilisé est de type Couette (cylindres concentriques rotatifs). C'est la classe de rhéomètres la plus fréquemment utilisée où la substance étudiée est emprisonnée entre deux cylindres de révolution, coaxiaux, de rayons distants de quelques mm. Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire ω , l'autre cylindre demeurant immobile.

La substance se décompose en couches cylindriques coaxiales, animées de vitesses angulaires différentes, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le cylindre fixe) à ω (pour la couche en contact avec le cylindre mobile). Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement et une contrainte de cisaillement.

Sur chantier, les outils disponibles pour contrôler la rhéologie de la boue sont de deux types. Le premier est le viscosimètre Marsh, outil encore très largement utilisé, le deuxième est un rhéomètre Fann 35, réalisant une mesure de contrainte pour 2 ou 6 valeurs du cisaillement selon les appareils.

D'autre part, la circulation dans le puits impose des valeurs élevées de pression et de température, il est donc nécessaire de mesurer ou de prévoir la rhéologie des fluides aux hautes températures et pressions ainsi que la tenue des additifs soumis à ces conditions (Nguyen, 1993). D'où l'importance de l'utilisation de rhéomètres travaillant à haute pression et haute température, type Fann70 (20000 Psi/500 °F) et d'appareils de filtration, type Dynamic Filtration System : Fann Model 90 (2500 Psi/500 °F).

► **La contrainte seuil** : Les solides présents dans la boue de forage influencent un paramètre autre que la viscosité plastique, qui est la contrainte seuil (exprimée en Pa ou en lb/100ft²), plus connue sous le nom de "yield value" ou "yield point".

$$YP = L300 - VP = (VA - VP) \cdot 2 \quad \dots \text{équation 1.4}$$

La contrainte seuil représente la résistance initiale à vaincre, pour que le fluide s'écoule, cette résistance est due aux forces électrostatiques attractives localisées à la surface des particules, c'est une mesure dynamique.

La contrainte seuil dépend du type des solides présents et de leurs charges de surface respectives, de la concentration de ces solides, et du type et de la concentration des autres ions ou sels éventuellement présents.

► **Gels et thixotropie** : Une boue de forage laissée au repos édifie progressivement une structure qui augmente sa rigidité et qui peut être réduite par agitation. On appelle thixotropie le fait que ce phénomène soit non instantané et réversible.

Le caractère thixotrope d'une boue est évalué en mesurant le "gel 0" et le "gel 10". Le gel 0 représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Ils sont mesurés à l'aide du viscosimètre Fann35 à une vitesse de 3 tr/min et exprimé en lb/100ft²

Le gel 10 représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes.

Le gel 0 varie pratiquement comme la viscosité plastique et le gel 10 comme la contrainte seuil avec cependant, pour ce dernier, une sensibilité particulière au traitement chimique.

La connaissance des propriétés rhéologiques est d'une grande importance pour la résolution des problèmes de forage et permet de recommander et de prévoir le comportement des fluides au cours du forage. Il faut souvent arriver à un compromis entre les caractéristiques des fluides. Une viscosité maximale améliore la mise en suspension des déblais et réduit l'infiltration et l'érosion, tandis qu'une faible viscosité facilite le pompage du fluide, améliore la lubrification et réduit les pertes de charges, accélérant ainsi l'avancement du forage. De plus, une valeur importante de contrainte seuil permet le bon nettoyage du trou et la mise en suspension des solides.

Dans le cas des puits fortement déviés ou horizontaux, les "**cuttings**" se déposent plus rapidement que dans les puits verticaux, par conséquent, ils s'accumulent, formant un lit qui atteint un état stationnaire. Ce dépôt de cuttings engendre des problèmes de couple ("torque") surtout lors des manoeuvres de remontée sans rotation ou circulation. Diverses solutions sont possibles telles que

i) une augmentation de la vitesse annulaire, celle -ci doit être maintenue aussi élevée que possible dans les puits fortement déviés, mais le régime d'écoulement doit être laminaire pour une inclinaison inférieure à 45°.

L'épaisseur du lit de cuttings croît avec l'inclinaison du puits jusqu'à atteindre un état stationnaire. Néanmoins, il décroît lorsque le débit augmente. Au delà d'un certain débit critique, l'épaisseur du lit de cuttings est pratiquement nulle ;

- ii) une augmentation de la densité de la boue, celle –ci entraîne l’amélioration du nettoyage du trou et la diminution du débit requis pour nettoyer le trou;
- iii) une augmentation de la contrainte seuil, qui permet d’améliorer le nettoyage de l’annulaire (pour un régime laminaire). Pour un angle supérieur à 70° l’effet de YP décroît ;
- iv) une augmentation du rapport YP/PV, qui permet d’améliorer le nettoyage du trou, et enfin
- v) une réduction du gel car une boue thixotrope associée à la non-rotation entraîne la formation d’une couche de fluide quasiment immobile au fond du trou, d’où la rétention des cuttings (principalement des fines).

1.4.3 PH :

Une solution aqueuse peut contenir divers ions ; elle contient toujours, plus ou moins grande quantité, des ions H^+ et OH^- dissociés (**Ricard, 1958**).

Pratiquement le pH des boues couramment utilisées varie entre 6 et 13.5 environ. Les boues dont le pH est inférieur à 10.5 sont dites à bas pH. Celles dont le pH est supérieur à 10.5 sont dites à pH élevé (**Garcia et Parigot, 1968**).

Le pH est mesuré :

- i) Soit par une méthode colorimètre (papier pH ou Indicateurs colorés) ;
- ii) Soit par une méthode électrométrie (pH-mètre). au moyen d’électrodes en verre.

1.4.3 Alcalinité :

La mesure du pH. Pour si mile qu'elle soit, est Insuffisante pour permettre un bon contrôle de cette boue. Elle est d'ailleurs parfois délicate, surtout aux pH élevés, cas où d'ailleurs elle manque de sensibilité (**Ricard, 1958**) (**Garcia et Parigot, 1968**).

Une mesure complémentaire est celle des alcalinités. Tandis que la mesure du pH donne la concentration en Ions H^+ (ou OH^-) libres, la mesure des alcalinités donne les concentrations en bases solubles ou Insolubles. Dans le cas des boues, ces bases sont principalement les carbonates, bicarbonates et hydroxydes et à un degré moindre, les silicates, les phosphates, les aluminates et les bases organiques (**Garcia et Parigot, 1968**).

Pratiquement, on mesure trois alcalinités : pb. pf. Mf : b signifie boue, f filtrat. P phénophtaléine. M méthylorange (on utilise parfois le bleu de bromophénole dont le virage est plus facile à observer que celui du méthylorange). Le virage à la phénophtaléine se produit à pH égale à 8.2 et celui du méthylorange est de 4.2.

L'alcalinité pb est définie comme la quantité d'acide H_2SO_4 . N/50 nécessaire pour neutraliser 1 cm^3 de boue prélevée avec une seringue hypodermique,

dilué avec de l'eau distillée. Le dosage doit être très rapide, car ce dosage a pour but de déterminer la teneur de la boue en $\text{Ca}(\text{OH})_2$. En présence souvent de carbonates.

L'alcalinité pf et Mf est déterminée de la même façon que l'alcalinité Pb. sauf qu'on utilise 1cm³ de filtrat de la même boue. Une boue à l'amidon, à pH élevé, doit effectivement contenir des Ions OH⁻. C'est une garantie contre la fermentation de l'amidon (**Ricard, 1958**) (**Garcia et Parigot, 1968**).

Interprétation des résultats obtenus après le dosage :

- Si pf=0, il n'y a que des ions $\text{CO}_3 \text{H}^-$ dans le filtrat.
- Si pf=Mf, il n'y a que des ions OH⁻ dans le filtrat.
- Si 2.pf=Mf, il n'y a que des ions CO_3^{--} dans le filtrat.
- Si 2.pf > Mf il n'y a présence de OH⁻ et CO_3^{--} dans le filtrat
- Si 2.pf < Mf il n'y a présence de CO_3^{--} et $\text{CO}_3 \text{H}^-$ dans le filtrat.

1.4.3 Propriétés de filtration des fluides de forage.

La filtration du fluide de forage se produit sous l'effet de la pression différentielle (différence entre la pression du fluide et celle de la formation) lorsque le fluide se trouve au contact d'une paroi poreuse et perméable.

La pression dans le puits étant supérieure à celle de la formation, du liquide pénètre dans la formation tandis que les solides présents dans la boue sont déposés (gâteau ou cake). Deux sortes de filtration ont lieu pendant le forage : la filtration statique, lors de l'arrêt de la circulation du fluide, et la filtration dynamique au cours de la circulation du fluide, qui entraîne une érosion du cake formé.

Les propriétés de filtration des fluides de forage doivent être aussi évaluées et contrôlées par des tests régis par les recommandations de l'API. Ce sont des tests en régime statique utilisant un filtre-presse standardisé. Ces mesures peuvent être faites sous conditions de haute pression et haute température.

La filtration du fluide de forage au travers des parois du puits peut avoir des conséquences importantes, d'une part sur le déroulement des opérations (stabilité des parois du puits, avancement de l'outil, coincement de la garniture par pression différentielle, en particulier dans les zones inclinées) et d'autre part, lorsque l'on atteint le réservoir, sur l'endommagement des zones productrices

Une fois l’obstruction amorcée, les éléments les plus fins sont à leur tour retenus, seule la phase liquide envahit la formation, tandis que la phase solide se dépose à l’extérieur, le long de la paroi, en constituant le cake externe. Différentes zones peuvent être distinguées, le cake externe qui tapisse la paroi, le cake interne qui s’étend sur une épaisseur équivalente à quelques diamètres de grain et la zone envahie par les fines particules lors de la pénétration immédiate (**Figure 1.1.2**).

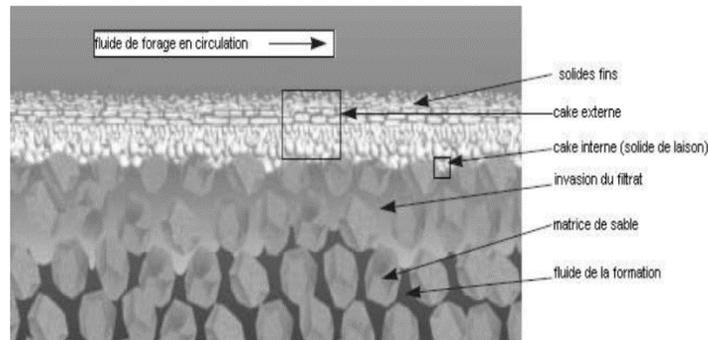


Figure 1. 2 : Formation du cake interne et du cake externe

L’obstruction du milieu poreux est d’autant plus rapide que la concentration en particules est plus élevée. A titre indicatif, les données proposées par la littérature figurent dans le **tableau 1.2**.

Deux types de filtration ont lieu pendant le forage : la filtration dynamique lorsque le fluide est en circulation et la filtration statique pendant l’arrêt de la circulation de fluide.

Tableau 1.2 : Caractéristiques du milieu filtrant (Gray et al., 1980)

Milieu filtrant	Perméabilité, K (D)	Diamètre des particules provoquant l’obstruction (µm)	Concentration en particules à 2,5 cm (kg/m ³)
Roche non consolidée	< 0,1	< 2	-
Roche consolidée	0,100 – 1	10	2,85
Sable non consolidé	1 – 10	74	14 à 28

1.4.3.1 Filtration statique :

Le processus de filtration statique des suspensions classiques des particules solides dans un liquide est d’une manière générale bien connu.

Fergusson et Klotz (1954) ont étudié plus particulièrement le cas des boues de forage et ils ont montré que la filtration de ces fluides ne suivait qu’en partie la théorie classique donnée par :

$$V = K \sqrt{t}$$

....équation 1.5

Avec V : volume du filtrat (cm³), K : perméabilité (mD) et t : temps de filtration (s).

Lors de la filtration statique, le cake s'épaissit continuellement au cours du processus. D'après la loi de Darcy, la vitesse de filtration à travers un gâteau de porosité donnée est de la forme suivante :

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{k \Delta P}{\mu e A} \quad \dots \text{équation 1.6}$$

avec V : Volume filtré (cm³) pendant un temps t , t : temps (s), k : perméabilité du cake ($1D = 1\mu m^2$), ΔP : pression différentielle (Pa ou psi), μ : viscosité du fluide (cP), e : épaisseur du cake (cm) après un temps t et A : Surface (cm²). Cette formule suppose que le gâteau est incompressible.

En général, si la perméabilité et la porosité varient avec la pression, le cake est dit compressible.

La compressibilité des cakes, souvent négligée dans les mesures standard de filtration (**Sharma et Lei, 1991**), peut être exprimée par un paramètre n qui varie en fonction de la taille et de la forme des particules selon :

$$K = K_0 (\Delta P)^{-n} \quad \dots \text{équation 1.7}$$

Avec K_0 : perméabilité initiale

Pour $n=0$, le cake est incompressible et l'augmentation d'une pression provoque une augmentation de la perméabilité (**Sherwood et al. 1991**),

Pour $n=1$, le cake est complètement compressible et le volume filtré est insensible à un changement de pression, Pour des valeurs intermédiaires, l'augmentation de la pression provoque une compaction du cake et réduit sa perméabilité.

4.3.1 Filtration Dynamique

Vu l'importance des mécanismes de filtration dynamique des fluides de forage, plusieurs paramètres ont été étudiés par plusieurs auteurs (**Ferguson et Klotz, 1954 ; Sherwood et al., 1991**). Certains travaux ont montré l'influence de la température (**Plank et al., 1988**), des constituants (**Philip et Smiles, 1982 ; Van Damme, 1992 ; Loeber, 1992 ; Li, 1996**) mais aussi de la pression et de la perméabilité de la formation sur les processus de filtration. D'autres travaux ont porté sur l'étude de fluides typiques utilisés sur chantier et dans des conditions représentatives et des données empiriques ont été obtenues pour modéliser la filtration dynamique des fluides de forage

Ainsi, la composition et les caractéristiques du fluide sont d'une grande importance dans l'invasion du filtrat du fluide.

La différence essentielle entre le cake formé en régime statique et celui formé en régime dynamique réside dans l'érosion subie par le second. Cette érosion dépend à la fois des conditions de circulation du fluide de forage dans l'annulaire, du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), du taux de cisaillement développé en fonction de la vitesse annulaire et de la géométrie du puits et de la garniture, et de la résistance au cisaillement de la couche supérieure du cake.

Durant la filtration dynamique, le débit du fluide s'approche d'une valeur constante (Q_{eq}). Ceci est dû à l'équilibre entre les forces de filtration (résultat de la formation du cake) et les forces hydrodynamiques (circulation du fluide qui tend à éroder le cake) (**Williams, 1940 ; Prokop, 1952**). Lorsqu'un régime stationnaire est atteint après un temps égal à t_{eq} , le débit de filtration du fluide peut être modélisé par une fonction exponentielle :

$$Q = \alpha Q_o + (1-\alpha) Q_o e^{-bt} \quad \dots \text{équation 1.8}$$

avec Q_o : débit du fluide au temps $t = 0$ (c'est-à-dire au début du forage de la formation et avant la formation du cake) :

$$Q_o = \frac{2\pi h K K_{rw}}{\mu_w} \cdot \frac{\Delta P}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad \dots \text{équation 1.9}$$

$$b = 1/t_{eq} \ln(1-\alpha)/\alpha \quad \dots \text{équation 1.10}$$

Les paramètres t_{eq} et α sont reliés au type de fluide utilisé. Pour une solution de fluide à base de bentonite-barite, ces paramètres ont été déterminés empiriquement (**Bilardo et al., 1996**) et sont estimés égaux à $t_{eq} = 15h$ et $\alpha = Q_{eq}/Q_o = 0,2$.

PARTIE

BIBLIOGRAPHIE 01

CHAPITRE 2.

LA RHEOLOGIE DES FLUIDES DE FORAGE.

Introduction :

Etymologiquement, la rhéologie est une discipline qui traite de l'écoulement et des déformations des matériaux sous l'action de contraintes, la rhéologie a été développée pour décrire les propriétés de matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui du solide élastique parfait et celui du fluide newtonien. Le chapitre qui suit vise à définir les principaux paramètres rhéologiques ainsi que les différents types d'écoulement des fluides.

2.1. Notion de mouvement laminaire de cisaillement :

Un matériau soumis à un ensemble de force est susceptible de se déformer, les mouvements des différents points du matériau dépendent bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées, Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré pour certaines distributions de ces forces. Au cours d'un tel mouvement, on considère que le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes. La déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre. Les mouvements laminaires de cisaillement sont engendrés à l'aide de rhéomètre. C'est à partir de tels mouvements que peuvent être déterminés les paramètres rhéologiques des fluides.

2.2. Contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement (notée τ) est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche : elles sont appelées force de cisaillement (figure.2.1)

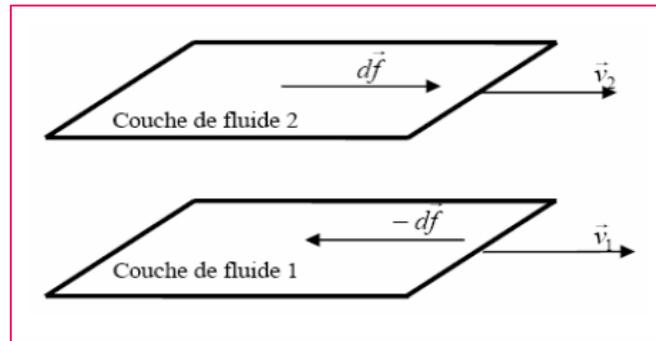


Figure 2.1 : forces agissant sur éléments de couches voisines.

On définit la contrainte de cisaillement τ par équation 2.1

$$\tau = \frac{df}{ds} \quad \dots \text{équation 2.1}$$

τ : représente une force par unité de surface ; elle s'exprime en newton par m^2 ou bien plus commodément en pascal (Pa) et ds est la surface élémentaire de l'entité considérée.

Il est à noter que dans le calcul de la résultante des forces. Les forces de pression s'exerçant perpendiculairement à la surface ne sont pas prise en charge, du fait de leur faible valeur en comparaison des forces de cisaillement.

2.3. Déformation et vitesse de cisaillement :

Ces deux grandeurs constituent les grandeurs cinématique fondamentales en rhéologie

La définition de la déformation de cisaillement est représentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, et l'autre immobile.

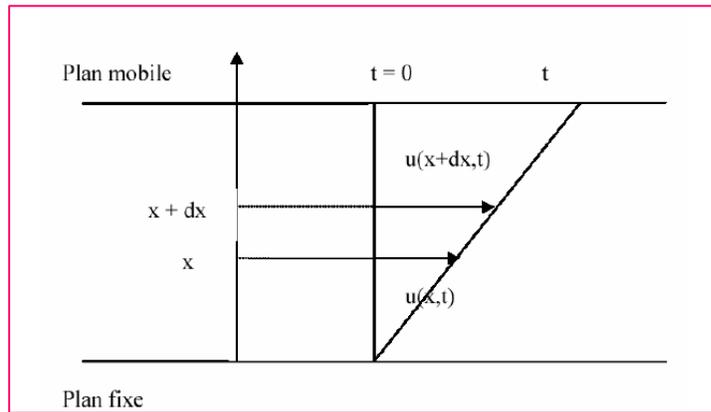


Figure 2.2 : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.

On considère arbitrairement que les particules de matière de deux couches adjacentes se trouvent à l’instant $t=0$ dans une section droite. A l’instant t postérieur, les particules auront parcouru la distance $u(x,t)$ pour la particule située à l’abscisse x et $u(x+dx,t)$ pour la particule située à l’abscisse $x+dx$.

La déformation de cisaillement définie par

$$\gamma = \frac{du(x,t)}{dx} \quad \dots \text{équation 2.2}$$

Cette grandeur sans dimension, elle ne dépend pas du déplacement $u(x,t)$ lui-même mais par la variation de cette déplacement lorsqu’on passe d’une couche a une couche infiniment proche.

L’expression de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) est donnée par

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad \dots \text{équation 2.3}$$

Il s’agit de la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement, $\dot{\gamma}$ s’exprimer en s^{-1} .

2.4. Equation d’état :

La détermination de ces deux grandeurs (contrainte et vitesse de cisaillement) permet de définir l’équation rhéologique d’état du matériau. C’est-à-dire la relation les unissant ($\gamma=f(\tau)$) ou bien $\dot{\gamma} =f(\tau)$ les rhéogrammes sont les courbes traduisant graphiquement l’équation rhéologique d’état du matériau. La représentation la plus courante consiste à exprimer la variation de contrainte de cisaillement avec celle de la vitesse de cisaillement.

La détermination de ces paramètres permet, entre autre, d’obtenir la viscosité de fluide étudié

(Dans le cas des fluides newtonien), grandeur suffisant bien souvent à caractériser de manière précise le comportement rhéologique de fluide étudié. La viscosité s'exprimer en Pa.s elle est notée μ . Le tableau suivant donne des valeurs de viscosité de substances usuelles a température ambiante (ta).

Tableau 2.1 : quelques ordres de grandeur des valeurs des viscosités de différents matériaux à température ambiante (ta).

Matériaux	Viscosité (Pa.s)
Air	10^{-5}
Eau	10^{-3}
Huile d'olive	10^{-1}
Glycérine	0
Miel	10
Polymère fondus	10^3

2.5. La viscosité :

La notion de viscosité traduit une résistance a la déformation ou bien au glissement relatif des couches adjacentes du fluides l'unes par rapport aux autres.

C'est une grandeur d'intérêt capital en rhéologie ; sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du fluide. On définit différents co efficient de viscosité :

2.5.1. La viscosité dynamique ou apparente (μ_a) :

C'est le rapport de la contrainte par vitesse de cisaillement correspondante :

$$\mu_a = \frac{\dot{\gamma}}{\tau} \quad \dots\text{équation 2.4}$$

2.5.2. La viscosité cinématique (v) :

$$v = \frac{\mu_a}{\rho} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad \dots\text{équation 2.5}$$

ρ : masse volumique du fluide [Kg/m²].

2.5.3. La viscosité relative, spécifique, intrinsèque : Elle est utilisée souvent dans l'étude des solutions ou des suspensions pour déterminer les influences respectives du soluté et du solvant sur le comportement rhéologique.

On utilise fréquemment les viscosités suivantes :

➤ Viscosité relative : $\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_s}$ équation 2.6

➤ Viscosité spécifique : $\mu_{sp} = \frac{\mu - \mu_s}{\mu_s} = \mu_{rel} - 1$ équation 2.7

➤ Viscosité intrinsèque : $[\mu] = \lim_{\substack{C \rightarrow 0 \\ \dot{\gamma} \rightarrow 0}} \left[\frac{\mu_{sp}}{C} \right]$ équation 2.8

μ et μ_s représentent respectivement la viscosité dynamique de la solution et solvant.

C : concentration de solution.

Et μ_{rel} avec μ_{sp} sont des grandeurs sans dimension.

$[\mu]$: est homogène à l'inverse de la concentration

2.6. Typologie de l'écoulement :

L'écoulement des fluides newtoniens est le cas le plus simple que l'on puisse rencontrer dans la pente de la droite alors obtenue en traçant la rhéogramme est la viscosité du fluide.

Tous les fluides homogènes pour lesquels la dissipation d'énergie est due aux collisions d'espaces moléculaires relativement petites ont un comportement newtonien (gaz, liquide usuels et solutions de molécules de faible poids moléculaire).

La majorité des fluides présentent toutefois des comportements non newtoniens qui font appel à l'utilisation de modèles plus complexes pour décrire leur comportement en écoulement.

Il est possible d'effectuer une classification rhéologique. Nous distinguons trois catégories principales de fluide :

- Les fluides indépendants du temps ;
- Les fluides dépendants du temps ;
- Les fluides viscoélastiques.

2.6.1. Les fluides indépendants du temps :

Ce sont des fluides pour lesquels la contrainte de cisaillement τ est en fonction seulement avec la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$. Leur comportement rhéologique est indépendant de la durée d'application de la contrainte. Ce type de fluides subdivisé en fluide newtonien, non newtonien et fluide viscoélastique.

2.6.1.1. Les fluides newtoniens :

Ils sont caractérisés par l'équation d'état :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad \dots \text{équation 2.9}$$

τ : La contrainte de cisaillement [Pa].

$\dot{\gamma}$: La vitesse de cisaillement [S^{-1}].

μ : La viscosité dynamique de fluide [Pa.s].

La viscosité dynamique indépendante de la contrainte appliquée et du temps. Elle ne dépend que de la température. De la pression et de la nature du fluide.

2.6.1.2. Les fluides non newtoniens :

Ce sont tous les fluides pour lesquels la relation entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement n'est pas proportionnelle. Les raisons du caractère non newtonien d'un fluide sont liées à la taille des particules, leur concentration dans la phase continue, leur nature, leur forme, leur aptitude à la déformation ou bien encore la réactivité physico-chimique de la phase continue notamment dans le cas de suspensions colloïdales. Ils sont caractérisés par la relation général suivent :

$$\tau = \mu_a \cdot \dot{\gamma} \quad \dots \text{équation 2.10}$$

Avec μ_a la viscosité apparente dépendant de la vitesse de cisaillement [Pa.s]

On distingue deux catégories de fluides non newtonien indépendants de temps :

- Les fluides a contrainte critique (seuil) d'écoulement
- Les fluides sans contrainte critique (seuil) d'écoulement

2.6.1.2.1. Fluides a contrainte critique :

Cette catégorie de fluide est aussi communément désignée par l'appellation fluide plastique, **la figure 2.3.** « courbes d'écoulement de fluide présentant une contrainte critique » donne une vue des courbes d'écoulement les caractérisant. Il s'agit de fluides ne s'écoulant pas avant qu'il leur soit appliqué une contrainte de cisaillement minimale appelée seuil d'écoulement.

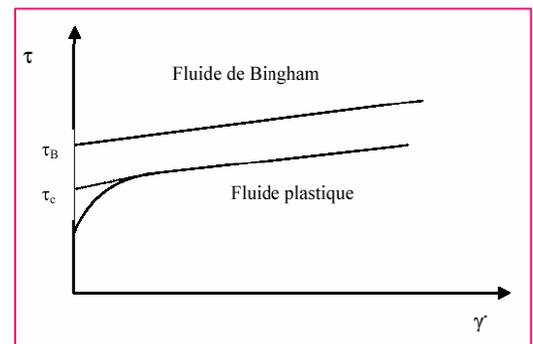


Figure 2.3 : courbes d'écoulement.

Le tableau suivant récapitule lois d'écoulement rhéologiques utilisées pour décrire les comportements de tels fluides.

Tableau 2.2 : modèles rhéologique décrivant l'écoulement de fluide a contrainte a seuil
(Midoux, 1988)

Modèle	Loi rhéologique
Bingham	$\tau = \tau_B + \mu_B \cdot \dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_H + K \cdot \dot{\gamma}^n$
Casson général	$\tau^n = \tau_C^n + (k_c \cdot \dot{\gamma})^n$
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_C^{1/2} + (k_c \cdot \dot{\gamma})^{1/2}$

Le modèle d'**Hershel-Bulkley** est celui permettant de décrire la plupart des fluides plastique, la courbe d'écoulement de tels fluides finit par devenir rectiligne au-delà d'une certaine contrainte critique appliquée.

Le modèle de **Bingham** est le plus simple de ces modèles, le fluide de **Bingham** s'écoule lorsqu'un seuil minimal de contrainte τ_b est dépassé. Ce modèle permet de décrire le comportement rhéologique de nombreux matériaux (boue de forage, peintures à l'huile, ...).

Les systèmes étudiés dans le présent manuscrit sont des fluides rhéofluidifiants qui obéissent au modèle d'**Hershel-Bulkley**. Le comportement rhéofluidifiant se caractérise par une viscosité qui diminue quand le gradient de cisaillement augmente (shear thinning ou pseudoplastique). Les produits rhéofluidifiants présentent souvent un comportement newtonien pour les gradients de cisaillement très élevés.

Les suspensions, émulsions, polymères en solution sont constitué au repos de particules de formes irrégulières, gouttelettes ou chaines emmêlées que constituent une viscosité élevée car ayant une forte résistance à l'écoulement. Soumis une contrainte, l'écoulement s'accélère, les particules s'orientent, les chaines se démêlent parallèlement à la force d'entraînement ainsi opposent ainsi une résistance plus faible. La viscosité diminue.

2.6.1.2.2. Les fluides sans contrainte critique :

La figure présente les courbes d'écoulement des deux principes catégories de fluides sans contrainte critique, à savoir les fluides pseudo-plastiques ou rhéofluidifiante et les fluides dilatants ou rhéopaississants.

Pour les fluides pseudoplastiques, le rapport $\tau/\dot{\gamma} = \mu_a$ est à peu près constant

pour les plus faibles valeurs de vitesse de cisaillement imposées et vaut μ_a . Ce rapport décroît ensuite progressivement lorsque la vitesse de cisaillement augmente, jusqu'à atteindre une valeur de viscosité limite (μ_∞).

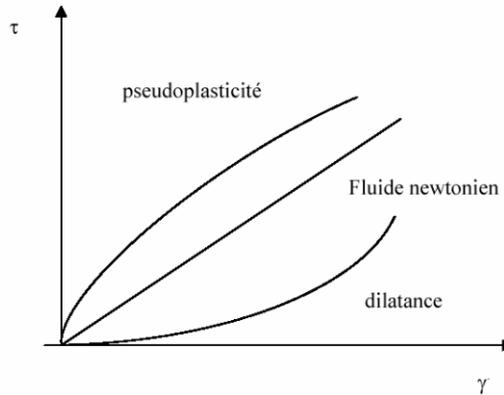


Figure 2.4 : courbes d'écoulement des principales catégories de fluide sans contrainte

Les principales lois rhéologiques décrivant le comportement de tels fluides sont présentées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : lois rhéologiques de fluide ne présentant pas de contrainte (Midoux, 1988).

Modèle	Loi rhéologique
Ostwald de Waele	$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$
Ellis	$\tau = \left[\mu_0 / (\tau / \tau_{1/2})^{\alpha-1} \right] \dot{\gamma}$
Sisko	$\tau = \mu_0 \cdot \dot{\gamma} + k \cdot \dot{\gamma}^n$
Reiner Phillipoff	$\tau = \left[\mu_\infty + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)}{1 + (\tau / \tau_s)^2} \right] \dot{\gamma}$
Prandtl - Eyring	$\tau = \tau_0 sh^{-1}(\tau_0 \cdot \dot{\gamma})$
Carreau	$\tau = \left[\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \cdot (1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{(n-1)/2} \right] \dot{\gamma}$
Cross	$\tau = \left[\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) / (1 + \dot{\gamma} \cdot t_1)^P \right] \dot{\gamma}$

Parmi ces modèles d'écoulement, lois d'Ostwald de Waele est la plus communément utilisée. Dans ce modèle, k est appelée consistance du fluide et n l'écart de l'exposant ou l'indice d'écoulement à l'unité (0<n=1) traduit la non perfection visqueuse du fluide considéré. Parmi les fluides présentent un comportement pseudoplastique, on compte les suspensions de particules asymétrétrique, les ciments, les colles, certaines peintures.

Les fluides dilatants obéissent également à une loi puissance d'Ostwald mais avec n>1, la viscosité apparente croît avec la vitesse de cisaillement qui augmente. Cette catégorie de fluides est beaucoup plus rare que les fluides peudoplastiques. Elle se rencontre essentiellement pour

La suspension à forte teneur en matière solide (concentration volumique supérieure à 50%). Ce type de comportement peut avoir pour origine une transition ordre-désordre entre les particules constitutives du fluide. Pour les plus faibles vitesses de cisaillement, les particules sont plus ou moins alignées alors que pour les plus fortes valeurs de vitesse de cisaillement, elles sont dispersées aléatoirement, ce qui induit une viscosité qui augmente lorsque le désordre l'installe au sein de fluide.

2.6.2. Les fluides dépendants du temps :

Le comportement des fluides dépendant du temps est caractérisé par l'évolution de leur structure interne. Cette modification peut être très rapide ; dans ce cas, le temps n'intervient pas de manière apparente dans les équations d'écoulement et la viscosité apparente est fixée uniquement pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement. Par contre, si la modification de la structure interne du fluide est lente, les caractéristiques de l'écoulement du fluide seront influencées par les traitements antérieurs et la viscosité apparente dépendra dans ce cas d'un autre paramètre : Δt .

On distingue deux catégories dans ce type de fluide :

- Les fluides thixotropes.
- Les fluides rhéopexes.

2.6.2.1. Les fluides thixotropes :

La consistance de tels fluides dépende aussi bien de la vitesse de cisaillement que de la durée du cisaillement. Dans ces conditions, la viscosité apparente n'est plus fixée pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement mais dépend également du paramètre temps. Ainsi, l'écoulement d'un matériau peut être facilité par une agitation préalable d'échantillon à étudier. La méthodologie utilisée pour déterminer le caractère thixotrope de fluide consiste le plus souvent en application d'un cycle de cisaillement montée-palier-descente (cisaillement croissant- cisaillement constant- cisaillement décroissant).

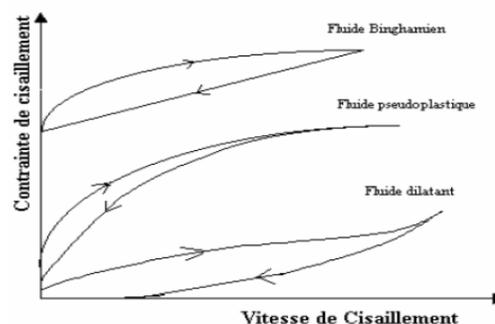


Figure 2.5 : boucle d'hystérésis de fluide thixotrope

2.6.2.2. Les fluides rhéopexes :

Cette catégorie de fluides présente un comportement contrairement aux fluides thixotropes. Lorsqu'ils sont soumis à un faible cisaillement, leur structure interne s'organise et par conséquent conduit à une augmentation de la viscosité.

2.7. Les fluides viscoélastiques :

Le mot viscoélastique veut dire l'existence simultanée des propriétés élastiques et visqueuses dans un matériau [15]. Tous les liquides présentent des propriétés visqueuses, certains possédant une structure complexe peuvent également présenter des propriétés élastiques. Ce comportement se manifeste notamment lorsqu'on applique ou lorsqu'on supprime brutalement un cisaillement par l'apparition d'un régime transitoire pendant lequel la structure de l'échantillon évolue avant de se stabiliser. La détermination des propriétés viscoélastiques de certains matériaux passe par la mise en place d'une analyse oscillatoire. Ce type de test consiste à imposer à l'échantillon un cisaillement oscillatoire de pulsation donnée ω . Lors de ces tests, la contrainte $\tau(t)$ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}(t)$ évoluent sinusoïdalement au cours du temps.

2.7.1. Viscoélasticité linéaire :

Un fluide viscoélastique récupère une partie de ses déformations après suppression des contraintes et la contrainte associée à une déformation, diminue dans le temps. Tous les matériaux présentent un comportement linéaire à condition que les contraintes et les déformations auxquelles ils sont soumis demeurent suffisamment faibles. Dans la pratique on admet que si $\varepsilon < 10^{-2}$ presque tous les matériaux peuvent être considérés comme linéaires.

Le comportement linéaire est évidemment relié à l'aptitude du matériau à supporter des déformations, sans modification de sa structure microscopique : à cet égard, on peut considérer que l'étude des propriétés viscoélastiques linéaires permet de caractériser la structure « au repos ». Au contraire, la transition vers un régime non linéaire (à partir d'un certain seuil de déformation) s'accompagne le plus souvent d'une modification structurelle.

En rhéologie la frontière entre solide et liquide est souvent mal définie. On adopte les définitions suivantes :

- Une substance est solide si. Soumise à une contrainte constante ne provoquant pas la rupture elle tend vers un état d'équilibre statique, pour lequel sa déformation demeure constante. Un solide élastique parfait sera symbolisé en rhéologie par un ressort de coefficient de complaisance J Figure 2.6.

- Une substance est liquide si, soumise à une contrainte constante, elle n’atteint jamais un état d’équilibre statique : sa déformation augmente indéfiniment, la substance s’écoule. Le liquide visqueux newtonien sera symbolisé en rhéologie par un amortisseur de coefficient de viscosité μ Figure2.7.

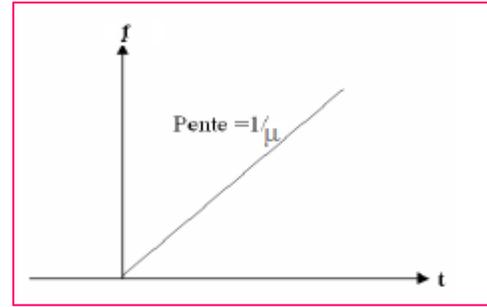
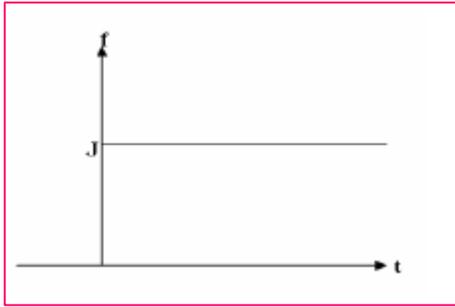


Figure2.6. représentation comportement élastique du corps solide & Figure2.7. visqueux du liquide.

Le comportement viscoélastique de fluides peut être décrit conceptuellement comme résultant de l’association de ressorts et d’amortisseurs. Toutes les associations de ressorts et d’amortisseurs, aussi complexes soient-elles, correspondait à un comportement viscoélastique linéaire.

A partir des lois d’association en série et en parallèle, on peut établir l’équation rhéologique de chaque modèle et en déduire les fonctions fluage et relaxation dans chaque cas particulier. H s’avère toutefois que les modèles de **Kelvin-Voigt** et de **Maxwell** généralisés suffisent pour déduire n’importe quelles fonctions de fluage et de relaxation. Le modèle de Maxwell correspond à l’association en parallèle de n liquides de Maxwell, chacun d’eux étant constitué par un ressort et un amortisseur en série.

Le modèle de **Kelvin-Voigt** généralisé est pour sa part constitué par l’association en série d’un liquide de Maxwell et de n solides de **Kelvin-Voigt** (constitué lui-même par l’association ai parallèle d’un ressort et d’un amortisseur).

Relation générale du comportement viscoélastique :

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{\tau(t)}{\mu} + \frac{1}{G} \frac{d\tau(t)}{dt} . \quad \dots\text{équation 2.11}$$

Exemple du solide de **Kelvin-Voigt** avec $\tau = \tau_0 = \text{cte}$ pour $t \gg 0$ et $\gamma = 0$ pour $t < 0$:

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{G} [1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}] . \quad \dots\text{équation 2.12}$$

Avec $\lambda = \mu / G$.

Le facteur temps intervient dans l’expression des propriétés viscoélastiques à travers le temps de relaxation (λ). Le temps de relaxation correspond à la durée de valeur λ pendant laquelle la tension γ diminue de 1/e de sa valeur initiale. Si $t \gg \lambda$ alors :

$$\gamma(t) = \tau \left[j + \frac{t}{G} \right]. \quad \dots \text{équation 2.13}$$

Les fonctions de fluage $J(t)$ et de relaxation $G(t)$ caractérisent l'écoulement des fluides viscoélastiques selon les modes de mesures en cisaillement simple.

Les propriétés viscoélastiques correspondantes ne sont donc pas aisées à déterminer et leur caractérisation ne fournit pas de paramètres clés rapidement identifiables. De plus, la méthode de sollicitation en cisaillement simple repose sur des échelons de contrainte (fluage) ou de déformation (relaxation) imposés de façon instantanée. En réalité, ce principe théorique est confronté à l'inertie mécanique du système de mesure des Rhéomètres. C'est pourquoi on utilise les propriétés de réponse oscillatoire des fluides viscoélastiques soumis à des sollicitations de type sinusoïdales en fonction du temps.

2.7.2. Paramètres complexes :

En mode dynamique, on applique des contraintes ou des déformations qui répondent à des fonctions sinusoïdales du temps (t) de pulsations données (ω) qui ne provoquent pas l'écoulement du fluide. A l'instant initial on a :

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cos(\omega t). \quad \dots \text{équation 2.14}$$

$$\tau(t) = \mu \omega \gamma_0 \cos(\omega t + \phi) = \tau_0 \cos(\omega t + \phi). \quad \dots \text{équation 2.15}$$

La contrainte mesurée (τ) est en déphasage permanent avec la déformation (γ) d'un angle ϕ compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$. En fonction du temps de mesure (t), ce décalage par rapport aux conditions initiales devient tel que :

$$\gamma(\omega t) = \gamma_0 \cdot e^{j\omega t} = \gamma_0 (\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)). \quad \dots \text{équation 2.16}$$

Soit $\gamma(\omega t) = \gamma'(\omega t) + j\gamma''(\omega t)$ de même $\tau(\omega t) = \tau'(\omega t) + j\tau''(\omega t) \quad \dots \text{équation 2.17...2.18}$

Par analogie avec le solide de **Hooke**, on définit un module de rigidité complexe $G^*(\omega)$.

$$G^*(\omega) = \frac{\tau(\omega t) - \tau_0}{\gamma(\omega t) - \gamma_0} e^{j\phi} = \tau(\omega t) = G'(\omega) + j G''(\omega). \quad \dots \text{équation 2.19}$$

La rigidité d'accumulation $G'(\omega)$ traduit la capacité du fluide à conserver l'énergie sous forme élastique (en phase avec γ). Les propriétés visqueuses sont exprimées par la rigidité de dissipation $G''(\omega)$ (déphasage de $\frac{\pi}{2}$ avec γ).

CHAPITRE 3.

LES POLYMERES.

Introduction :

Les polymères ont été employés dans les fluides de forages pendant les années 30, quand l'amidon de maïs a été ajouté comme additif pour réduire les pertes de fluide dans les formations poreuses. Depuis cette date, les polymères sont devenus très spéciaux et leur utilisation a augmenté en conséquence. Les polymères font partie pratiquement de chaque système à base d'eau utilisé de nos jours. En effet, quelques systèmes sont totalement à base de polymères dépendant et ils sont largement appelés systèmes de polymères. Une large gamme de polymères est disponible aujourd'hui. Quelques polymères-comme l'amidon, parce que l'exemple provient des sources naturelles. Les polymères les plus spéciaux sont les polymères naturel modifiés, alors que d'autres polymères plus sophistiqués sont dérivés toujours des synthétiques du potentiel illimité de la technologie de polymères, il est possible d'analyser une situation à un niveau moléculaire et concevoir un polymère avec des propriétés spécifiques pour dresser la situation. Pour cette raison, les polymères ont un avenir intéressant dans le domaine des fluides de forage.

Les polymères hydrosolubles revêtent une grande importance pour de nombreuses applications industrielles. L'industrie pétrolière est en particulier une grande consommatrice de polymères pour diverses opérations de récupération d'huiles : forage, fracturation, modification de perméabilité, cimentation, colmatage, contrôle de mobilité des phases aqueuses (G.Muller, 1990).

3.1. Définition :

Un polymère est un système formé par un ensemble de macromolécules, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande dimension, issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre répétitives plus communément appelées unités (ou motifs) monomères [17]. Ils peuvent se présenter :

- En chaînes linéaires avec une répétition linéaire n fois du motif X (homopolymère) ou de deux ou plusieurs motifs (copolymères XY par exemple).



linéaire : branchés ou en réseau.

Lorsque ces polymères présentent des groupements de charges anioniques ou cationiques, on les appelle des polyélectrolytes

3.2. Classification des polymères.

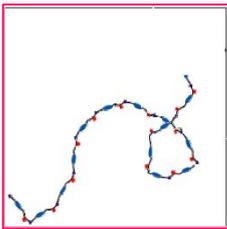
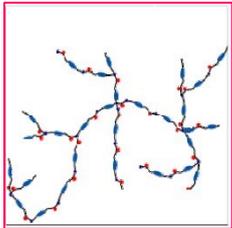
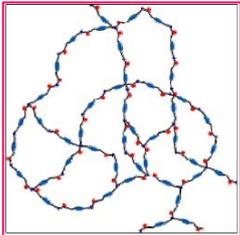
- **Selon leur origine, on peut les classer en trois catégories ;**
 - **Les polymères naturels :** sont issus des règnes végétal ou animal ; les exemples les plus connus, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...) celle des protéines (laine, soie...), le caoutchouc naturel, etc.
 - **Les polymères artificiels :** sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés, les esters cellulosiques ont toujours connus une certaine importance économique.
 - **Les polymères synthétiques :** Totalement issus de génie de l'homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères.
- **Selon leur domaine d'application,** il est difficile de proposer une classification exhaustive tout la variété des propriétés a multiplié les applications des polymères, comme matériaux en particulier, polystyrène, les polyamides, les polymères thermostables, adhésifs, etc.
- **Selon leur structure (dimensionnalité),** les polymères peuvent encore être classés en trois catégories
 - Celle des polymères linéaires (ou monodimensionnels), pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constitué d'un nombre élevé mais fini d'unités monomères. De tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents.

➤ Celle des polymères tridimensionnels, qui résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique de polymères linéaires leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule.

Les liaisons se développent dans les trois dimensions.

Les différentes structures des polymères sous lesquelles elles peuvent être rencontrées sont dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Représentation schématique des structures de polymère.

Type de structure	Schéma de structure	Exemples
Linéaire ou monodimensionnel		CMC , PHPA, HEC.....
Branché ou bidimensionnel		Amidon, gomme de Xanthane....
Réticulé ou tridimensionnel		gomme de Xanthane reticulé.

Il y a une possibilité infinie dans les conformations structurales des polymères, certaines d'elles et qui affectent les performances des polymères sont :

- Le type du monomère ou des monomères ;
- La masse moléculaire;

- Le type et l'abondance de la modification chimique sur le polymère ;
- Nombre de groupes ramifiés ou réticulés dans la chaîne du polymère.

Les polymères en fluides de forage peuvent être classés en trois manières, ils peuvent être classés selon leur chimie, en tant qu'anionique ou non-anionique, ils peuvent être classés par leur fonction telle que des additifs viscosifiant ou réducteur de filtrat, ou ils peuvent être classés tout simplement par leur origine naturel, naturel modifiés ou synthétique.

3.3. Adsorption des polymères :

L'adsorption des polymères à l'interface solide/liquide est associée à des problèmes variés tel la stabilisation colloïdale, la floculation, l'adhésion, lubrification, etc. la structure des couches de polymères absorbés de même que les quantités de polymères dans ces couches jouent un rôle capital pour ces processus. L'adsorption des polyélectrolytes sur les surfaces minérales est généralement différente de celle des polymères non chargés la différence principale étant liée à l'intervention de forces électrostatiques à longue portée dans le cas des polymères chargés.

L'étude statistique d'une chaîne isolée adsorbée a été l'objet de nombreux travaux dans les années 60. Les boucles sont constituées par la portion de chaînes situées entre deux monomères en contact avec la surface, les trains désignent les sections de chaînes complètement adsorbées sur la surface, tandis que les queues sont les portions terminales de la chaîne, situées entre un bout libre et le plus proche monomère en contact avec la surface. Plusieurs interactions thermodynamiques doivent être prises en compte pour décrire le processus d'adsorption du polymère à la surface d'une particule minérale. Ainsi, les interactions segment-surface, segment-solvant, et segment- segment apportent une contribution à la thermodynamique du processus. D'autres changements sont aussi à considérer si l'on désire obtenir une image complète du système, il s'agit notamment :

- Du changement de conformation du polymère après son adsorption à l'interface;
- Du changement de conformation d'une molécule adsorbée induit par l'adsorption de nouvelles molécules à l'interface;
 - Des phénomènes d'échanges associés à l'adsorption préférentielle de molécules de poids moléculaires élevés ;
 - Du changement du taux d'ionisation de la surface minérale et du polymère liée à une augmentation de la densité entière de charge au voisinage de la surface.

Il convient également de souligner que dans la plupart des situations, l'adsorption d'un polymère sur une surface minérale est limitée par le temps d'accès d'une molécule de polymère vers la surface ; cet accès est contrôlé, suivant le système considéré, soit par la diffusion du polymère soit par la convection.

3.4. Les polymères dans le fluide de forage :

3.4.1. La gomme de xanthane (xanthane) :

Le xanthane est un polysaccharide exocellulaire produit par une bactérie appelée «xanthomonas campestris» intervenant dans le métabolisme de certains végétaux. Il a été découvert en 1940 par des scientifiques américains cherchant la cause d'une maladie affectant les végétaux : un produit visqueux (le xanthane), secrété par ladite bactérie, obstruait les pores respiratoires de ces plantes.

De nombreuses industries exploitent les propriétés rhéologiques remarquables du xanthane. Il est utilisé comme épaississant dans l'agroalimentaire sous la dénomination E415 (assaisonnements, sauces, crèmes, glaces). En cosmétique, il est présent dans les dentifrices, les crèmes ou les gels. L'industrie pétrolière l'utilise pour la récupération assistée du pétrole en tant qu'agent viscosifiant. La liste des applications est encore longue (peinture, vernis, explosifs, etc...) est rend compte de l'importance de ce produit (**G.Muller, 1990**). En raison de sa capacité de causer la floculation, le xanthane est considéré comme biopolymère biodégradable et inoffensive approprié pour le traitement de l'eau et pour des applications semblable (**Yokoi, M., Shraki, M., al.**).

3.4.2. La carboxyméthylcellulose (CMC) et PAC.

Depuis 1947 le **carboxyméthylcellulose (CMC)** a été employé dans divers fluides de forage à base d'eau comme réducteur de filtrat ou comme viscosifiant. La molécule de base a été synthétisée en 1930 en Allemagne durant la première guerre mondiale (**Rosnah M.S, 2004**). Au commencement la CMC a été employé pour stabiliser les boues à base d'eau chargée avec des particules d'argile. Plus tard l'interaction de molécule CMC avec des argiles a été étudiée, et caractère anionique des molécules a été changé pour arriver à un certain niveau d'inhibition d'argile, ceci a eue comme conséquence l'apparition des polymères polyanionique de cellulose (ou PAC) appliqués largement dans les fluides a base d'eau aujourd'hui (**Steve Young, al.2001**).

3.4.2.1. Définition.

La CMC est un polymère linéaire de cellulose d'éther, anionique et biodégradable. Il est un des plus souples des hydrocolloïdes hydrosolubles

Et à certain nombre de propriétés importantes comprenant la solubilité, la rhéologie, l'adsorption sur des surfaces, etc. Indépendamment de ces derniers, la viscosité et le degré de substitution (DS) sont les deux propriétés principales du CMC qui déterminent la fonctionnalité, dont toutes les deux peuvent être réglés pendant le traitement.

La CMC est préparé par modification chimique de la cellulose. La cellulose est un polyholoside constitué de macromolécules linéaires formées par l'enchevêtrement de motifs β -D-glucose, chaque motif étant tourné de 180° par rapport à son motif voisin. D signifie qu'en projection de Fisher, le groupement hydroxyde secondaire du glucose porté par le carbone le plus éloigné de la fonction aldéhyde $H-C=O$ est à droite, β signifie que tous les substituants (atomes ou groupes d'atomes autre que H) sont en position équatoriale. L'oxygène hémi-acétatique et l'hydroxyle 2 forment des ponts holosidiques.

La cellulose naturelle est insoluble dans l'eau même en solution diluée parce que les atomes d'hydrogènes des groupements hydroxyles forment des liaisons intra et intermoléculaires qui rendent impossible la dissociation des chaînes. Une méthylation partielle écarte les chaînes et affaiblit cette interaction, la cellulose devient alors soluble dans l'eau.

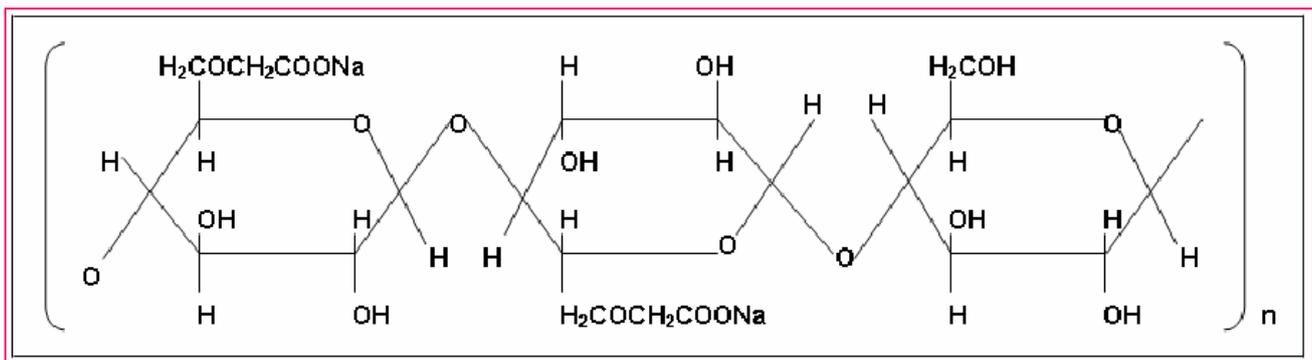
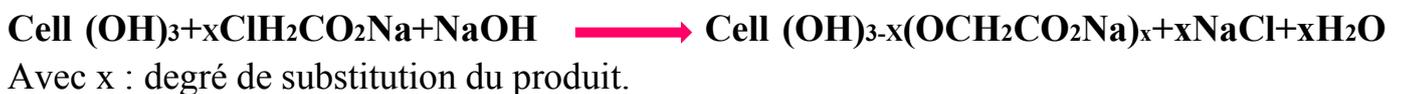


Figure 3.1 : structure chimique de PAC

3.4.2.2. Influence des électrolytes:

La CMC à classer dans la catégorie des polymères flexibles puisque sa longueur de persistance est de l'ordre de 7 nm. Il résulte comme nous l'avons expliqué précédemment, que lorsqu'on ajoute du sel à une solution de la CMC, ces dimensions en solution diminuent fortement.

En présence d'ions di- ou multivalents, les fonctions carboxyliques présentent sur les chaînes sont susceptibles de fixer les ions multivalents provoquant une agrégation du polymère ou même une précipitation par pontage intermoléculaire par liaisons entre les ions Ca^{2+} et les groupes $-\text{COO}-$ appartenant à différentes chaînes enchevêtrées dans la solution, les résultats de la littérature montrent que la stabilité des solutions des CMC en présence de cations divalents dépend fortement de la concentration en polymère.

Une caractéristique du PAC est le degré de substitution (DS) du groupe carboxyméthyl qui est supérieur à 0,8. Le polyanionique de cellulose est employé principalement comme réducteur de filtrat pour les boues à base d'eau douce et d'eau de mer mais il agit également en tant que viscosifiant dans ces systèmes. Le PAC est disponible en deux catégories (viscosité élevée et faible), de ce qui donne les mêmes degrés de réduction de filtrat mais différents degrés de viscosité. La stabilité thermique du PAC est de 149°C et il n'est pas sensible à la dégradation bactérienne (**Senthil Kumer, Vikas Mahto et V P 2003**).

3.4.3. Le polyacrylamide partiellement hydrolysé PHPA.

Le polyacrylamide (PAM) dans sa forme partiellement hydrolysé (PHPA), a été employé dans le domaine d'exploitation pétrolière bien plus fréquemment que la gomme de xanthane. Le PHPA est un polymère de haut poids moléculaire, de nature anionique, de la famille des polyacrylamides, formé de chaînes linéaires de monomères d'acrylamide dont certains ont été hydrolysés, comme il est présenté sur la figure III.5. Le degré d'hydrolyse peut être établi par titration potentiométrique. Le polyacrylamide et un nombre de ses copolymères ont été employés dans plusieurs parties de l'industrie pétrolière ; comme inhibiteur dans les fluides de forage.

Une classe des boues à base d'eau emploie le polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA) comme additif fonctionnel, pour l'encapsulation des déblais et la stabilisation des argiles. Le PHPA joue aussi le rôle de viscosifiant, réducteur de friction et floculant lorsque il apporte une réduction du filtrat. Le PHPA peut être utilisé dans les fluides de forage contenant de faibles quantités de solides alourdis, utilisé soit dans de l'eau fraîche et/ou dans de l'eau salée. Le PHPA est utilisé pour sceller les microfissures et couvrir les surfaces d'argile avec un film qui retarde la dispersion et la désintégration.

KCl est employé comme qu'un inhibiteur d'argile dans la plupart des boues de PHPA conçus. Dans les boues à faibles quantités de solides, le PHPA agit avec des concentrations minimales de bentonite pour lier les particules ensemble et pour améliorer la rhéologie sans augmentation de la charge des solides colloïdaux (**Clark RK 1976, Fraser IJ 1987**).

Il y a trois approches dans la théorie qui peuvent être employés pour synthétiser le PHPA

- La polymérisation directe du radical libre d'acrylamide pur produire le polyacrylamide, suivie par une hydrolyse par acide ou par base de certains groupes d'amide le long de la chaîne principale du polyacrylamide pour donner le PHPA.
- La copolymérisation de l'amide et de l'acide acrylique a des rapports molaires donnés.
- La polymérisation de l'acrylamide pour donner l'acide polyacrylique, suivie par l'aminolysation du polyacrylamide.

Parmi ces trois méthodes, les procédures commerciales utilisent habituellement les deux premières comme une étape du procédé même dans les méthodes une et trois, qui sont montrées comme étant en deux étapes. Il est à noter ici que les conditions utilisées pour l'obtention du PHPA dans le processus industriel peuvent être ajustées pour produire des polymères avec un pourcentage d'hydrolyse donné. Depuis qu'il y a des groupes réactifs latéraux le long de la chaîne du polymère (-COOH et -CONH₂), alors des branchements latéraux et des réticulations peuvent se produire sous certaines conditions, mais ceci peut être aussi contrôlé expérimentalement. La polymérisation peut être effectuée en solution, des procédés de mélange de solvants et en phase dispersée.

Le PHPA est traditionnellement utilisé en même temps que KCl en tant que polymère qui agit par encapsulation d'argile. A des concentrations très élevées, le PHPA est utilisé pour enrober les argiles, améliorant la capacité de charge des déblais et pouvoir lubrifiant de boue. Dans les zones où il y a des problèmes de stabilité de puits, les polymères sont habituellement complétés avec du sel qui fournit un cation pour aider à stabiliser la formation. Le polymère le plus commun utilisé pour se substituer de la boue à l'huile est le système de boue PHPA/KCl. Il a les avantages de donner la stabilité des argiles et d'avoir la bonne capacité de charge. Ses inconvénients sont dus à la contamination par les solides et n'a pas la bonne stabilité thermique.

3.4.4. Amidon :

L'amidon est formé de deux constituants [voir rapport d'avancement] : l'amylose (environ 20%) et l'amylopectine (environ 80 %).

a- Amylose est un polymère linéaire formé d'unités de glucose. Sa masse moléculaire peut varier de 32 000 à 100.000. La jonction entre les cycles du glucose est de type C1(a) - C4.

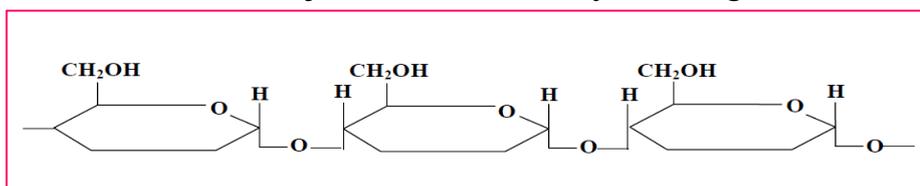


Figure 3.2. Disposition des molécules d'amylose dans le granule d'amidon.

Dans les granules d'amidon, ce polymère se présente (l'amylose) est sous forme cristallisée, en raison, et en particulier, du nombre de liaisons existant entre les hydroxyles. Les liaisons hydrogènes de l'amylose sont responsables de l'adsorption d'eau ainsi que de formation de Concentrées en amylose donnent rapidement des gels amorphes plus ou moins rigides, élastiques, parfois thixotropes.

A la longue, il y a aussi formation de gels cristallins et de précipités irréversibles. La recristallisation par agrégation des molécules linéaires expulse l'eau adsorbée sur ces molécules. Les liaisons hydrogènes entre molécules d'amylose remplacent celles entre l'amylose et l'eau,

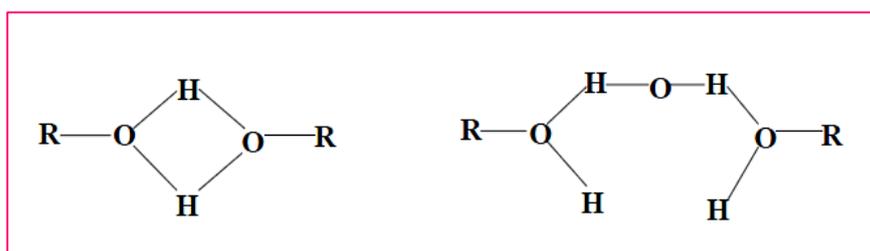


Figure 3.3. Rétention d'eau par l'amidon.

Amylopectine : C'est un polymère ramifié formé d'unités de glucose. Les liaisons sont de types $C1(\alpha)$ - $C4$ sauf au niveau des branchements où elles sont de types $C1(\alpha)$ - $C6$ sa masse moléculaire varie de 200.000 à 1 million environ.

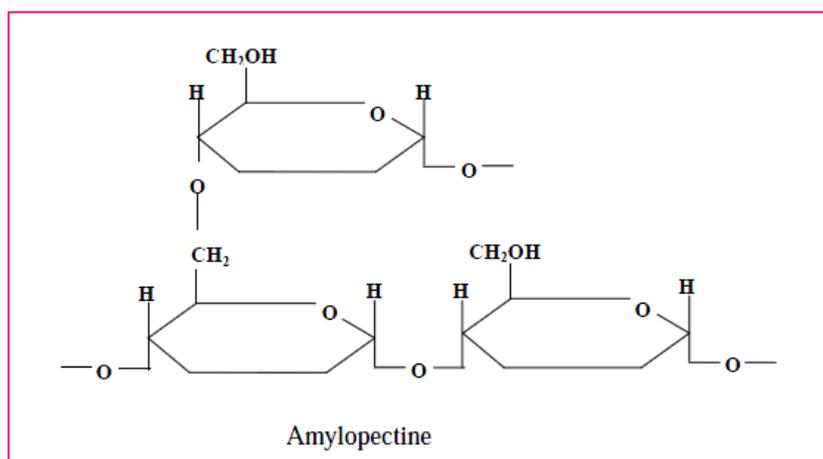


Figure3.4. Disposition des molécules d'amylopectines dans le granule d'amidon.

L'amylopectine absorbe beaucoup d'eau en température et une grande partie responsable du gonflement des granules d'amidon.

Les granules d'amidon riches en amylopectine sont plus faciles à dissoudre dans l'eau, à 95°C. Que ceux qui contiennent beaucoup d'amylose.

Du fait de l'encombrement stérique. Les molécules d'amylopectine n'ont pas tendance à recristalliser, et possèdent, de ce fait, un pouvoir élevé de rétention d'eau, contrairement à celle de l'amylose.

Les amidons naturels résistent mal à un chauffage prolongé, surtout lors de l'agitation intense en milieu acide, un tel chauffage entraîne un éclatement des granules, une solubilisation et une hydrolyse partielle des molécules constitutives et diminution notable de la viscosité.

Les acides causent une hydrolyse partielle de l'amidon en réduisant son poids moléculaires et en formant des dextrans. Le gel formé est alors moins épais. L'hydrolyse par un acide est accélérée par l'élévation de la température, la prolongation de chauffage et la concentration de l'acide,

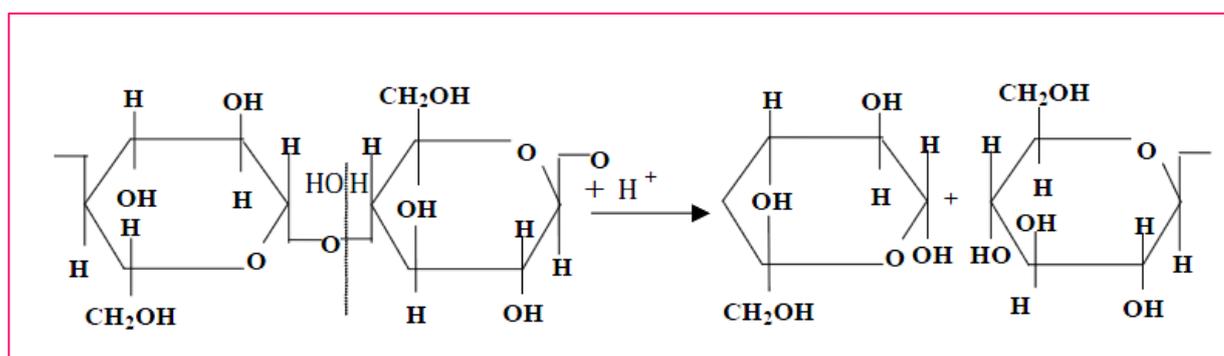


Figure 3.6. Hydrolyse de l'amidon.

3.4.5. Le glycol.

L'éthylène glycol fut synthétisé pour la première fois en 1859 par Charles Wurtz. Il fut produit en petite quantité durant la première Guerre mondiale comme réfrigérant et comme constituant d'explosifs. Sa production industrielle débuta en 1937, dès lors que son précurseur, l'oxyde d'éthylène, fut lui-même produit en quantité industrielle à bas prix. Il provoqua une petite révolution dans le monde de l'aéronautique en remplaçant l'eau du système refroidissant. Sa température d'ébullition élevée permet de diminuer la taille du radiateur, et donc son poids. Avant que l'éthylène glycol ne soit disponible, les systèmes de refroidissement utilisaient en effet de l'eau à haute pression ; ces systèmes étaient encombrants et peu fiables, et en cas de combat aérien, facilement touchés par les balles ennemies.

3.4.5.1. Définition : L'éthylène glycol ou glycol est le plus simple composé chimique de famille des glycols. Sa formule chimique est HO-CH₂-CH₂-OH (c'est un diol).

L'éthylène glycol est fréquemment employé en tant qu'antigel, dans le liquide de refroidissement des automobiles. A température ambiante, c'est un liquide visqueux incolore et sans odeur, avec un goût sucré. L'éthylène glycol est toxique, et son ingestion nécessite des soins médicaux urgents.

3.4.6. Les silicates de sodium

C'est au milieu des années 90 qu'il y'a eu une augmentation dans la pression afin de trouver un fluide de forage à base d'eau.

De rendement élevé qui serait acceptable coté environnement et une alternative aux fluides de forage à base d'huile. Depuis les années 30, on l'a su que les fluides de forage à base de silicate de sodium ou de potassium, les fluides de forage à base de silicates courants auraient peu de similitude avec les premiers fluides. Les progrès de la chimie de formulation ont fait que les fluides de forage à base de silicates aient une alternative efficace, souple et à prix réduit aux fluides de forage à base d'huile.

3.4.6.1. Mode d'action du système silicate.

Le système de silicate réalise son inhibition supérieure par une triple approche :

- La liaison chimique directe des polymères de silicate pour forcer les déblais et les surfaces de la formation
- Précipitation du silicate avec les ions bivalents
- La polymérisation de silicate qui a comme conséquence les structures complexes et inorganiques de polymère qui réagissent avec les surfaces argileuses.

On peut remarquer deux mécanismes d'actions du silicate qui sont :

- la gélification est l'auto polymérisation où la condensation des structures solubles de silicates pour former une structure hydrosol et amorphe de gel de silicate. La gélification est apportée par une baisse du PH avec une polymérisation commençant à se produire rapidement à PH en dessous de 10,5.
- la précipitation du silicate est raccordement absolu des molécules de silicate par les cations polyvalent, une réaction localisée de gélification, couplée à une quantité mineure de précipitation, a lieu généralement pour bloquer l'afflux de la boue et la pression dans la formation. Ces réactions mènent également au scellement de microfissure, les fissures et la blocaille donnant au silicate un avantage décidé par rapport à n'importe qu'elle boue d'huile, réduisant de manière significative les pertes et coûts potentiels de la boue.

CHAPITRE 4.

LES ARGILES.

Introduction :

Grâce à leurs propriétés, Les minéraux argileux ont été longtemps utilisés dans de larges domaines d'applications. Outre la fabrication de matériaux de construction, ils sont utilisés, à titre d'exemple, pour l'élaboration de matériaux polymères ou encore le raffinage d'huiles alimentaires, la cosmétique ou la médecine, et entrent dans la formulation des boues de forage, entre autres, grâce à leurs propriétés micro et macroscopiques, et leur prédominance dans l'écorce terrestre les argiles ont pour retrouver une place colossale parmi les matériaux qui existent.

Une compréhension bien approfondie des argiles peut être l'outil le plus précieux pour celui qui va étudier la boue. L'argile peut être additionnée intentionnellement ou elle peut entrer dans la boue comme un contaminant majeur à travers la dispersion des solides de forage. Dans d'autres cas, elle devient la partie active du système. Pour cette raison, il est nécessaire de comprendre la chimie de base des argiles pour bien contrôler les boues à base d'eau. La chimie des argiles est aussi importante à l'égard des interactions entre les boues à base d'eau et les autres additifs qui affectent la stabilité du puits foré.

Dans l'industrie des fluides de forage, certain minéraux d'argile comme la smectite, le majeur constituant de la bentonite, sont utilisés pour apporter la viscosité, la structure gel et le contrôle des pertes.

4.1 Définition :

Il n'existe pas de définition unique du terme " argile ". Le mot " argile " englobe deux connotations, l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée. Le géologue ou le pédologue considèrent comme " argile " tout minéral de faible granulométrie, la limite étant fixée à 2 ou 4 microns selon les cas. Les ingénieurs s'attachent plutôt aux propriétés de plasticité des matériaux argileux quelque soit leur taille. Les céramistes regroupent les matériaux selon leur comportement au chauffage...

Généralement, les minéraux argileux sont des phyllosilicates hydratés de petite taille. Cependant (1) des minéraux comme les illites ou les chlorites sont fréquents dans la fraction silteuse des roches magmatiques et métamorphiques ; (2) tous les minéraux argileux ne sont pas des phyllosilicates (e.g. quartz, feldspath), ni même des silicates (e.g., oxydes). Les argiles sont généralement cristallisées, même si des argiles amorphes existent (e.g. allophanes dans les sols développés sur substrat volcanique ou andosols). Dans les ouvrages de référence, il existe différentes propositions de définitions. Par exemple, **Eslinger & Peaver (1988)** proposent de définir les argiles comme un minéral qui domine dans la fraction fine < 2 microns des roches et des sols. Par contre, Weaver (1989) regroupe tous les minéraux phyllosilicatés sans aucune connotation de taille et propose pour éviter les confusions d'utiliser le terme de " physils ".

4.2 Nomenclature et classification :

Les minéraux argileux sont principalement des phyllosilicates, c-à-d qu'ils sont constitués par un empilement de feuillets. Structure générale des phyllosilicates (**White, 1999**) explicite la terminologie utilisée pour définir la structure des argiles. On distingue 4 niveaux d'organisation :

- les plans sont constitués par les atomes ;
- les feuillets, tétraédriques ou octaédriques, sont formés par une combinaison de plans ;
- les couches correspondent à des combinaisons de feuillets ;
- le cristal résulte de l'empilement de plusieurs couches.

4.3 Eléments structuraux :

Les silicates constituent le modèle de base. Ils sont formés par un agencement de tétraèdres de SiO_4^{4-} dans lesquels un atome de Si est entouré de 4 atomes d'O (**Fig. 4.3a**). Les tétraèdres s'agencent en se partageant les oxygènes en maille hexagonales (**Fig. 4.3b**). Les hexagones s'agencent et forment une double chaîne. Dans les phyllosilicates, les tétraèdres forment des feuillets composés de 6 tétraèdres. Les O non partagés pointent tous dans la même direction

Sont occupées (3/3 = “ minéral trioctaédrique ”). Dans la gibbsite, $Al_2(OH)_6$, par contre 2 positions sur 3 sont occupées (i.e., “ minéral dioctaédrique ”).

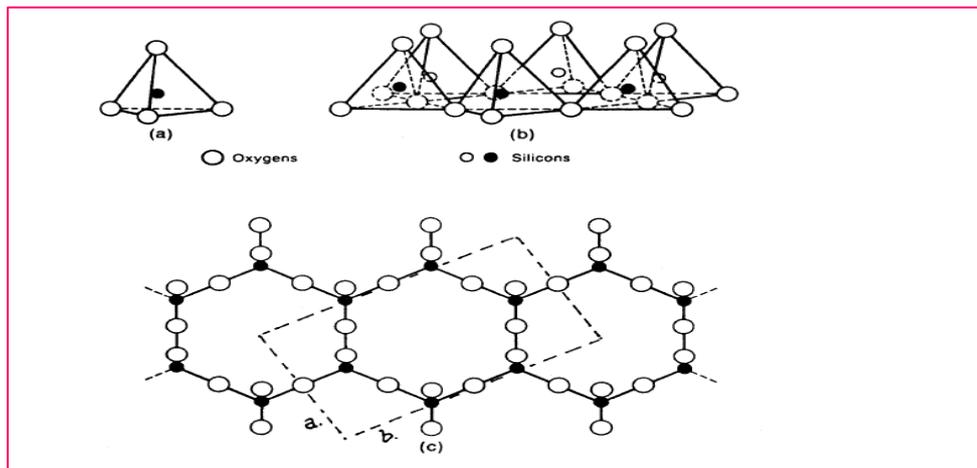


Figure 4.2abc – Eléments structuraux : les tétraèdres (Eslinger & Peaver, 1988).

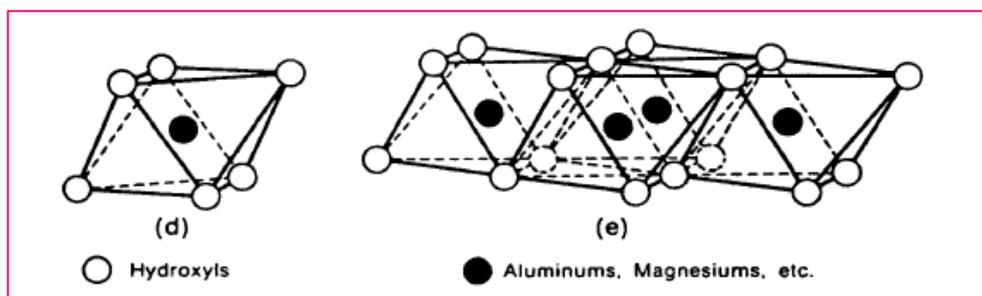


Figure 4.2de – Eléments structuraux : les octaèdres (Eslinger & Peaver, 1988).

Les tétraèdres s’agencent avec les octaèdres pour constituer des couches (Fig. 3.3, 3.4). Les couches peuvent être neutres ou chargées négativement, compensée par des actions qui se logent dans l’espace entre les couches (espace interfoliaire). La charge de la couche dépend des substitutions de cations dans les feuillets T ou O.

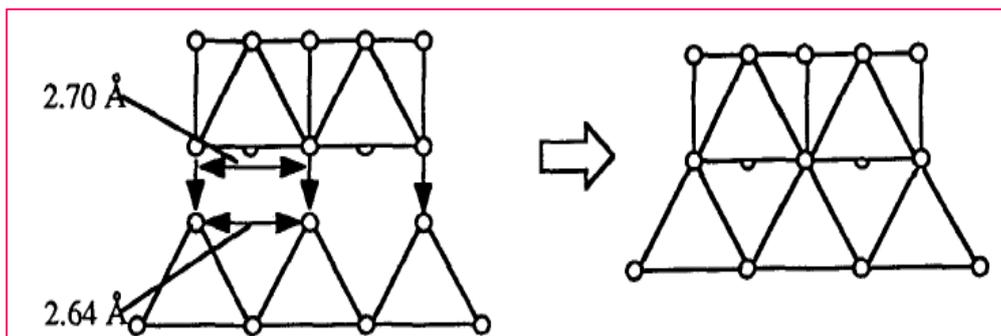


Figure 4.3a – Agencements des tétraèdres et des octaèdres (Moore & Reynolds, 1989).

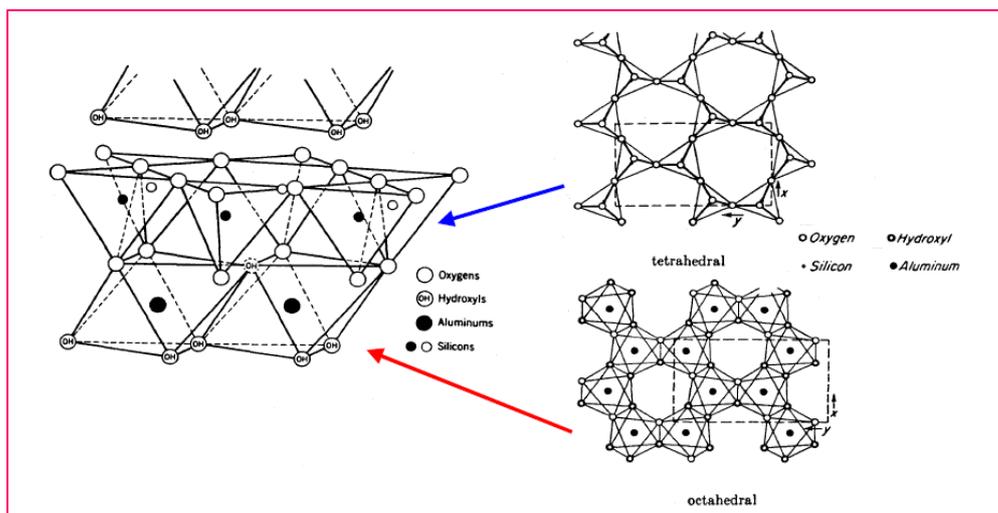


Figure 4.3b – Agencements des tétraèdres et des octaèdres en feuillets 1/1 (Eslinger & Peaver, 1988 ; Weaver, 1989).

4.4 Critères de classification :

Les principaux critères de classification sont basés sur les paramètres suivants (**Tab.3.1a**) :

- la combinaison de feuillets (T/O ou 1/1; T/O/T ou 2/1; T/O/T/O ou 2/1/1);
- le type de cations dans l'octaèdre ;
- la charge de la couche ;
- le type de matériel dans l'espace interfoliaire (cations, molécules d'eau,...) ;

Quelques critères secondaires sont le polytypisme (ou mode d'empilement), la composition chimique, le type d'espèces argileuses et le mode d'empilement pour les interstratifiés.

4.5. Classification des minéraux argileux simples

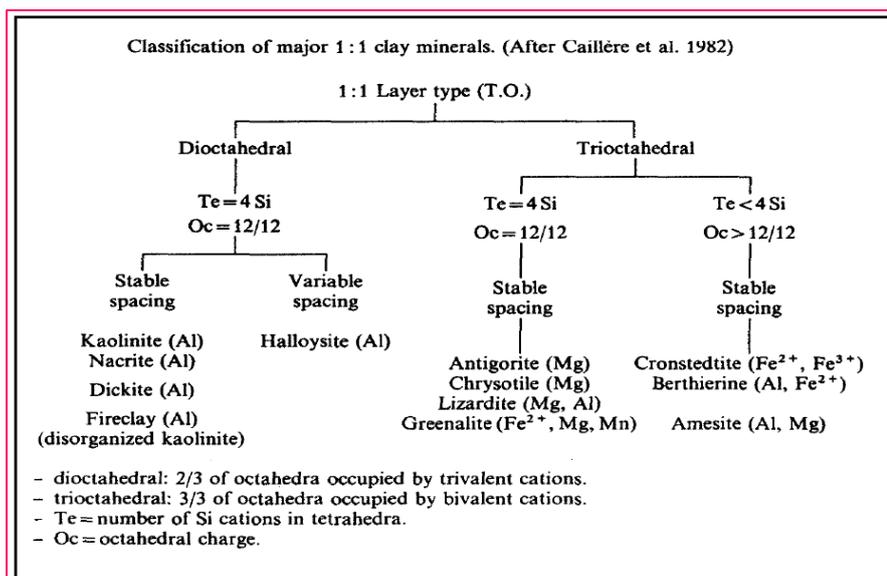
- **Minéraux 1/1**

- **Groupe des kaolinite-serpentine**

Ce groupe de minéraux combinant un feuillet T et un feuillet O (minéraux T/O ou 1/1) se caractérise par peu de substitutions cationiques, à l'exception de Fe^{3+} (**Tab. 4.1**).

Dans ce groupe, dickite et nacrite constituent un cas particulier. Ces minéraux sont des polytypes de la kaolinite. Ils se caractérisent par un mode d'empilement d'une même couche différent, fonction la position de la charge vacante. Leur stabilité dépend de la température. La dickite remplace la kaolinite à une profondeur d'enfouissement de l'ordre de 3100-3200 m et pour de températures > 110-130°C.

Table 4.1 .Classification des minéraux argileux 1/1 (Caillière et al., 1982).



➤ **Halloysite**

Ce minéral se forme par altération de la kaolinite, suite à l’addition de couches d’eau entre les feuillets (**Figure 4.4b.**). L’espace basal augmente en conséquence. Ce minéral se présente sous forme de spirale. Après chauffage, l’halloysite se déshydrate irréversiblement en kaolinite.

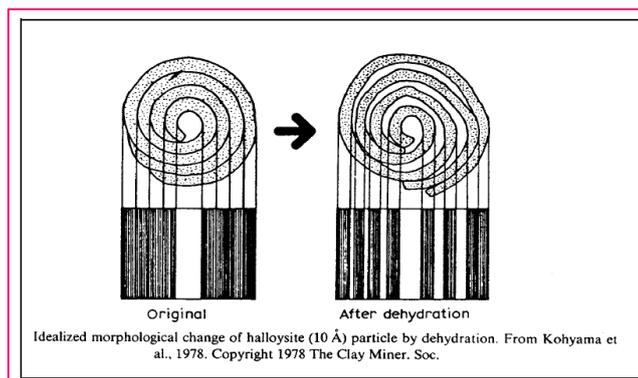


Figure 4.4b – Formation de l’halloysite (Manning , 1995).

• **Minéraux 2/1**

La structure est composée de 2 couches tétraédriques et une couche octaédrique, avec la seconde couche T renversée par rapport à la première. L’espace basal caractéristique est de 10Å.

Le minéral représentatif de ce groupe est la muscovite. Ce minéral s’apparente à la phlogopite mais présente des substitutions tétraédriques : Si est remplacé par Al et le déficit de charge est compensé par l’introduction de K⁺ dans l’interfoliaire.

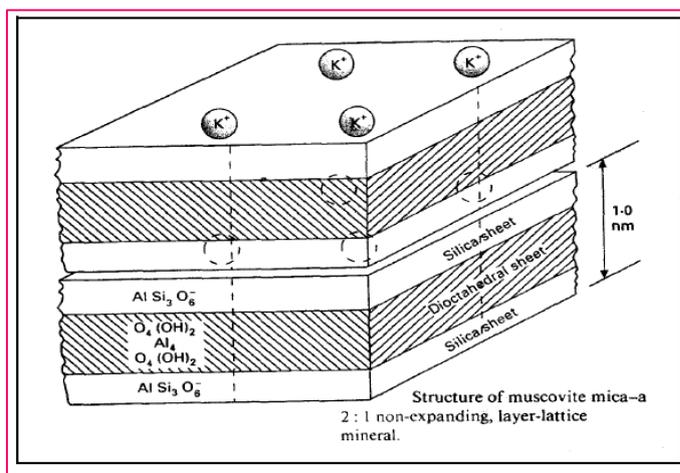
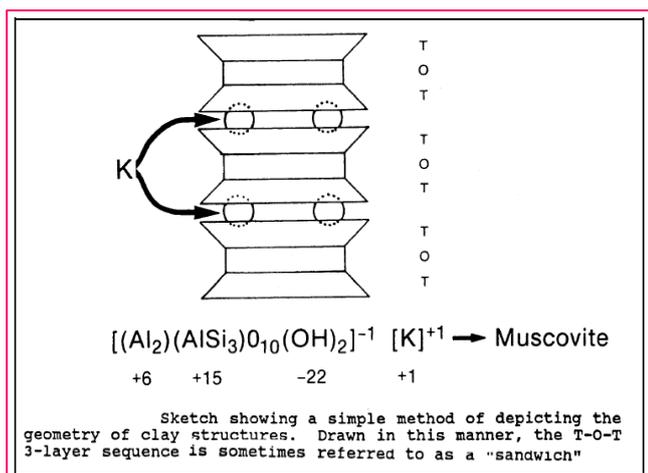


Figure 4.5a – Ex de minéral à S 2/1

(Eslinger & Peaver, 1988).

Figure 4.5b – Ex de minéral à S 2/1

(White, 1999)

Les minéraux 2/1 de type dioctaédriques regroupent différentes séries : micas dioctaédriques, vermiculites et smectites.

➤ **Groupe des micas** : Le groupe des micas dioctaédriques peut être représenté dans un diagramme ternaire (Fig. 4.6) entre pyrophyllites (pas de substitution), céladonites (substitutions octaédriques) et muscovites (substitutions tétraédriques).

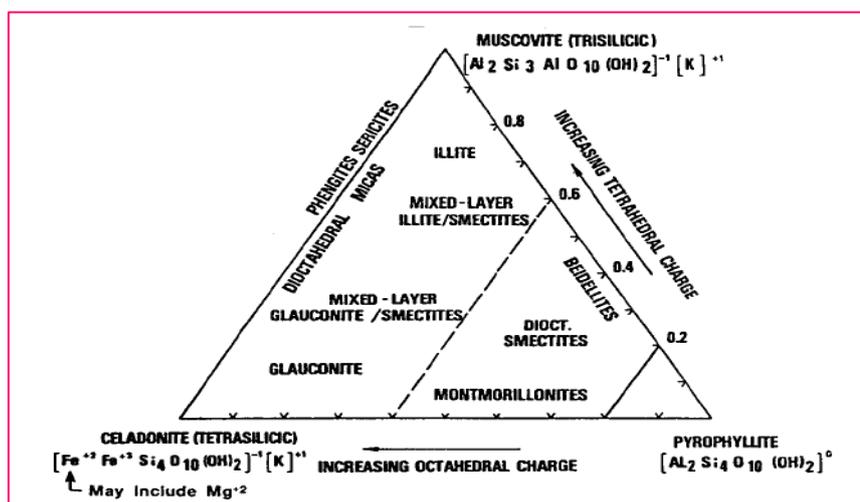
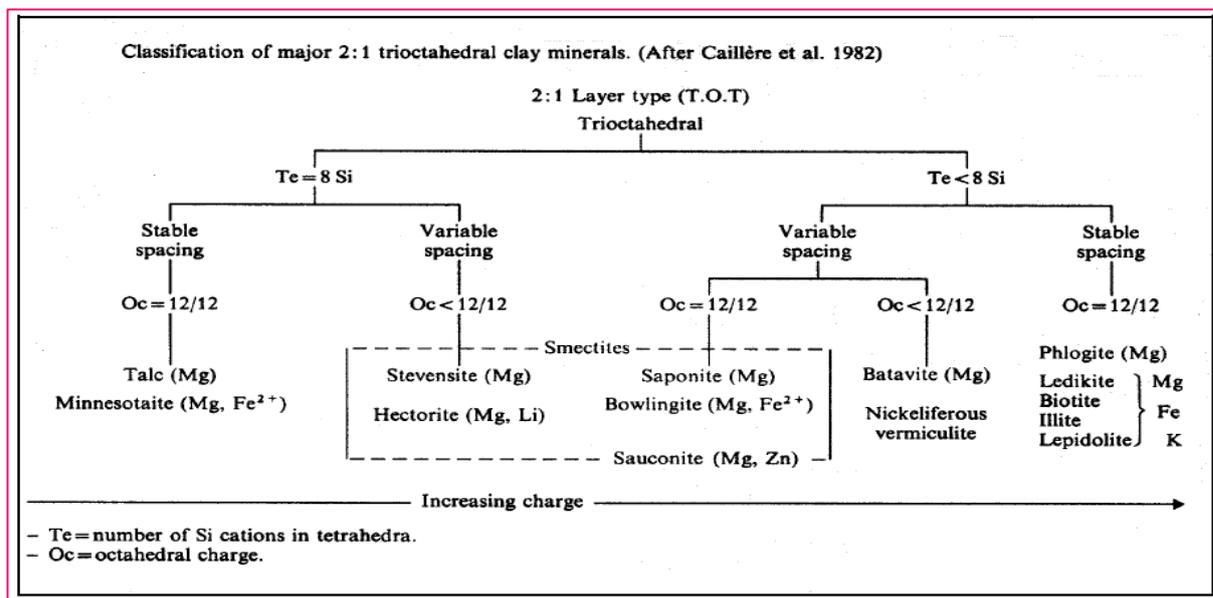


Figure 4.6 Classification des minéraux argileux 2/1 dioctaédriques (Eslinger & Peaver, 1988)

Les micas trioctaédriques sont reliés de part leur structure au talc (Tab. 4.2). Ils incluent des minéraux comme la phlogopite et la biotite et quelques espèces plus exotiques comprennent du Mn, Zn, Ni, Li dans l’octaèdre. Il s’agit de minéraux peu importants en tant que minéraux argileux.

Table 4.2 Classification des minéraux argileux 2/1 trioctaédriques (Caillère et al., 1982).



➤ **Groupe des vermiculites**

Les vermiculites se caractérisent par la présence de cations hydratés dans l'espace interfoliaire (Figures. 4.7). Ils ont une charge (x) comprise entre 0.6 et 0.9, plus faible que les micas (x = 1) mais plus élevée que les smectites (x = 0.2-0.6). Le complexe interfoliaire comprend généralement des cations Mg ou Ca et 2 couches de molécules d'eau. Les vermiculites dioctaédriques résultent généralement de l'altération des micas (illite ou muscovite) et sont abondantes dans les sols. Les vermiculites trioctaédriques sont plutôt issues de l'altération des chlorites ou néoformées. Notons que l'identification par DRX des vermiculites est difficile car elle présente un espace basal variable, fonction du cation interfoliaire. Dans le cas le plus courant (Mg interfoliaire), les vermiculites ne sont pas sensibles à la solvatation. Il est donc conseillé de saturer au préalable les vermiculites par du MgCl₂ afin de leur donner un caractère Mg plus stable.

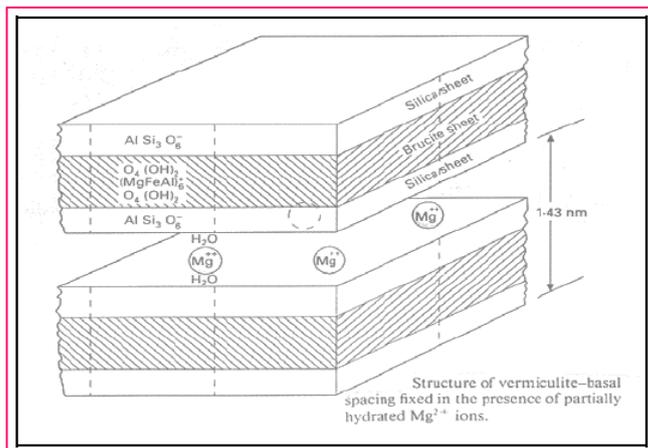


Figure 4.7– Représentation d'une vermiculite (White, 1999).

➤ **Groupe des smectites :**

Il s'agit du groupe le plus diversifié des minéraux 2/1, le seul à être uniquement présent dans la fraction fine des roches (Tab. 4.3). Comme les vermiculites, les smectites se caractérisent par la présence d'eau interfolaire mais avec une charge cationique plus faible ($x = 0.2-0.6$). La variation de composition du groupe des smectites est liée à la présence de différents cations échangeables, faiblement retenus étant donné la faible charge cationique (Tab. 4.4). Les smectites comprenant des cations divalents Mg ou Ca contiennent 2 couches d'eau dans l'interfolaire (espace basal = 14-15 Å). Par contre, les smectites avec des cations monovalents comme le Na ne contiennent qu'une seule couche d'eau ($d = 12$).

Table 4.3 Types de smectites (Clauer & Chauduri, 1995).

Different types of smectites		
Types	Octahedral occupancy	Groups
Dioctahedral smectites	Al dioctahedral type	Montmorillonite (octahedral charge)
	Fe dioctahedral type	Beidellite (tetrahedral charge) Nontronite (tetrahedral charge)
Trioctahedral smectites	Al trioctahedral type	Saponite (octa. and tetra. charges)
	Li and F trioctahedral type	Hectorite (octahedral charge)
	Mg (Li) trioctahedral type	Stevensite (octahedral charge)
Smectites with uncommon elements	Li di-trioctahedral type	Swinefordite
	Cr	Volkhonskoite
	Zn	Sauconite

Table 4.4 – Comp% des smectites (Manning, 1995).

Compositional variation in the smectite family of minerals			
Mineral	Z tetrahedral	Y octahedral	X interlayer
Dioctahedral			
Pyrophyllite	Si ₈	Al ₄	–
Montmorillonite	Si ₈	Al _{3.3} Mg _{0.7}	(½Ca,Na) _{0.7}
Beidellite	Si _{7.3} Al _{0.7}	Al ₄	(½Ca,Na) _{0.7}
Nontronite	Si _{7.3} Al _{0.7}	Fe ³⁺ ₄	(½Ca,Na) _{0.7}
Trioctahedral			
Talc	Si ₈	Mg ₆	–
Saponite	Si _{7.2} Al _{0.8}	Mg ₆	(½Ca,Na) _{0.8}
Hectorite	Si ₈	Mg _{5.3} Li _{0.7}	(½Ca,Na) _{0.7}
Sauconite	Si _{6.7} Al _{1.3}	Zn ₄₋₆ (Mg,Al,Fe ²⁺) ₂₋₀	(½Ca,Na) _{0.7}

Il existe 2 sous-groupes : les smectites trioctaédriques ou saponites et les smectites dioctaédriques ou montmorillonites s.l.

➤ **Groupe des chlorites**

L'espace interfolaire des chlorites est occupé par un feuillet d'hydroxydes chargé positivement, à structure de brucite ou de gibbsite (Fig. 4.8). L'espace basal caractéristique atteint 14Å. Les chlorites sont stables à haute température. Leur stabilité

thermique accrue par rapport aux vermiculites s'explique par la liaison forte existant entre les hydroxyles.

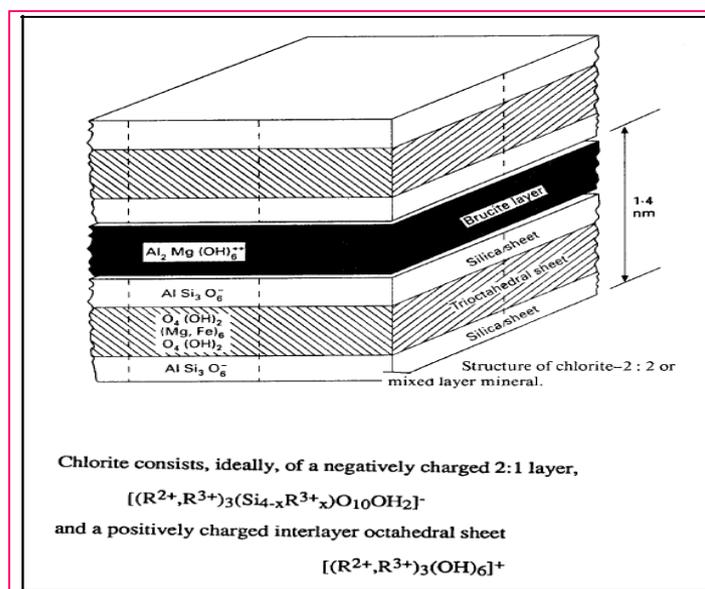


Figure 4.8 représentation du chlorite (White, 1999).

Les chlorites présentent des chimies complexes suite aux nombreuses substitutions. Leur composition ressemble à celle des serpentines mais leur structure est complètement différente. Leurs origines sont variées (héritées de roches métamorphiques, altération hydrothermale,...). Les variétés dioctaédriques (e.g., sudoïtes) sont assez rares.

➤ Minéraux à pseudo-feuillets

Les argiles fibreuses ne se caractérisent pas des feuillets argileux discontinus. Elles présentent une structure de base en ruban de type 2/1, proche du talc en composition mais avec une structure en chaînes comme dans les pyroxènes ou les amphiboles. Les tétraèdres sont reliés entre les chaînes. L'oxygène apical pointe alternativement vers le haut ou le bas dans les rubans adjacents. Les feuillets tétraédriques sont continus, les feuillets octaédriques discontinus. Il y a de larges espaces entre les chaînes qui sont remplis d'eau (liée ou non, i.e., eau zéolitique) et de cations échangeables. la structure en ruban confère à l'argile un aspect en lattes ou en fibres. La sépiolite comporte essentiellement le Mg comme cation échangeable, rarement le Na. La palygorskite (ou attapulgite) est plus riche en Al que la sépiolite.

4.6. Classification des minéraux argileux interstratifiés

Les minéraux interstratifiés se caractérisent par la superposition, selon un empilement vertical, de 2 (ou plus) types de couches. Il ne s'agit pas d'un simple mélange physique des différents composés mais d'un minéral à part entière. L'interstratification est due (1) aux liaisons fortes dans les couches individuelles mais faible entre les couches ;

(2) à la configuration proche de toutes les couches avec l'oxygène pointant vers l'extérieur. Il s'agit de minéraux très courants en milieu naturel souvent négligés car difficile à détecter et à quantifier par DRX.

Les interstratifiés seraient composés d'unités ou particules fondamentales avec des espaces gonflants. Trois types de particules sont ainsi définis :

- les smectites caractérisées par un espace basal de 10Å (minéral 2/1);
- les illites avec un espace double de 20Å (minéral 2/1 avec du K dans l'interfoliaire ;
- les chorites avec un espace de 24Å (minéral 2/1 + 1 couche octaédrique). Selon ce concept, chaque particule élémentaire est entourée d'une couche de molécules d'eau. Cette couche au sein d'un agrégat orienté se comporte comme un interfoliaire smectitique. Ainsi la particule élémentaire d'illite serait le plus fin cristal possible d'illite. Dans un agrégat, la partie centrale aura un comportement d'illite et l'extérieur se comportera comme une smectite. Par exemple, un interstratifié irrégulier illite-smectite serait composé d'un mélange de particules élémentaires d'illite (20Å) et de smectite (10Å) avec une superposition possible de plusieurs couches de smectites.

Par contre lorsqu'il n'y a pas de particules de smectites mais uniquement des illites de 20Å ou plus l'interstratifié sera régulier ($R = 1$). La discussion concernant le concept de particules fondamentales et de diffraction interarticulaire ne suggère pas les minéraux interstratifiés sont des mélanges physiques ou des artefacts de préparation. Nadeau définit les interstratifiés comme des agrégats de particules plutôt que comme des cristaux isolés car toutes les réflexions (hkl) ne sont pas présentes dans les spectres de diffraction.

4.7. Propriétés des argiles

Les minéraux argileux se caractérisent par trois propriétés principales :

- leur forme et leur surface spécifique ;
- leur capacité d'adsorption d'eau et de gonflement ;
- leur multiple possibilité d'échanges ioniques.

4.7.1. Forme et surface spécifique

Les argiles se présentent sous trois formes (**Fig. 4.9a**):

- en flocons, caractérisés par même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à 1/20ième de la longueur ;
- en lattes, avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente à 1/20ième de la longueur ;
- en aiguilles, deux dimensions identiques et la 3ième beaucoup plus grande (assez rare).

4.7.2. Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau. Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées argiles gonflantes (" swelling clays "). Les smectites, vermiculites et minéraux interstratifiés offrent des capacités d'expansion beaucoup plus importantes que celles des autres espèces argileuses. L'incorporation d'eau est réversible à la pression atmosphérique et dépend de la température et de la pression de vapeur. Plus l'air est humide, plus l'argile pourra incorporer de l'eau.

Les minéraux gonflants ont une structure de base à 10Å. Selon l'hydratation, une couche d'eau de 2.5 ou 5.2Å d'épaisseur se développe. Cette hydratation conduit à une augmentation de volume pouvant atteindre 95%. Notons qu'il existe des minéraux comprenant de l'eau adsorbée mais qui n'ont pas pour autant de propriétés de gonflement. Dans un climat à saisons contrastées, la présence de smectites conduit une déstructuration du sol (e.g. vertisols): en été les smectites gonflent; en hiver les smectites se déshydratent et entraînent la formation de larges fissures.

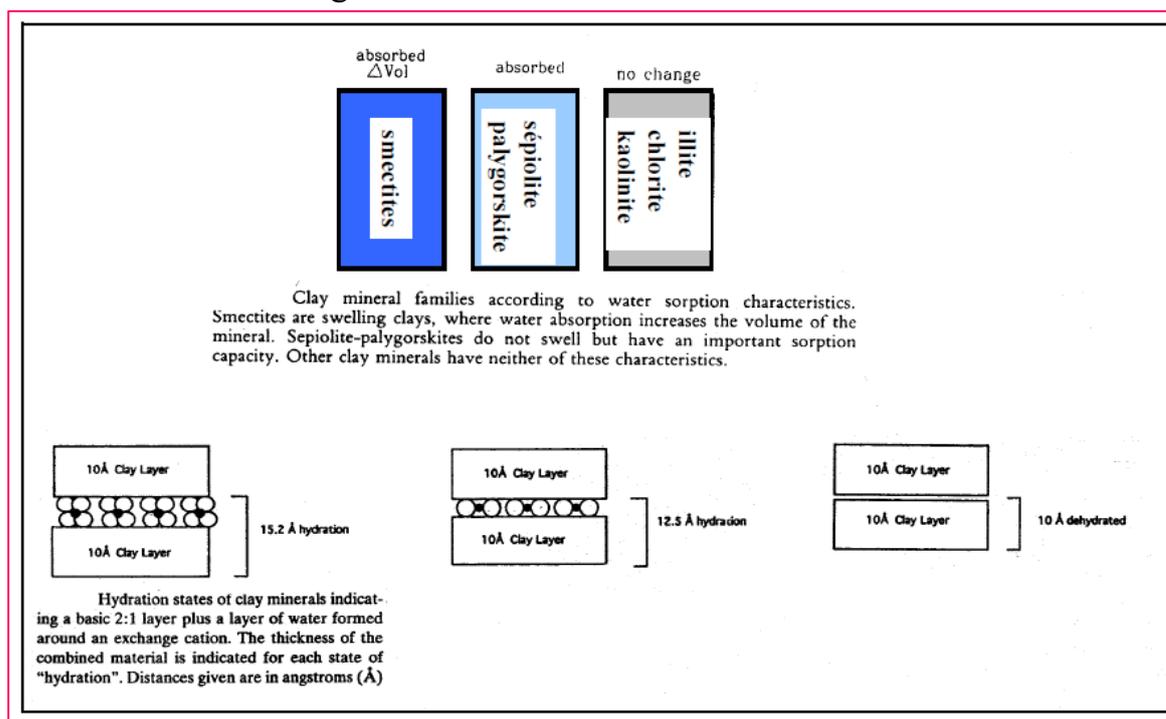


Figure 4.9a Capacité d'adsorption d'eau par les particules argileuses (Velde, 1992 ; 1995).

4.7.3. Charge des surfaces argileuses

Les minéraux argileux se caractérisent par une surface électrique non neutre . Il existe deux types de charge :

(1) une charge permanente ou structurale liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans T, Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans O), de signe négatif ;

(2) une charge de surface variable selon le pH du milieu, liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux ou suite à l'adsorption de surfactants, de signe + ou -.

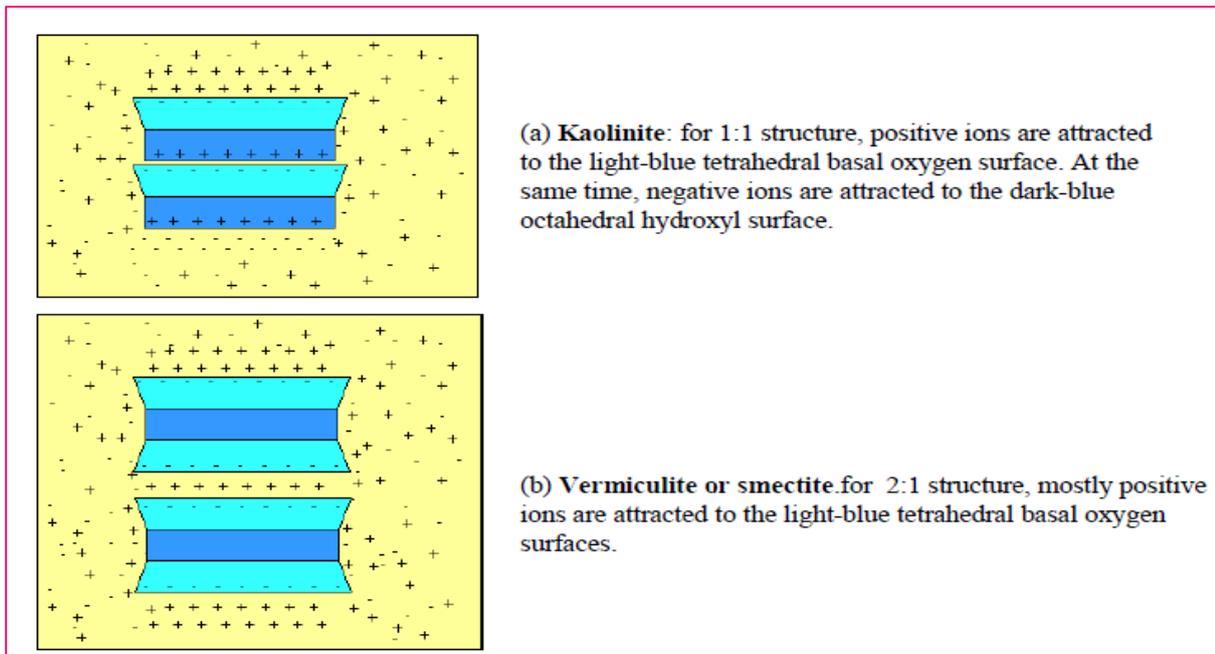
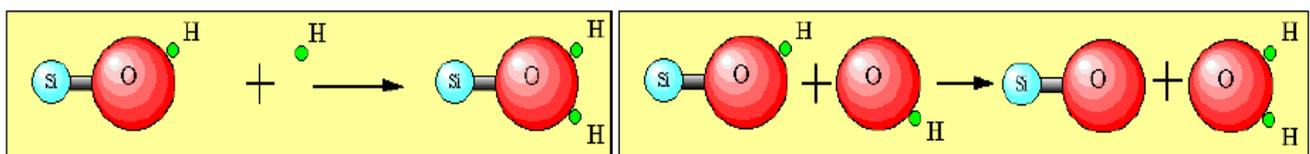
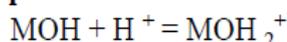


Figure 4.9ab Adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).

La charge de surface est liée à l'hydrolyse de liens rompus Si-O et Al-OH le long des surfaces. A faible pH, l'argile se caractérise par une capacité d'échange anionique : H⁺ se lie davantage par rapport à OH⁻, une charge positive se développe. A fort pH, une capacité d'échange cationique (CEC) se développe : Les OH⁻ se lient davantage que H⁺ et une charge négative se développe (**Fig. 4.9cd**). A l'équilibre ou " au point de charge zéro " (ZPC), il n'existe pas de capacité d'échange



(c) At low pH:



(d) At high pH:

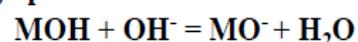


Figure 4.9cd Adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).

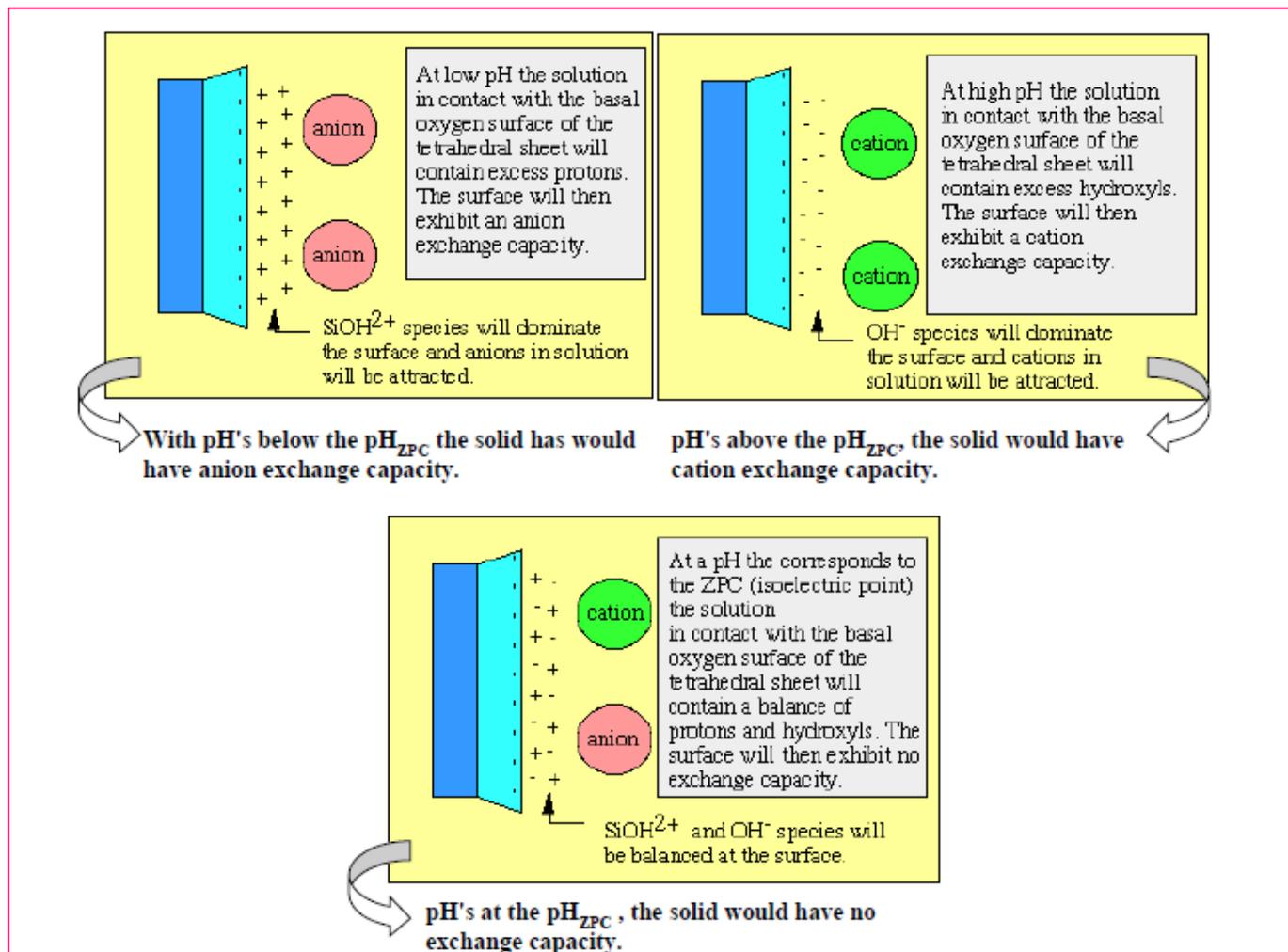


Figure 4.10 Charge de surface (Schroeder, 2002).

4.7.4. Capacité d'échange cationique :

La capacité d'échange cationique (CEC) mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle mesure la concentration en cations non fixés dans la couche diffuse et dépend de la charge totale (i.e., charge de surface et structurale). La CEC est fonction du pH, elle est généralement donnée pour un pH neutre (7). Le principe de la mesure est illustré à la **figure 4.11**.

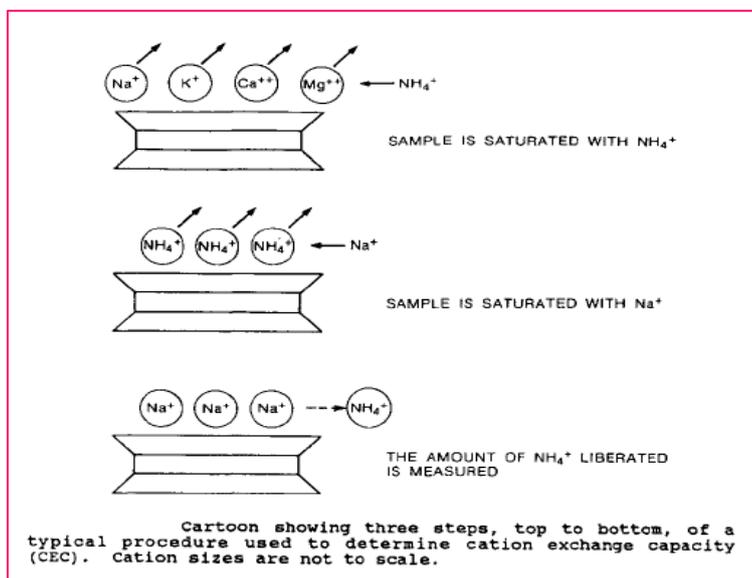


Figure 4.11 – Mesure de la CEC (Eslinger & Peaver, 1988).

Un échantillon est saturé avec un cation en le mélangeant dans une solution de chlorures. Les cations qui se trouvaient dans la couche diffuse vont être échangés et seuls les cations ajoutés seront fixés. L'excès de cation est rincé puis remplacé par un autre cation. On mesure ensuite la quantité de cations libérés.

Les valeurs de CEC pour les principales familles argileuses sont reportées dans le **tableau**

Table 4.5 – CEC des minéraux argileux (Eslinger & Peaver, 1988).

Cation Exchange Capacities (meq/100 g) of Clay Minerals (from Drever, 1982, p. 82)		
smectites		80-150
vermiculites		120-200
illites		10- 40
kaolinite		1- 10
chlorite		<10
Cation exchange capacities and surface charge densities		
Clay mineral group	Cation exchange capacity (CEC) (cmol (+) kg ⁻¹)	Surface charge density (τ) (cmol (-) m ⁻²)
Kaolinites	3-20	2-6 × 10 ⁻⁴
Illites	10-40	1-2 × 10 ⁻⁴
Smectites	80-120	1-1.5 × 10 ⁻⁴
Vermiculites	100-150	3 × 10 ⁻⁴

CHAPITRE 5.

LE PROBLEME DE GONFLEMENT DES ARGILES.

Introduction

Le problème posé par le gonflement des argiles lors du forage dans les formations argileuses semble étroitement lié aux phénomènes d'interactions argile -fluide de forage. L'instabilité des formations argileuses varie selon la nature (eau, autre solvant) et l'état physique de ces fluides,

Lors du contact argile-eau. Malgré de nombreuses études fondamentales sur l'hydratation des argiles, il reste encore beaucoup à comprendre sur les mécanismes qui en sont à l'origine.

Van Oort (2003) a proposé de classer les problèmes liés aux argiles selon la teneur en eau, la pression de gonflement et la pression de pore en considérant une quantification du phénomène de transport sur le changement chimique et sur la stabilité mécanique de la roche.

Un fluide de forage idéal donnant une bonne stabilité est obtenu i) en évitant l'augmentation de la pression de pore due à l'altération du fluide, ii) en réduisant l'effet osmotique causé par l'ajout de sel au fluide et iii) en utilisant des fluides émulsionnés inverses (**Muniz et al., 2004**).

5.1 Définition :

Les phénomènes physico-chimio-mécaniques liés à la stabilité des argiles ont été longuement débattus dans la littérature pétrolière, particulièrement sur la capacité des systèmes de type polymère/électrolyte à inhiber l'hydratation et le gonflement des argiles.

En préalable, il est nécessaire d'introduire quelques définitions utilisées par les pétroliers des différents types d'argiles avant une brève synthèse des principaux travaux traitant les problèmes soulevés par les foreurs au sujet des formations argileuses rencontrées au cours du forage.

5.2. Additifs utilisés pour inhiber le gonflement et la dispersion des argiles :

L'incitation à ne plus utiliser pour des considérations environnementales de fluides émulsionnés à base d'huile (OBM) a motivé le développement de la technologie des systèmes de fluides à base d'eau (WBM) qui offrent aussi des avantages économiques. Le problème majeur dans l'utilisation des WBM reste donc lié à l'instabilité des puits, due essentiellement aux interactions des argiles de la formation avec l'eau, mais plusieurs solutions acceptables sont émises.

Ainsi actuellement, un nombre important de systèmes de fluides sont proposés par les Sociétés spécialisées. En fait, plusieurs de ces produits commercialisés sont similaires malgré des noms d'usage différents. Voici quelques exemples d'additifs utilisés dans les WBM, qui ont amélioré les performances des fluides de forage en résolvant certains problèmes rencontrés.

5.2.1. Les sels minéraux (KCl, NaCl, CaCl₂, ...):

La salinité de la phase aqueuse est choisie en fonction des caractéristiques de la formation traversée. En effet, **Chenevert (1989)** a montré que la force ionique de la phase aqueuse du fluide doit être égale à celle de l'eau présente dans les argiles de la formation afin d'éviter toute réaction d'échange. Une diffusion de molécules d'eau vers la formation pourrait conduire à un gonflement des argiles et par suite à une déstabilisation des parois du puits et à l'inverse, une perte d'eau entraînerait une déstabilisation des parois par "cracking".

Le KCl est certainement le sel le plus couramment utilisé pour l'inhibition du gonflement des argiles. Avec le PHPA, le système présente une bonne efficacité pour la stabilisation des cuttings d'argiles (**Clark et al., 1976**).

La faible efficacité de la membrane (1– 2%) est due à la grande mobilité relative du KCl dans les argiles (**van Oort, 2003**).

De plus, la conductivité hydraulique n'est pas altérée et la pression osmotique générée par les solutions de KCl est modérée (typiquement inférieure à 20 MPa). Cet additif ne colmate pas les pores, ne modifie pas la perméabilité des argiles et ne retarde pas la pénétration de la boue. Il est recommandé en priorité pour la stabilisation des cuttings réactifs contenant une quantité significative de smectites. En effet, l'ion potassium est un bon inhibiteur (**Steiger, 1982**) qui réduit l'énergie d'hydratation et le gonflement d'argiles, telles que l'illite ou la montmorillonite.

Bien que l'ion Na^+ ne soit pas un aussi bon inhibiteur que l'ion K^+ , l'utilisation de NaCl possède certains avantages sur celle de KCl. NaCl peut réduire l'invasion du filtrat dans les argiles. En effet, proche de la saturation, une solution de NaCl conduit à de grandes viscosités et à une activité de l'eau plus faible que celles observées avec les solutions concentrées de KCl. En combinaison avec les silicates, polyols et méthylglucosides, les solutions concentrées de NaCl permettent d'améliorer l'efficacité de la membrane (cake). D'autres solutions de sels minéraux, tels que CaCl_2 , ou CaBr_2 , ZnCl_2 , MgCl_2 ou MgBr_2 et ZnBr_2 sont aussi largement utilisées en tant que fluides de complétion.

5.2.2. Les sels organiques :

Formiates et acétates alcalins (RCOO-M^+ , avec $\text{R} = \text{H}, \text{CH}_3$ et $\text{M}^+ = \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Cs}^+$) en solution conduisent à une forte viscosité des filtrats et génèrent une pression osmotique élevée. Ces sels organiques ont un effet bénéfique sur la réduction de la pression de gonflement des argiles (**Howard, 1995 ; van Oort et al., 1996a**).

5.3. Les polymères cationiques, anioniques et non ioniques

5.3.1. Les polymères cationiques (PHPA, amines,...) :

ont été développés comme alternative aux sels minéraux (**Beihoffer et al., 1990; Retz et al., 1991**).

- pour augmenter le nombre des sites d'échange, car KCl possède un seul site (**Himes et al., 1991**)
- pour des raisons de restrictions environnementales contre l'utilisation des sels (sensibilité aux ions K^+ ou aux chlorures) dans plusieurs chantiers à travers le monde. Avec de faibles poids moléculaires ($M < 10\,000$), ces polymères sont de bons inhibiteurs du gonflement des argiles. Ils entrent dans les pores, viscosifient les filtrats et retardent leur invasion dans les argiles.

Les hauts polymères ($M > 10\,000$) n'ont pas l'aptitude de pénétrer dans les pores mais peuvent agir par encapsulation. C'est le cas du PHPA qui s'adsorbe sur plusieurs sites des argiles et réduit la désintégration des cuttings (**van Oort, 2003**). Selon **Clark et al., (1976)**, les fluides à base d'eau contenant du polyacrylamide et du chlorure de potassium peuvent protéger les argiles et réduisent les problèmes liés à la stabilité du puits.

Les amines simples (polymères cationiques) sont utilisées dans plusieurs régions pour des applications spécifiques. Les amines quaternaires évitent le gonflement et la dispersion des argiles par échange d'ions. Leurs inconvénients sont leur coût élevé, leur toxicité (**Himel et Lee, 1951**) ainsi que leur incompatibilité avec les additifs anioniques généralement utilisés dans les fluides.

Une nouvelle génération de composés inhibiteurs (Organic Cationic Materials ou 'OCM') est venue répondre aux contraintes imposées par les polymères cationiques. Ces molécules à plusieurs fonctions ont montré une bonne efficacité technique (stabilité thermique, compatibilité avec les autres additifs des fluides et biodégradabilité) et économique pour l'inhibition du gonflement des argiles. Les dérivés d'ammonium tels que les amines, amides, polyamides, imines, nitriles et aminoacides, utilisés dans plusieurs types de fluides à base d'eau (**Schlemmer et al., 2003**) offrent une performance similaire à celle du cation potassium.

5. 2. 3. Les polymères anioniques (PAC,...) et non ioniques (Polyols,...) :

Une grande variété de polymères anioniques (ex. PAC) et non ioniques (polyols, glycérols, glucosides, alcools polyvinyliques, hydroxyéthylcellulose) ou amphotères ont été essayés.

Ces polymères agissent par encapsulation et/ou réduction de l'activité de la phase limitant la pénétration de l'eau dans les argiles. Toutefois, ils sont généralement peu efficaces par rapport aux polymères cationiques (**Stamatakis, et al., 1995**).

5.2.4. Autres additifs

- Chaux et gypse (**Cannon, 1947 ; Hurdle, 1957**). Les systèmes de fluides à base de chaux ont un effet bénéfique pour le développement de la cimentation des argiles in situ (**Hale et Mody, 1993**).
- Les additifs à base d'asphaltes modifiés, de gilsonite ou de graphite (**Stratton, 1931 ; Cagle et Schwertner, 1972**). Ces additifs n'ont pas d'effet sur la pression de gonflement. Leurs effets sont liés principalement à leur taille permettant le blocage des pores et par conséquent le retardement de l'invasion du filtrat.

Ce type d'additifs est aussi recommandé pour le forage des formations microfracturées. Cependant, il sera difficile d'évaluer leur performance au niveau du laboratoire dans des conditions ambiantes (**Davis et Tooman, 1998**) car utilisés pour l'évaluation de leur pouvoir de stabilisation des argiles, ils ont des comportements variables en fonction de la température et de la pression. Dans le cadre de la nécessité du développement d'équipements pour des essais spécifiques dans des conditions de température et de pression élevées (HP/HT) une cellule 'Down-Hole Simulation Cell' a été utilisée. Cette technique a été souvent critiquée pour son coût et la nécessité de réaliser de nombreux essais.

Nair (2004) a évalué la performance de deux additifs (la gilsonite et du Soltex) utilisés en tant qu'inhibiteurs dans des conditions HP/HT et a montré une faible réduction de la perméabilité sans expliquer les raisons de cette réduction pour les deux produits.

- La gilsonite est un solide naturel hydrocarboné, classé comme composé du type asphaltite (**Davis et al., 1991 ; Davis et Tooman, 1998 ; Davis, 2002**). Elle a des propriétés meilleures par rapport aux autres asphaltes de par sa faible solubilité, un minimum d'impuretés et un point d'amollissement élevé. Elle réduit la perméabilité suite à des réactions chimiques spécifiques avec les argiles, les rendant pratiquement imperméables.
 - Le « Soltex » fabriqué à partir d'asphalte sulfoné, est un composé anionique partiellement soluble dans l'eau. Soltex de part sa large répartition granulométrique contribue à la stabilité des argiles par le colmatage de leurs pores, et est capable de s'attacher sur les argiles chargées, réduisant ainsi la pénétration de l'eau. **Davis et Tooman (1998) et Duantem (2003)** suggèrent que Soltex pénètre profondément dans les fractures à cause de sa grande solubilité.
- Face aux contraintes environnementales, de nouvelles familles de composés sont proposées : les sucres et leurs dérivés (saccharides).
- Les sucres augmentent la viscosité du filtrat et réduisent l'écoulement de l'eau dans les argiles (**van Oort, 1994**). De plus, ils donnent une faible activité de l'eau et génèrent une pression osmotique permettant leur utilisation pour la déshydratation des argiles. Le problème soulevé par l'utilisation des sucres est leur sensibilité à l'attaque biologique rendant difficile leur conservation et leur stockage sur chantier. Le méthylglucoside et en général les saccharides méthylés, qui sont donc moins sensibles aux attaques biologiques, évitent cet écueil (**Simpson et al., 1994**).
 - Le méthylglucoside (MEG) est un dérivé du glucose, fourni en tant que liquide contenant 70% de solides. Fabriqué à partir d'amidon de maïs, il est classé "biodégradable".

Les saccharides sont généralement recommandés pour la stabilisation des argiles. Les systèmes formulés 'sels+ saccharides' permettent la déshydratation effective des argiles, la réduction du « bit-balling » et l'augmentation de la pénétration (ROP). MI-Swaco propose le système «ULTRADRILL» avec l'utilisation du MEG, ayant la capacité de donner une faible activité au fluide avec une considérable réduction du mouvement des ions. Le système au MEG présente un bon coefficient de lubricité, un bon filtrat et la production de cuttings acceptables pour l'environnement (**Chenevert et Pernot, 1998**). Ce monomère organique soluble dans l'eau présente de multiples groupes hydroxyles dans une structure cyclique capable de réduire l'activité de l'eau du fluide de forage et peut être une bonne alternative vis-à-vis des OBM. La Société Baker Hughes Drilling Fluids a aussi proposé un nouveau produit, "PERFORMAX", fluide à haute performance de troisième génération, conçu pour remplacer les fluides de forage émulsionnés grâce à leur meilleure inhibition du gonflement des argiles par réduction de la transmission de la pression des pores. Dans cette même gamme de produit, "HYDRO-GUARD" de Baroid possède aussi un bon pouvoir inhibiteur.

➤ Les (Poly-) glycérols et (poly-)glycols (**Hale et al., 1989 ; Downs et al., 1993 et Perricone et al., 1989**), généralement notés simplement glycérols et glycols sont largement utilisés pour le forage des argiles (**Chenevert, 1989 ; Bland, 1991, 1992 et 1994 ; Reid et al., 1993; Downs et al., 1993 ; Twynam et al., 1994 ; Cliffe et al., 1995**). **Twynam et al., (1994)** ont observé l'amélioration de l'avancement avec l'utilisation d'une concentration élevée en glycol.

Downs et al., (1993) et Bland (1994) ont étudié l'effet de la température sur le comportement des solutions de glycols (clouding ou TAME : thermally activated mud emulsion).

La présence d'un point de trouble, fonction de la température et de la salinité, conditionne l'utilisation et l'efficacité des systèmes aux glycols. Les glycérols et glycols de masse molaire élevée ($M > 10\ 000\ D$) ne sont pas adsorbés à la surface et ne permettent pas le colmatage des pores. L'utilisation de glycérols et de glycols de faible masse molaire a été souvent recommandée pour la stabilisation des argiles.

➤ Les systèmes mixtes de polyols (polyglycérols, polyglycols et méthylglucoside) et de sels (NaCl, CaCl₂) sont souvent plus efficaces pour la stabilisation des argiles comparativement aux composés utilisés séparément (**van Oort et al., 1995**). Ces systèmes agissent par synergie qui augmente l'efficacité de la membrane argile-fluide.

➤ Les silicates et les composés à base d'aluminium sont fortement recommandés pour la stabilisation des argiles. Aussi pour des raisons environnementales, les silicates ont été introduits dans l'industrie pétrolière

depuis 1990 (Ding et al., 1996 ; van Oort et al., 1996b; Ward et Williamson, 1996). Ces additifs solubles forment une barrière à la surface des argiles ou dans les microfractures et réduisent le transport des ions et la perméabilité effective des argiles.

Des composés à base d'aluminium, 'Alplex' (Clark et Saddok, 1993 ; Saddok et al., 1997), ont été aussi développés dans ce sens. Les silicates solubles réagissent rapidement avec les ions polyvalents des argiles (Ca^{++} et Mg^{++}) et forment des précipités insolubles. La barrière formée par la gélification des silicates précipités réduit l'invasion du filtrat. Le mécanisme de gélification/précipitation permet de colmater les microfractures des argiles (van Oort et al., 1996b).

D'une façon générale, il ressort que l'évaluation des performances des additifs utilisés dans les fluides de forages nécessite des essais en laboratoire et souvent des montages et appareillages spécifiques pour la bonne simulation des conditions réelles. L'analyse des équations empiriques établies et l'estimation des données des essais contribuent souvent à l'explication des mécanismes et des problèmes rencontrés sur chantier. La bonne simulation des conditions opératoires sur chantier est souvent coûteuse. A défaut de pouvoir prendre en compte l'ensemble des conditions pour une bonne compréhension du comportement des formations sensibles ou fragiles vis-à-vis des fluides utilisés, une sélection de certaines conditions d'utilisation peut être une bonne voie pour l'étude des performances des systèmes proposés.

On peut se satisfaire d'un minimum de paramètres pour une exploitation rapide, mais on peut aussi revenir à l'ensemble des conditions par une modélisation.

Dans le cadre de notre travail expérimental, nous essayerons de traiter la performance de quelques additifs (modèles) et d'étudier les propriétés de filtration et d'inhibition des systèmes préparés avec quelques produits habituellement utilisés sur les chantiers de forage.

5.3. Signes indiquant des argiles gonflent :

Généralement, ce genre de coincement s'annonce par :

- Une augmentation du couple de rotation en forage,
- Des accrochages lorsque l'on dégage du fond, avec des montées de pression allant jusqu'à impossibilité de circuler,
- La présence d'argiles plastiques sur les tamis vibrants et une diminution du volume de déblais,
- Une augmentation de la teneur en solides dans la boue,
- Une modification des caractéristiques rhéologiques de la boue (augmentation de la viscosité),

Un reforage systématique de la même zone à la descente.

5.4. Mesures préventives :

Pour éviter le gonflement des argiles et le fluage, il faut agir au niveau des caractéristiques de la boue, pour cela :

- Augmenter la densité de la boue,
- Réduire la filtration (améliorer la qualité du cake et réduire son épaisseur),
- Ajouter un lubrifiant approprié dans la boue,
- Augmenter le débit de circulation.

Mais il peut être nécessaire de changer de type de boue. Les boues au chlorure de potassium, au gypse, au glycol et les boues à l'huile sont souvent les seuls remèdes.

Il faut également utiliser une garniture adaptée aux circonstances :

- Eviter d'utiliser des masses-tiges surdimensionnées,
- Réduire la surface de contact avec la paroi du trou en utilisant des masses-tiges spiralées,
- Le nombre de stabilisateurs et de masses-tiges doit être réduit au maximum, les tiges lourdes seront utilisées pour mettre du poids sur l'outil,
- Incorporer une coulisse au-dessus de la zone à risques.

5.5.1. En manœuvre :

- Redescendre lentement dans la zone à risques,
- Reforer systématiquement jusqu'à ce que la garniture passe librement sans circulation ni rotation.

5.5.2. Pendant le forage :

- Utiliser un débit de circulation le plus élevé possible pour bien nettoyer le trou et maintenir une pression maximum dans l'espace annulaire,
- Arrêter et démarrer progressivement les pompes pour éviter les surpressions et les décompressions brutales dans l'espace annulaire,
- Limiter les immobilisations de la garniture,
- Faire des shorts trip fréquents.

Généralement, ce type de formations est difficile à maintenir en place et vieillit très mal, il faut les tuber le plus rapidement possible.

CHAPITRE 6.

PHYSICO-CHIMIE DES FLUIDES DE FORAGE.

Introduction

Pour savoir bien maîtriser la stabilité puis les propriétés d'écoulement des suspensions concentrées, il est nécessaire d'avoir un contrôle sur les différentes interactions, qu'elles soient répulsives, attractives ou qu'elles entraînent ou pas la ségrégation des particules en suspension. Nous définissons dans la suite les propriétés physico-chimiques des suspensions.

Les suspensions surtout celles d'argile comportons : la force ionique, les interactions de van der Waals et électrostatiques ne sont pas ajustables. Il est toutefois possible de contrôler leur stabilité avec l'ajout de polymères, mais il est alors plus difficile de comprendre les propriétés d'écoulement ou les liaisons entre structures et propriétés d'un système aussi complexe qu'une suspension d'argile/polymère.

Même Les différents comportements rhéologiques de ces suspensions dits « complexes » sont relativement bien décrits dans le domaine linéaire, domaine correspondant à des gradients de vitesse assez faibles où le fluide fait apparaître un comportement newtonien.

6.1. Généralité sur les suspensions :

6.1.1. Définition :

Une suspension ou dispersion est l'état d'un solide divisé, mêlé à la masse d'un liquide sans être dissous par lui. Les suspensions sont omniprésentes dans la vie courante : sang, peinture, céramique, ciment et bien sûr les boues de forage. Le contrôle de la structure des suspensions constitue donc un intérêt capital pour l'industrie. La stabilité et la rhéologie sont les deux grandeurs qu'il faut maîtriser dans une suspension. La stabilité dépend de la taille des particules mais aussi du contrôle des propriétés physico-chimiques de leurs surfaces.

Cette partie vise à mettre l'accent sur les paramètres physico-chimiques qui permettent de contrôler la stabilité de nos suspensions. **La figure 6.1** représente les trois échelles pertinentes dans l'étude des suspensions :

- Macroscopique, représentée par un échantillon homogène avec ou sans séparation de phase ;
- Microscopique, où l'on remarque le côté multiphasique (particules dans le liquide) ;
- Nanoscopique, qui est l'échelle des interactions de surface.

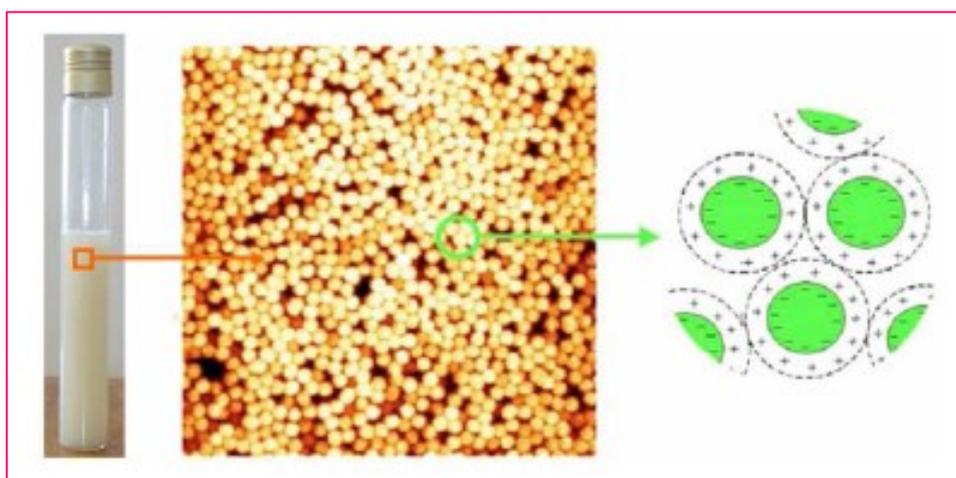


Figure 6.1. Trois échelles caractéristiques dans une suspension.

Suivant qu'une particule soit Brownienne ou non, elle sera soumise ou non aux forces de gravitation, à l'agitation thermique et aura un comportement spécifique sous écoulement (force hydrodynamique).

6.2. Le mouvement brownien et la gravité :

Des particules solides plongées dans un solvant sont soumises à des collisions de la part des molécules du fluide, à cause de l'agitation thermique. Si les particules sont suffisamment grandes, les chocs sont isotropes. La quantité de mouvement moyenne reçue est nulle. Seules les forces de gravité s'exercent sur les particules qui sédimentent. En revanche, pour de très petites particules, la quantité de mouvement induite n'a pas une moyenne nulle : les particules diffusent dans le liquide interstitiel. Cette diffusion s'oppose à la sédimentation et un état d'équilibre s'établit.

Ces mouvements browniens permettaient aussi d'expliquer la capacité qu'ont certaines suspensions à recouvrer leurs propriétés initiales après une période de repos suffisamment longue.

6.3. Interface minéral-solution :

6.3.1. Double couche électrique :

Les particules d'argile en suspension doivent leur stabilité à la répulsion mutuelle quand leurs doubles couches électriques diffuses se mettent en contact agissent l'un sur l'autre à l'approche. Dans les systèmes argile-eau, une double couche se forme à partir de la charge négative de surface et de la charge du cation compensateur figure 6.2. Dans le cas des particules d'argile, la charge négative est une conséquence des imperfections dans l'intérieur du cristal. Les colloïdes d'argile possédaient une charge constante, parce que sa charge extérieure résulte de la substitution isomorphe.

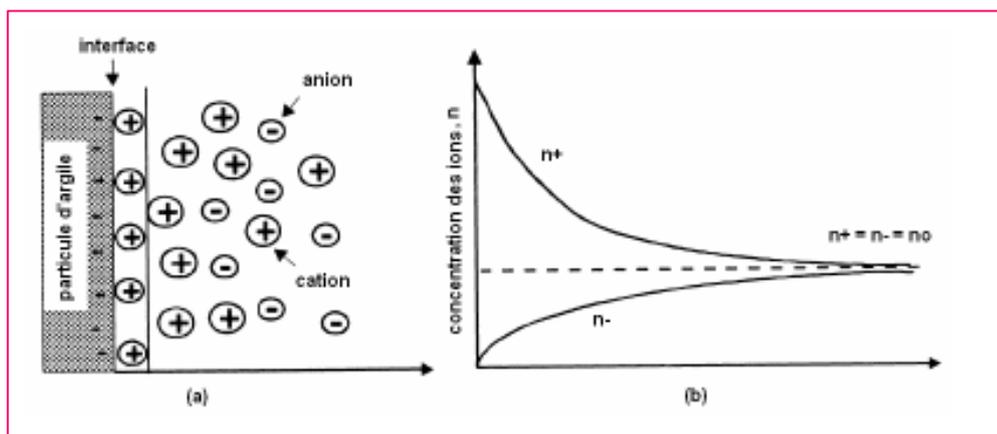


Figure 6.2 : (a) Structure de la double couche électrique diffuse à la surface d'une particule d'argile, et (b) distribution de la concentration en anions (n^-) et les cations (n^+) en fonction de la distance de la surface avec une concentration en bloc de n_0 .

Les ions autour de la particule d'argile sont électrostatiquement attirés par la surface de charge opposée. Ces ions ont une tendance de diffuser loin de la surface dans la solution où la concentration est inférieure. Par conséquent, la concentration des ions près de la surface des particules est grande, et elle diminue avec l'augmentation de la distance de la surface. La couche diffuse se compose non seulement d'un excès des ions du signe opposé ; il y a une insuffisance des ions du même signe près de la surface, puisque les ions sont électrostatiquement repoussés par la surface. Ce caractère diffus de l'atmosphère des ions a été identifié par **Gouy et Chapman** qui a présenté un traitement théorique de la distribution des ions. Leur théorie prévoit une diminution exponentielle approximative du potentiel électrique de la solution avec une distance x du plan de la surface.

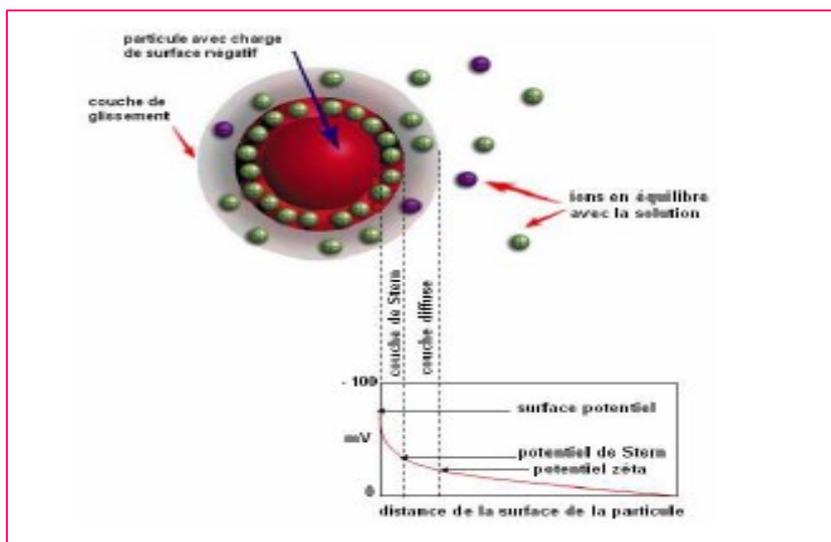


Figure 6.3 : Représentation de la double couche électrique.

6.3.2. Adsorption des ions sur la surface du minéral :

L'adsorption est le phénomène qui consiste en l'accumulation d'une substance à l'interface entre deux phases (gaz-solide, gaz-liquide, liquide-solide, liquide-liquide, solide-solide). Quand un solide est mis en contact avec une solution, chaque constituant de cette dernière : le solvant et le soluté, manifeste une tendance à l'adsorption à la surface du solide. Il y a donc une compétition en surface entre deux adsorptions qui sont concurrentielles, la qualité de chaque composé adsorbé dépend de sa nature chimique, de sa concentration et de la température.

La couche physisorbée ne pourra être, le plus souvent, que monomoléculaire, car, au-delà de la première couche, les interactions soluté-solvant l'emportent sur les interactions soluté-surface.

6.4. Les forces dans une suspension :

6.4.1. Forces volumiques :

Les forces dynamiques que nous considérons sont des forces dont l'amplitude dépend de la taille

des particules. Nous en considérons trois : Brownienne, hydrodynamique et gravitationnelle. Les suspensions peuvent se séparer en deux familles de particules suivant qu'elles sont colloïdales ou non.

Une particule est considérée comme colloïdale lorsque sa taille est telle qu'aucune séparation de phase rapide ne se produit par sédimentation ou par crémage. La taille critique d'un colloïde dépend donc des caractéristiques physiques des constituants du système (viscosité du solvant, différence de densité entre la particule et le milieu continu...). Cette taille peut se calculer simplement en comparant t_s le temps caractéristique de sédimentation sur une distance de la taille du rayon de la particule et t_d le temps pour que cette particule parcourt la même distance par agitation thermique.

$$t_s = \frac{r}{V_{stokes}} \quad \text{et} \quad t_d = \frac{r^2}{D} \quad \text{équation ...6.1 et équation ...6.2}$$

Où V_{stokes} est la vitesse de sédimentation d'une particule de rayon r et D le coefficient de diffusion :

$$V_{stokes} = \frac{2 \Delta\rho g r^2}{9 \mu} \quad \text{et} \quad D = \frac{T K_B}{6\pi\mu r} \quad \text{équation ...6.3 et équation ...6.4}$$

Si $t_d \ll t_s$ l'effet de la gravité est négligeable ; la particule est colloïdale.

Si $t_d \gg t_s$ l'effet de la gravité entraîne la sédimentation des particules.

La limite colloïdale peut donc se définir pour $t_d = t_s$ soit :

$$r = \left(\frac{3 T K_B}{4\pi\Delta\rho g} \right)^{1/4} \quad \text{équation ...6.5}$$

Ainsi des particules colloïdales sont maintenues en suspension par le mouvement Brownien. Cette agitation permet des collisions entre les particules qui peuvent entraîner ou pas une agrégation suivant la nature des interactions de surface. Il est toutefois possible d'éviter ou de limiter la sédimentation d'une suspension de particules non colloïdales et non flocculées en ajustant leur densité avec celle du milieu dispersant ou encore en augmentant la viscosité du milieu dispersant.

6.4.2. Forces de surface :

La sédimentation peut être évitée si les particules interagissent entre elles pour former un réseau capable de résister à son propre poids. Ces interactions interparticulaires se contrôlent avec les forces de surface. Une suspension est stable devant la gravité sous deux conditions :

- Les particules doivent avoir un rayon a inférieur à un rayon critique r^* . Si $t > r_c$ la structure devient instable sous l'effet de la gravité : elle s'effondre sous son propre poids.
- Leur concentration en solution doit être supérieure à une valeur critique. Il faut que leur concentration soit suffisante pour que les particules puissent former un réseau tridimensionnel rigide.

Le contrôle des forces interparticulaires permet d'obtenir des suspensions de particules dans des états dispersés, faiblement floculés ou coagulés. La formation d'une structure floculée permet d'éviter la sédimentation de particules non Browniennes. Cette structure est stable si les forces cohésives entre les particules sont comparables à la force de gravité qui s'exerce sur elles.

La présence d'un point de trouble, fonction de la température et de la salinité, conditionne l'utilisation et l'efficacité des systèmes aux glycols. Les glycérols et glycols de masse molaire élevée ($M > 10\ 000$ D) ne sont pas adsorbés à la surface et ne permettent pas le colmatage des pores. L'utilisation de glycérols et de glycols de faible masse molaire a été souvent recommandée pour la stabilisation des argiles.

La stabilité colloïdale est gouvernée par le potentiel total V_t qui est la somme de toutes les contributions des potentiels issus des forces de surface. Nous dénombrons six forces de surface différentes qui sont de nature répulsive ou attractive :

- Répulsive : stérique, électrostatique, solvation
- Attractive : van der Waals, déplétion, hydrophobe et électrostatique (cas des ions multivalents).

Le potentiel global s'écrit simplement comme la somme :

$$V_t = V_{str} + V_{elect} + V_{solv} + V_{vdw} + V_{dpl} + V_{hydr} \quad \text{équation6.6}$$

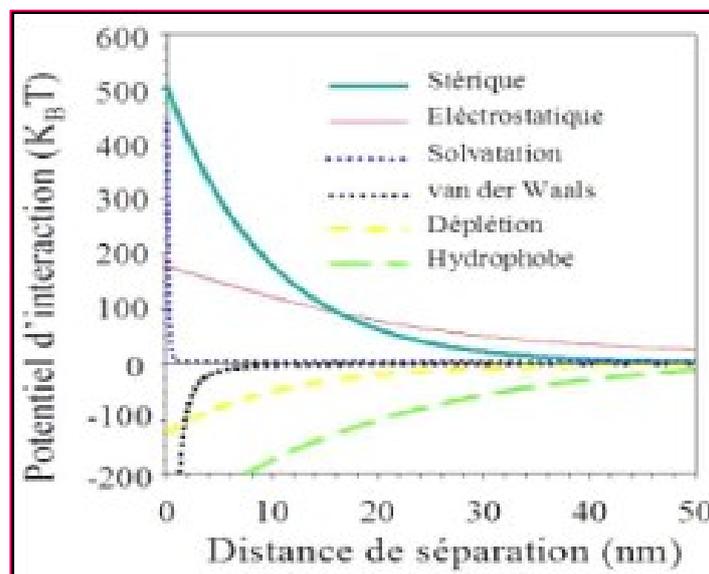


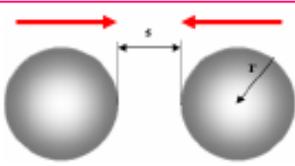
Figure 6.4 : Potentiels d'Interaction de surface en fonction de la distance à la surface.

Les évolutions des potentiels d'interaction avec la distance à la surface d'une particule. Les forces d'origines stérique, électrostatique ou de solvation sont de nature répulsive alors que celles de type van der Waals, de déplétion ou hydrophobe sont attractives.

• *Forces de Van der Waals*

Au sein d'une molécule, le mouvement des électrons, chargés négativement, autour du noyau, chargé positivement engendre des forces électromagnétiques attractives : les molécules se comportent comme des dipôles électriques où les charges opposées s'attirent. L'ensemble de ces forces est communément appelé forces de Van der Waals. Elles sont additives et varient avec la taille et la force des surfaces de particules.

Les forces à longue distance issues des interactions de van der Waals sont toujours attractives entre des particules identiques. Le potentiel de van der Waals dépend de la distance avec une amplitude qui est fonction des propriétés diélectriques des particules en interaction et du milieu dispersant. Pour les particules sphériques le potentiel s'exprime via l'expression de **Hamaker** :

$$V_{vdw} = -\frac{A}{6} \left(\frac{2}{x^2 - 4} + \frac{2}{x^2} + \ln \left(\frac{x^2 - 4}{x^2} \right) \right)$$


Où

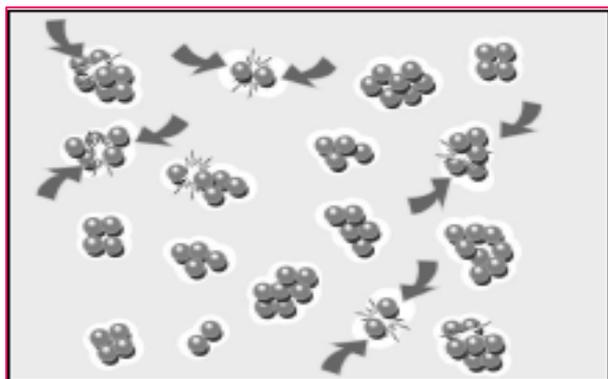
$$x = \frac{2r+s}{r}$$

équation6.7 et équation6.8

r : est le rayon des particules, s la distance entre les surfaces des particules et A la constante de **Hamaker**. Le tableau 6.1 donne des valeurs de cette constante pour certains matériaux dans l'eau.

Tableau 6.1 : *Constante de Hamaker de quelques milieux.*

Constante de Hamaker (10 ² *J)	
Matériau	Dans l'eau
SiO ₂ (amorphe)	0.46
SiO ₂ (quartz)	1.02
Al ₂ O ₃	3.67
MgO	2.21



Figures 6.5. Attraction des particules sous l'effet des fortes de van der Waals

Mais l'attraction ne va pas jusqu'au contact direct entre molécules ; lorsque les nuages électroniques s'interpénètrent, des forces répulsives apparaissent, (forces de Born), et viennent contrebalancer l'attraction. Il existe un puits de potentiel où l'énergie d'attraction est minimale.

- **Forces électrostatiques**

Dans les systèmes colloïdaux, les forces interparticulaires répulsives sont liées aux différentes charges surfaciques des particules en présence. Le milieu étant électriquement neutre, la répartition des charges n'est pas homogène. Ces charges opposées s'attirent tandis que celles de même signe se repoussent). Cet effet est caractérisé par la force ionique :

$$I = \frac{1}{2} \sum_t C_t Z_t^2 \quad \text{équation ...6.9}$$

où C_t est la concentration en ion d'espèce t de charge Z_t .

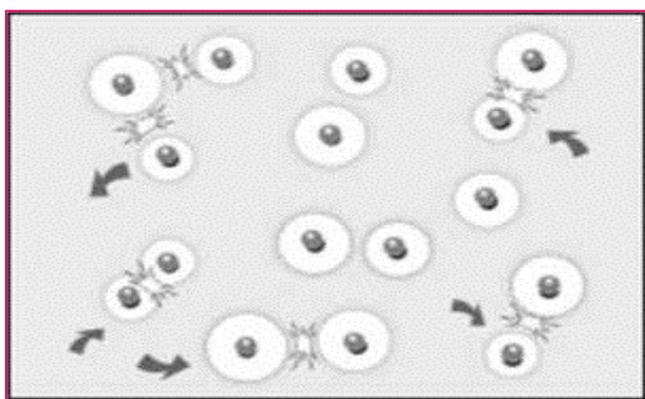


Figure 6.6 : Répulsion des particules sous l'effet des forces électrostatiques.

Les forces électrostatiques répulsives permettent de stabiliser les suspensions de particules. Dans notre cas, les particules d'argile et les macromolécules des polymères sont chargées

Négativement dans la gamme de pH utilisée (pH compris entre 9 et 10). Les charges de surface entraînent des répulsions à longues portées qui stabilisaient la suspension.

Deux particules dont les centres sont séparés de la distance r , se repoussent l'une de l'autre avec un potentiel d'interaction V_{elect} :

$$V_{elect} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 r\psi_s^2 \ln(1 + e^{-K(s-2r)}). \quad \text{équation6.10}$$

Où

ψ_s est le potentiel de surface des particules, ϵ_0 $8.8 \cdot 10^{-12} C^2 J^{-1} m^{-1}$ est la permittivité du vide, ϵ est la constante diélectrique des particules, r leur rayon. K^{-1} est la longueur de Debye ; c 'est la longueur caractéristique de la décroissance du potentiel électrostatique.

6.5. Adjuvants : cas des polymères :

Un autre moyen de contrôler l'état de dispersion d'une suspension consiste à ajouter des forces stériques, hydrophobes. De déplétions. Ces forces peuvent être introduites en adsorbant des molécules organiques sur la surface des particules. Pour que la répulsion soit efficace, il est important de respecter certaines règles qui prennent en compte le type de molécules adsorbées ainsi que leur concentration d'utilisation.

6.5.1. L'effet de la nature du polymère :

Le choix du polymère dans une suspension tels que les fluides de forage est difficile à constituer un métier à part entière. L'architecture du polymère joue un rôle capital. Il est important de contrôler :

- L'adsorption ou pas du polymère sur la surface minérale ;
- Les parties hydrophiles et hydrophobes de la chaîne ;
- La densité et l'emplacement des charges (positif ou négatif voire les deux) ;
- La taille de la chaîne principale, des greffons ;
- La rigidité, comportement du polymère dans le solvant

L'adsorption d'un polymère sur la surface des particules dépend de tous ces paramètres mais aussi de sa concentration.

6.5.2. Effet de la concentration :

Le comportement d'un polymère mis dans une suspension dépend de sa nature mais aussi de sa concentration. Les évolutions avec la concentration sont différentes suivant que le polymère s'adsorbe ou pas sur la surface des particules.

6.6. Etude de l'effet des polymères sur propriété physico-chimiques et rhéologiques.

6.6.1. Mesures de potentiel électrocinétique des systèmes.

Afin de pallier les difficultés liées aux limites dans la compréhension actuelle du comportement rhéologique du système étudié, il a été nécessaire d'orienter notre étude macroscopique vers une approche microscopique régissant des interactions minéral-solution et des interactions physiques ou chimiques existant entre particules en suspension, reposant sur la notion du potentiel électrocinétique. A cet effort des mesures de potentiel zêta ont été présentées s'avèrent nécessaires sur des échantillons de boue et sur des solutions de polymères.

6.6.2. Caractéristiques rhéologique et physico-chimique de Xanthane.

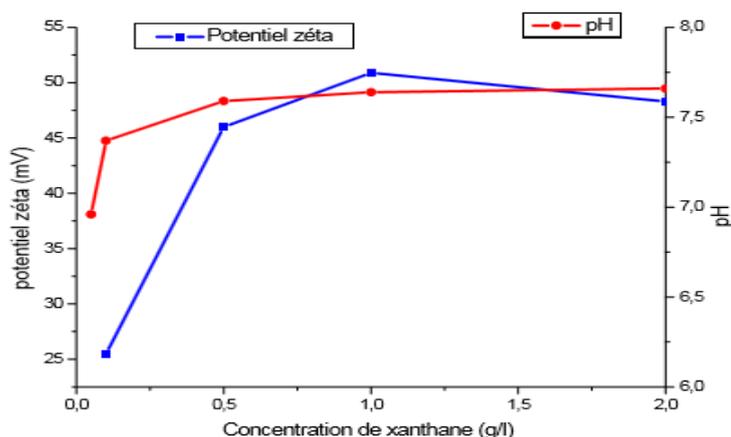


Figure 6.7. Effet de la concentration de la xanthane sur le potentiel et PH.

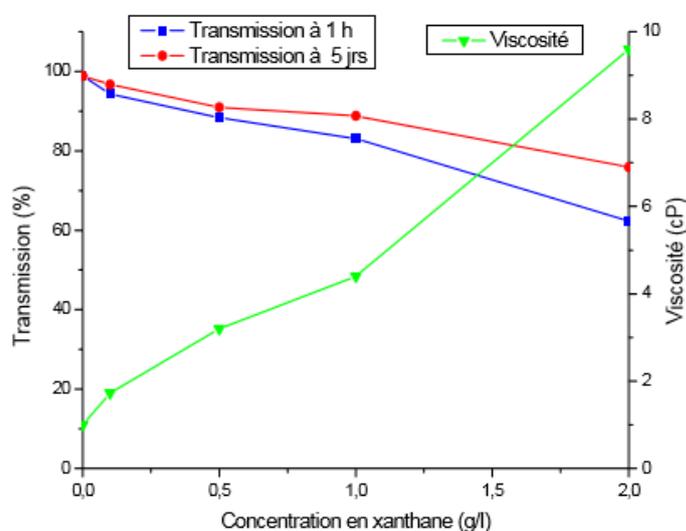


Figure 6.8. L'effet de la concentration de Xanthane sur la transmission et la viscosité.

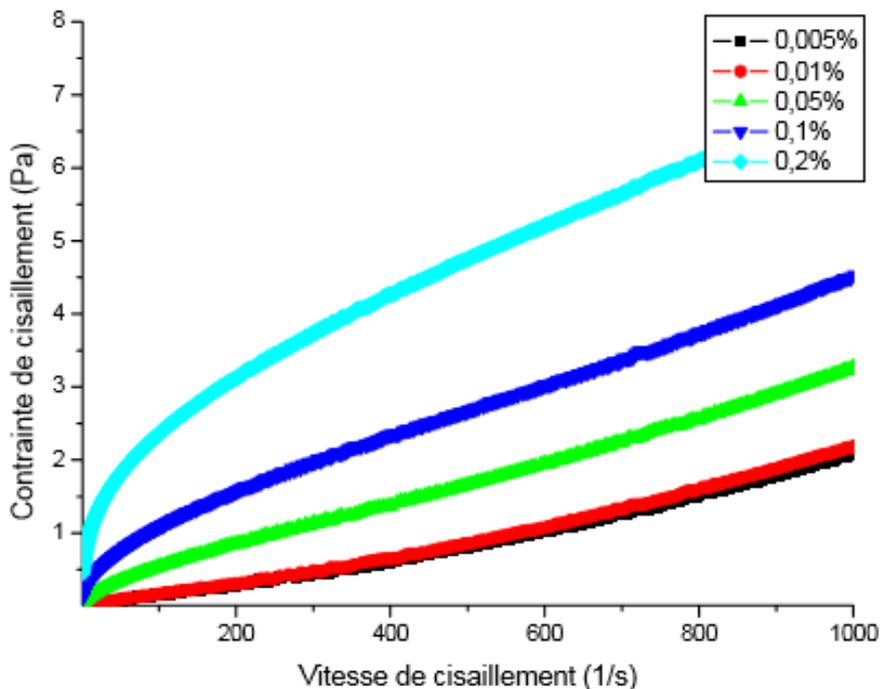


Figure 6.9. La rhéogrammes des solutions de la gamme de xanthane.

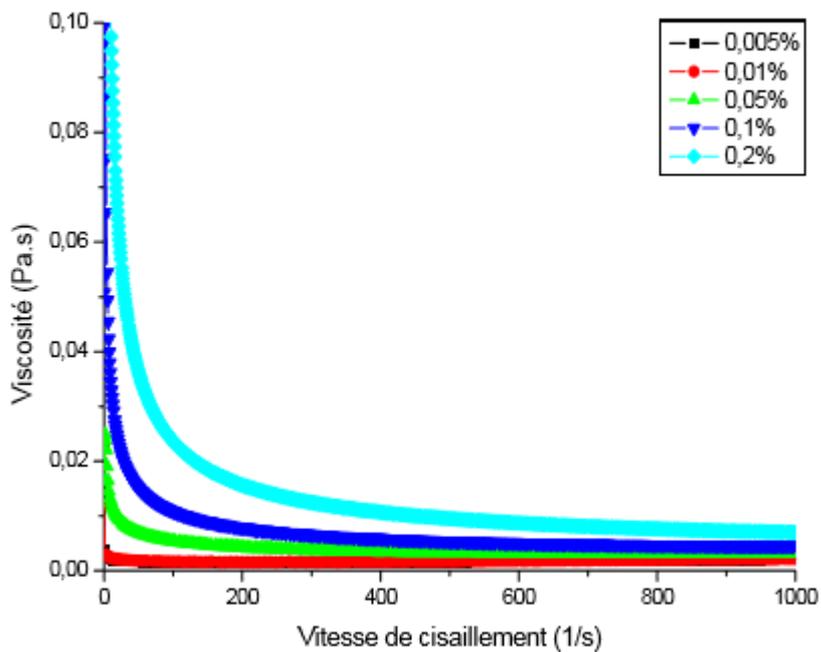


Figure 6.10. Viscosité de la gamme de xanthane dans l'eau en fonction de vitesse de cisaillement

Interprétations.

Les propriétés rhéologiques des solutions de xanthane dépendent en premier lieu du degré d'association des molécules et donc du régime de concentration en polymère dans lequel on se place. La masse moléculaire est un paramètre qui influe largement sur les résultats rhéologiques. Une fois dispersés dans l'eau, les molécules de haut poids moléculaire du xanthane forment des agrégats complexes par les liaisons hydrogènes et l'enchevêtrement des chaînes du polymère. En raison de ces réseaux fortement ordonnés, les solutions de xanthane montrent une viscosité élevée à faibles taux de cisaillement mais à plus grands taux on remarquera une diminution de la viscosité, dû à la désagrégation du réseau et à l'alignement des différentes macromolécules dans la direction du cisaillement. D'après les rhéogrammes dans la figure (II.3) et de la figure (II.4).

Toutes les solutions montrent un écoulement non Newtonien la même observation a été donnée par d'autres auteurs **AHMED.K 2006**. La variation de la viscosité des dispersions aqueuses de xanthane, à différentes concentrations, a été examinée en fonction du gradient de cisaillement. La viscosité a diminué avec le taux de cisaillement (cisaillement amincissant). Cependant, la viscosité du xanthane a augmenté avec sa concentration.

Une caractéristique importante de la rhéologie du xanthane est la présence d'une contrainte seuil, qui représente un effort exigé pour commencer l'écoulement **M'BOD.O 2009**. Cette contrainte diminue avec la diminution de la concentration cela est du probablement à la formation d'un gel de structure faible, vu la non suffisance dans la quantité de polymère dans la solution. Le modèle de Herschel Bulkely est celui qui convient pour décrire les propriétés rhéologiques des solutions, la gomme de xanthane s'est comportée en solution comme un fluide pseudoplastique avec une contrainte seuil **J. AHMED et H.S. RAMASWAMY**.

Selon la figure (II.1) l'augmentation du potentiel Zêta en fonction de la concentration ceci peut être expliqué par l'apport des charges. La densité des chaînes de polymères chargés en signe négatif augmente dans le milieu d'où l'explication de cette augmentation dans le potentiel Zêta, puis il diminue légèrement pour une concentration de 2 g/l lié certainement à la saturation en charge du milieu. Le pH augmente puis il se stabilise pour une valeur ≈ 6 . La figure (II.3) révèle qu'avec l'augmentation en concentration de la gomme de xanthane la viscosité augmente ce qui est claire, cette augmentation se répercute sur la transmission qui diminue (de 94,3 % à 62,3 %) et augmente en fonction du temps de vieillissement des solutions de xanthane.

PARTIE

EXPEPIMENTAL 02

CHAPITRE 7.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE D'AIN SALEH

Introduction :

L'avis des spécialistes dans la région de sud algérien, complété par la consultation de plusieurs sujets de recherche, nous a orientés vers le choix des argiles de la région d'Ain Salah comme exemple pratique pour notre étude expérimentale.

Puisque ces argiles sont très connues par leurs potentiels de gonflement qui provoque l'instabilité des parois.

Cette région est caractérisée par la présence des argiles à fort potentiel de gonflement, pour cela nous avons fait ce sujet de recherche.

7. Région d'In Salah :

7.1. Situation géographique :

La ville de In Salah, chef de lieu de la daïra, se situe à 670 Km au Nord de son chef-lieu de Wilaya, Tamanrasset, elle est à 800 Km au Sud de Ouargla et à 1300 Km au Sud de la capital (Alger). In Salah se trouve à environ 268 m par rapport au niveau de la mer elle se situe entre les longitudes : $27^{\circ}08'$ et $27^{\circ}18''$ et les altitudes : $2^{\circ}22'$ et $2^{\circ}36'$

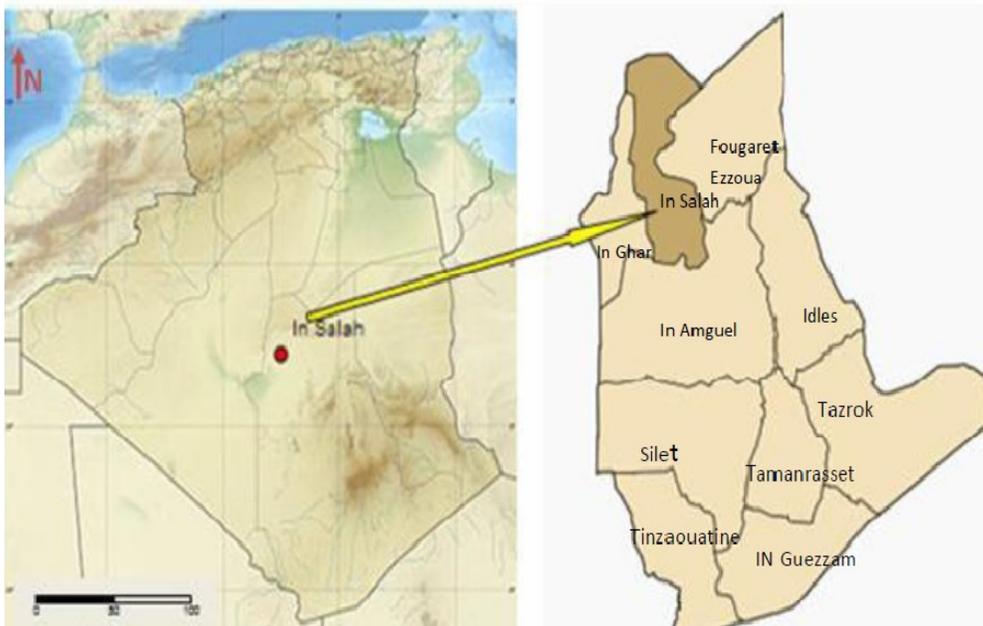


Figure 7.1: Situation géographique de d'In Salah.

7.2. Contexte Géologique :

7.2.1. La Structure Géomorphologique :

La région d'In Salah constitue la limite sud du grand plateau de Tidikelt. Elle est caractérisée par deux traits morphologiques.

Le plateau (Reg) est une vaste plaine allongée sensiblement NE – SW, limitée au sud par les affleurements du primaire et au nord par les falaises des formations du crétacé supérieur. Les altitudes du plateau sont limitées par la courbe de niveau 275 et 300 m.

La pente est généralement très faible, elle est de l'ordre de 1% et le pendage est vers le Sud-Ouest.

La **dépression** qui marque la limite sud-ouest du plateau de Tidikelt caractérise l'extrémité occidentale des palmeraies, et les sebkhas qui sont des successions de petites sebkhas qui marquent la limite sud du bassin occidental (zone Tidikelt) et constituant l'exutoire naturel des eaux de la nappe aquifère.

7.2.2. La Géologie régionale :

La zone d'étude est intégrée dans l'ensemble de la plateforme saharienne, cette dernière est relativement stable (peu déformée) et caractérisée par la présence des terrains primaires qui sont affectée par des plissements, ils sont surmontés par les séries du continental intercalaire (crétacé supérieure) se terminant par des formations du tertiaire continental. La couverture de la plateforme saharienne est constituée par le Protérozoïque supérieur ou l'Infracambrien, le paléozoïque et le mésozoïque. La zone est située au Nord du bassin de l'Ahnet, ce dernier s'est formé pendant le Silurien, mais son évolution s'est transformée en un élément tectonique indépendant, puis s'est poursuivie jusqu'à la fin du Paléozoïque où cette dépression a été bien structurée et individualisée. Il existe une importante érosion des séries paléozoïque qui se trouvaient dans une position haute. La discordance hercynienne matérialise cette surface d'érosion et sépare ainsi les séries paléozoïques de séries mésozoïques. Sur la majeure partie du bassin de l'Ahnet, la couverture sédimentaire est représentée par les séries paléozoïques. La sédimentation essentiellement détritique est liée à des environnements très variés (continentale, glaciaire, marin et marin littoral). Au mésozoïque, elle est surtout continentale et marine (**Mézine, 1992**).

7.2.3. La Stratigraphie :

On se basant sur la carte géologique d'In Salah et les informations fournies par les forages pétroliers ; le log litho stratigraphique des formations géologiques rencontrés dans la région d'In Salah est le suivant :

Paléozoïque :

Les sédiments du paléozoïque sont largement développés dans le Sahara. Mais dans la zone de In Salah on remarque que le paléozoïque est profond et moins affleurant par rapport à d'autres régions au sud de In Salah et aux terrains du bassin de l'Ahnet et cela est dû à l'élargissement du continental intercalaire.

Dévonien :

Dévonien inférieur : Il est généralement constitué par des argiles gréseuses avec des passages de grès au sommet (zone de passage). La radioactivité à la base de ces argiles constitue un bon repère diagraphique, donc la succession de bas en haut des formations se présente comme suit :

- ensemble argilo-gréseux, il est formé par des argiles plus ou moins silteuses et micacées, des grès fins à très fins ;
- essentiellement quartzique ou siliceux quartzique compacte.
- constituée à la base par des argiles silteuses et au sommet par un banc de grès propre, fin et moyen (réservoir hydrocarbure)

Dévonien moyen : Moins épais que l'inférieur et dominé par les faciès marins, composé de bas en haut par :

- Des argiles carbonatées et marnes avec des passages de calcaire et de grès.
- Calcaire compacte et passées d'argile.

Dévonien supérieur : Formé par Frasnien, Famennien et Strunien. Il est caractérisé essentiellement par la présence d'argile schisteuse et argiles versicolores dans tous les niveaux.

à la base, on trouve des argiles schisteuses riches en matière organique surmontées par des argiles gréseuses, quelque gravier et gypses.

Au milieu, il y a un ensemble gréseux à stratification variée, avec un mélange de gravier ou d'argile et gypse.

Carbonifère :

Le Carbonifère correspond au cycle sédimentaire paléozoïque final. On peut l'observer dans les domaines occidentaux et orientaux, séparés par le môle d'Amguid-El Biod Messaoud, d'où les dépôts sont absents. Les faciès varient, de marin profond jusqu'à continental. De même, les épaisseurs varient

De 900m à l'est pour atteindre 2800m à l'ouest, en général les forages d'eau montrent que cet âge est constitué essentiellement par des formations imperméables argileuses avec intercalations des faciès gréseux. Donc :

- ✓ A la base ; on remarque les passages argilo-gréseux plus ou moins épais
- ✓ Au milieu, on observe quelques blocs de calcaires associés avec les argiles, graviers fins et gypses
- ✓ les sommets sont formés par des grès fins, sables fins, gyps, des poches continentales et argiles plastiques.

Le mésozoïque :

Discordant sur le Paléozoïque, il est représenté par les dépôts salifères du Trias et argilo-gréseux du Crétacé. Le Mésozoïque est développé dans les zones les plus déprimées des bassins sahariens, principalement dans le Sahara septentrional.

Crétacés inférieur (continentale intercalaire) :

Il est partout transgressif et discordant sur la série du paléozoïque. Il est épais de 1620 m de la base au sommet. Le continental intercalaire est épais et large à cause de son affleurement important sur le paléozoïque. En géologie, le continental intercalaire désigne les formations continentales qui sont déposées entre le cycle marin du paléozoïque clôt par l'orogénèse hercynienne et la transgression marine du cénomani. Elle couvre une large période du trias à l'Albien. Les logs des forages d'exploitation et de reconnaissance montrent que le continental intercalaire dans la zone d'étude est constitué, de la base au sommet, par les formations suivantes :

- ✓ Une série d'épaisseur variant de 20 à 90m. Elle est constituée par des Sables fins argileux.
- ✓ Des séries de grès à gravier fin parfois siliceux, et des intercalations d'argiles gréseuses, avec une épaisseur variant de 15 à 150m.
- ✓ Une série de 20 à 200 m d'argiles rouges parfois pressées ou légèrement sableuses ; avec la présence de minces niveaux de calcaire dur.
- ✓ Mélange épais 30 à 120m des formations gréseuses avec le gravier moyen et des intercalaires de (calcaire siliceux ou quartzique durs, gravier fin siliceux sable grossier et grès argileux).
- ✓ Des bancs gréseux durs à très durs de 5 à 150 m d'épaisseurs avec des sables siliceux et argiles limoneuses.

Crétacés supérieure :**Cénomaniens :**

Le Cénomaniens constitue la couverture sédimentaire du continental intercalaire. Il est constitué par la dolomie finement cristallisée et argile plastique brun et rouge.

Turonien :

D'épaisseur variant de 70 à 120 m, il est formé d'alternance de calcaires dolomitiques et crayeux.

Sénonien :

Épais de 465 m il s'agit d'une sédimentation marno-calcaire. Il est constitué par : Sénonien supérieur : Calcaire, calcaire à silex et argile. Sénonien inférieur : Argile à gypse, calcaire à silex rubané et grès.

Quaternaire :

Le quaternaire est le résultat de la destruction des roches par les phénomènes naturels (érosion – l'écoulement à cause de la température). Il est caractérisé essentiellement par des Alluvions argileux sableuse. Les dépôts du Quaternaire sont formés de couches de sables d'épaisseurs de 0 à 20 m.

CHAPITRE 8.

CARACTERISATION ET COMPOSITION MINERALOGIQUE DES CUTTINGS

Introduction :

Les minéraux argileux peuvent être étudiés à différentes échelles, de l'atome au paysage avec des méthodes appropriées. L'observation de lames minces permet une approche micro-morphologique qui consiste à étudier la distribution des argiles dans la roche sédimentaire. La fabrique ou agencement des particules argileuses s'étudie via la microscopie électronique à balayage (MEB); la morphologie des particules s'observe plutôt au microscope à transmission (MET). Le degré d'hydratation des assemblages argileux s'obtient via des analyses thermiques différentielles (ATD) ou thermogravimétrique (ATG,). L'étude à l'échelle moléculaire est obtenue par spectroscopie infrarouge (IR), à l'échelle atomique par microscopie électronique à transmission à haute résolution (HRTEM). La composition minéralogique des assemblages argileux est déduite par la diffraction des rayons X (DRX).

8.1. Analyse par diffraction des rayons X

L'objectif de cette expérience était de déterminer la composition minéraux-argileux disponibles dans les échantillons à étudier, ainsi que leurs répartitions en pourcentage.

La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde des rayons X ($0.1 < \lambda < 10\text{nm}$) sur un échantillon argileux orienté ou non. Le rayonnement pénètre le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phases vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté. La condition pour que les radiations soient en phase s'exprime par **la loi de Bragg** :

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad \text{équation 8.1}$$

n : nombre entier correspondant à l'ordre de la diffraction.

λ : longueur d'onde du rayonnement utilisé.

d : espace basal (synonyme : espace atomique ou inter-réticulaire), en angströms.

θ : angle de diffraction.

Lorsque le rayonnement X rencontre des électrons, il est dispersé dans toutes les directions selon des fronts d'onde qui se propagent. Les rayons vont interférer entre eux et le faisceau diffracté mesuré constitue la résultante des interférences constructives. Des centres de dispersion (par exemple des atomes) régulièrement disposés vont engendrer des interférences constructives à des endroits particuliers et destructives à d'autres endroits. Les fronts d'onde résultant de points d'interférences constructives vont engendrer des cônes de diffraction. Les interférences entre les différents cônes de diffraction produisent à nouveau des interférences constructives

Pour une rangée d'atomes, le rayon diffracté se produit selon un angle θ , identique à l'angle d'incidence.

Le rayonnement est dispersé dans toutes les directions. Tous les rayons émis par les atomes d'un même plan sont en phase et contribuent au faisceau diffracté. Ceci est valable pour toutes les rangées d'atomes. La différence de chemin entre le faisceau incident qui arrive sur la 1ère ou la 2ième rangée est équivalente à $2d\sin\theta$. Par conséquent, les rayons dispersés seront en phase et se renforceront si la différence de chemin parcouru est égale à un nombre entier de la longueur d'onde du rayonnement incident λ .

Les tableaux 8.1 et 8.2 montrent des résultats de XRD pour trois échantillons de différentes profondeurs d'un puits dans la zone d'Ain Saleh. l'illite est prédominante jusqu' à 55% . La kaolinite se trouve en moindre proportion avec le chlorite, surtout pour les deux premières profondeurs. Le fort pourcentage en interstratifiés illite-montmorillonite qui atteint plus de 20%, ces dernières présente le phénomène de gonflement des formations traversées, en plus, on a un pourcentage élevé de quartz (51%). En outre, il est important de déterminer la teneur en de pyrite car il cause un problème d'avancement de l'outil de forage (PDC). Ces échantillons contiennent environ 2-10% de pyrite.

Tableau 8.1 la composition minéralogique des échantillons

Cote(m)	Argile	Quartz	Calcite	Dolomite	Sidérite	Barite	Plagioclasse	Pyrite
300-348	42	51	-	-	4	-	4	1
700-750	40	44	4	-	3	-	5	2
1450	60	14	4	6	4	1	1	10

Tableau 8.2 Le pourcentage des argiles.

Cote(m)	Kaolinite	Illite	Chlorite	Phrophyllite	Montmorillonite 14A/22A	interstratifiés I-M	interstratifiés I-C
300-348	20	40	35	-	-	15	-
700-750	20	55	20	-	-	05	-
1450	55	15	20	-	-	20	-

pour plus du détail voir la diffractogramme de l'échantillons dans **l'annexe 1**

CHAPITRE 9.

LES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DES FORMULATIONS DES BOUES

Introduction :

Plusieurs études sur les interactions d'argile-fluide confirment que diverses causes sont à l'origine d'une instabilité du trou de forage : adsorption de l'eau, un gonflement osmotique et échange de cations. Différentes approches de conception WBM sont proposées (**Bol et al., 1992 ; Cook et al, 1993 ; Mody et Hale, 1993 ; Van Oort, 2003**).

De nombreux travaux ont également porté sur la sélection des fluides de forage pour les formations argileux données (**Beihoffer et al, 1988**). Des études plus récentes sur les interactions d'argile-fluide suggèrent une nouvelle approche de la conception WBM.

On tient compte de maintenir la stabilisation du forage dans les argiles réactives en réduisant l'hydratation (gonflement) et / ou d'une dispersion. Ce processus est généralement désigné comme "inhibition".

9.1. Préparation de la formulation de la boue.

L'un des progrès les plus récents dans la technologie de fluide de forage a été le développement de boues à base de polymère, qui sont utilisées avec un sel de potassium pour inhiber les formations argileuses. Les boues KAc-polymères sont généralement considérées comme des boues à base d'eau les plus inhibitrices. L'élément K^+ est adsorbé sur l'argile qui permet de réduire la répulsion entre les particules d'argile.

9.2. Les produits de boue

Le grand nombre de fonctions qui doivent être exécutées par le fluide de forage, a inévitablement mené à la formulation des systèmes complexes. Dans le système KAc-polymère nous avons plusieurs constituants.

9.2.1. Le potassium d'acétate ($KC_2H_3O_2$ ou bien KAc) : C'est la source de K^+ , il est utilisé pour inhiber l'hydratation d'argile, il a été proposé et appliqué avec succès en tant que plus alternative acceptable pour l'environnement au chlorure de potassium (KCl) pour les fluides de forage. Le chlorure de potassium, KCl, fournit des taux de potassium (52% en poids) similaires à celles fournies par la KAc (40% en poids), mais la teneur élevée en chlorure associée à KCl ont un impact sévère sur la vie végétale et de limiter le polymère.

9.2.2. La gomme de xanthane biopolymères tels que XC ou XCD sont utilisés comme des viscosifiants pour la boue salée Polymère. Bien que cette dernière puisse afficher un haut Yield point, ils peuvent être capables de suspendre d'une manière adéquate la barytine ; Par conséquent, de faibles quantités de la gomme xanthane sont ajoutées pour obtenir les propriétés requises de la suspension.

9.2.3. L'amidon : est ajouté pour le contrôle de la filtration dans les boues salées. Un amidon modifié (**amidon traité avec un biocide**) est préféré car ils ont une stabilité thermique d'environ 250 ° C. Amidon Classique de maïs peut être utilisé. Toutefois, il a une stabilité thermique légèrement inférieure, et peut se dégrader par voie bactérienne.

9.2.4. Barytine : est ajouté pour augmenter la densité. La densité augmente, la teneur en bentonite doit être réduite pour empêcher les propriétés rhéologiques excessives et la gélification. Eau et polymère devraient être ajoutés à la barytine pour éviter la rhéologie excessive.

9.2.5. Soda Ash est utilisé pour traiter des Ca^{++} , car la plupart des additifs polymères sont sensibles à Ca^{++} . L'utilisation continue de fortes concentrations de carbonate de sodium peut causer des problèmes de viscosité. Cela permet de maximiser l'efficacité des additifs d'inhibition de l'hydratation des argiles.

9.2.6. Barabuf est utilisé pour fournir une meilleure alcalinité pour tous les systèmes à base d'eau et il est compatible avec toutes système de la boue base d'eau, saumures, et les systèmes de polymères de la saumure. Il va se dissoudre dans l'eau et d'élever le pH d'un système aqueux jusqu'à 10,3.

9.2.7. CLAYSEAL c'est le stabilisateur d'argile est utilisé pour inhiber l'hydratation des argiles. Il est efficace dans la plupart des fluides de forage à base d'eau douce, et saumures à haute salinité, il est adapté pour une température jusqu'à 400 ° F (204 ° C).

CLAYSEAL a un meilleur fonctionnement pour une gamme de pH de 7 à 10, mais est également efficace dans les liquides à base de chaux. Il aide à réduire le risque de bourrage de trépan et améliore l'élimination des solides de forage.

9.2.8. Lime local la chaux est ajouté pour maintenir le pH et elle est une source de calcium. Il est également ajouté pour contrôler la P_M et de stabiliser les propriétés rhéologiques. L'excès de la chaux est habituellement maintenu dans l'intervalle de 2 à 4 lb / bbl **2,835 g/l** et il est une mesure des réserves d'alcalinité qui sont disponibles pour aller

dans la solution en tant que produit de forage et des ions calcium et hydroxyle sont épuisés.

$$\text{Excess Lime, lb/bbl.} = 0.26[P_M - F_W (P_F)]$$

P_M = Alcalinité de la boue.

P_F = Alcalinité du filtrat.

F_W = Fraction de Volume d'eau.

Tableau 9.1. La formulation standard de la boue utilisée.

Active Fluid Products	SG	Standard Formulation (%)	Poids (g)
WATER	1	91	91
BARABUF	3.5	0.46	1.61
Soda Ash	2.5	0.14	0.35
Amidon	1.5	0.87	1.3
PAC L	1.6	0.87	1.39
Xanthane	1.6	0.43	0.69
Lime Local	2.2	0.1	0.22
Barite API Local BB	4.2	6.13	25.74

9.3. Les avantages et les inconvénients de la formulation.

9.3.1. Avantages

- ✓ Inhibition de gonflement d'argile.
- ✓ Résistance à la contamination tels que : ciment, anhydrite, sel (10^5 g / l de Cl⁻).
- ✓ Bonne capacité de nettoyage du trou.
- ✓ Stabilisation de la paroi de puits.
- ✓ La stabilité thermique jusqu'à 400 ° C.

9.3.2. Inconvénient.

- ✓ Corrosion a la saturation par les sels.
- ✓ Contrôleur de filtrat Non économique.
- ✓ Adsorption irréversible du polymère sur les argiles.

9.4. Protocole expérimental et condition de travail

9.4.1. Le viscosimètre FANN 35 SA

Le viscosimètre FANN 35 SA est l'instrument utilisé pour faire nos mesures rhéologiques. Il est constitué de deux cylindres coaxiaux, d'où le fluide à étudier est installé entre les deux cylindres (intérieur et extérieur). un des cylindres tourne à une vitesse donnée, ceci nous amène à déterminer le taux de cisaillement de fluide présent entre les parois des deux cylindres. Le FANN 35 SA est une version qui fonctionne à six vitesses (3, 6,100,200,300,600 tr/min). Le rotor est entraîné par un moteur électrique.

L'équation nécessaire pour déterminer les paramètres rhéologiques :

$$\tau = \text{Lect } \varphi * 5.1$$

$$\dot{\gamma} = \varphi * 1.7$$



Figure 9.1. Viscosimètre FANN 35 SA

9.4.2. Le Hot Cup

C'est un instrument qui sert à chauffer les fluides en moment des examens rhéologique.

9.4.3. Le mixeur

Les mixeurs utilisés sont métalliques (inox) qui en trois vitesse de rotation (800, 14000 et 18500 tr/min), de remarque **HAMILTON BEACH**.



Figure 9.2. Mixeur HAMILTON BEACH.

Lors de nos essais nous avons appliqué une vitesse de rotation de 800 tr/min et ce, pour une bonne mixing de la solution.

9.5. Protocole expérimental

Dans tous les parties de ce travail avant de composer les formulations en va traiter l'eau charger par les ions (Ca⁺, Mg⁺⁺), ce traitement se fait à partir d'utilisation de (1g/1000g) de ce base de carbonate de sodium SODA ASH pour déterminer la dureté d'eau, après en suivant les étapes d'ajutes des produits et le temps d'agitation :

Premièrement on met 1000 ml d'eau traité dans un Mixeur qui tourne avec une vitesse fixée de 800 tr/min, puis on joute le 25,392 g de barite pendant 10 min pour toutes les formulations.

On ajoute les polymère (Amidon, PAC, Xanthane) chaque un unique pendant 10 min, puis les stabilisateur d'argile 5 min et les sels 2 min.

La préparation des formulations se fait à la température ambiante.

Tableau 9.2. Les formulations de la boue utilisées.

Les produit	SG	Mud1 (g)	Mud2 (g)	Mud3 (g)	Mud4 (g)	Mud5 (g)	Mud6 (g)	Mud7 (g)	Mud8 (g)	Mud9 (g)
WATER	1	89,68571	89,4	88,54286	88,68571	88,11429	87,54286	86,68571	86,11429	85,54286
BARABUF	3,5	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59
Soda Ash	2,5	0,357143	0,357143	0,357143	0,357143	0,357143	0,357143	0,357143	0,357143	0,357143
Amidon	1,5	1,285714	1,285714	1,285714	1,285714	1,285714	1,285714	1,285714	1,285714	1,285714
PAC	1,6	1,371429	1,371429	1,371429	1,371429	1,371429	1,371429	1,371429	1,371429	1,371429
Xanthane	1,6	0,681143	0,681143	0,681143	0,681143	0,681143	0,681143	0,681143	0,681143	0,681143
Lime Local	2,2	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Kac	4,2	8,4	8,4	8,4	12,6	12,6	12,6	21	21	21
CLAYSEAL	1,04	0,594286	1,188571	1,782857	0,594286	1,188571	1,782857	0,594286	1,188571	1,782857
Barite API Local BB	4,2	25,392	25,392	25,392	25,392	25,392	25,392	25,392	25,392	25,392

9.6. Comportements rhéologique des fluides formulés

Pour étudier le comportement rhéologique, nous avons représenté l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement

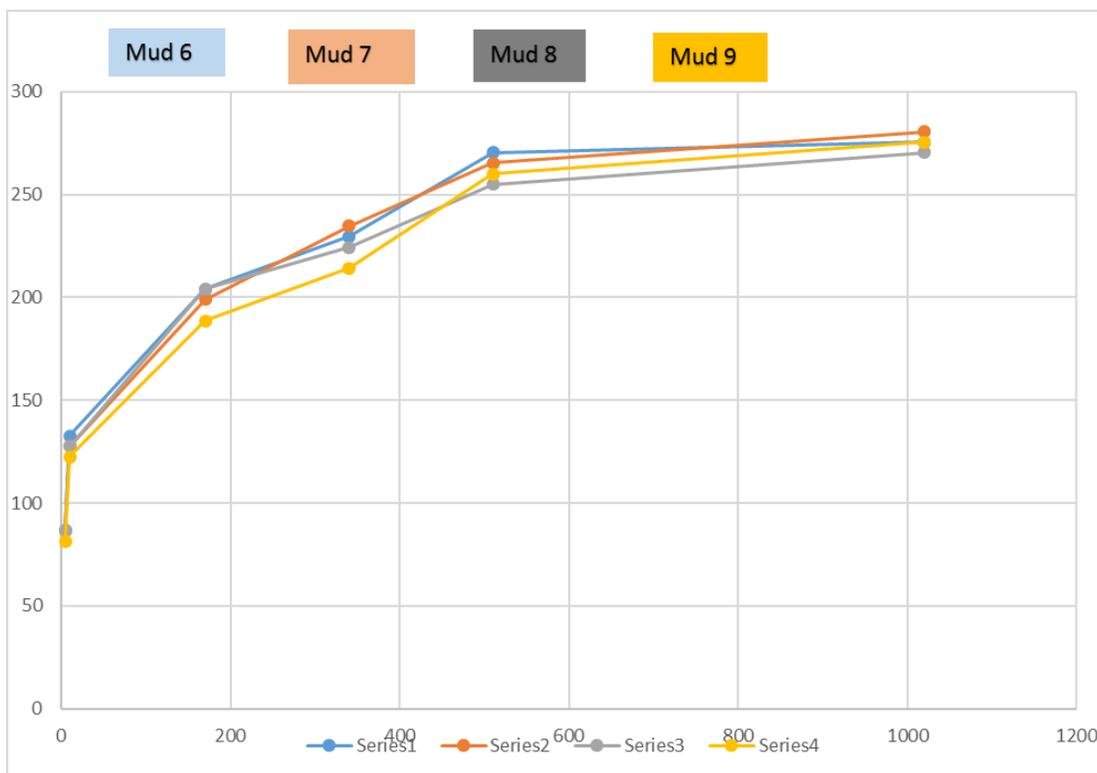
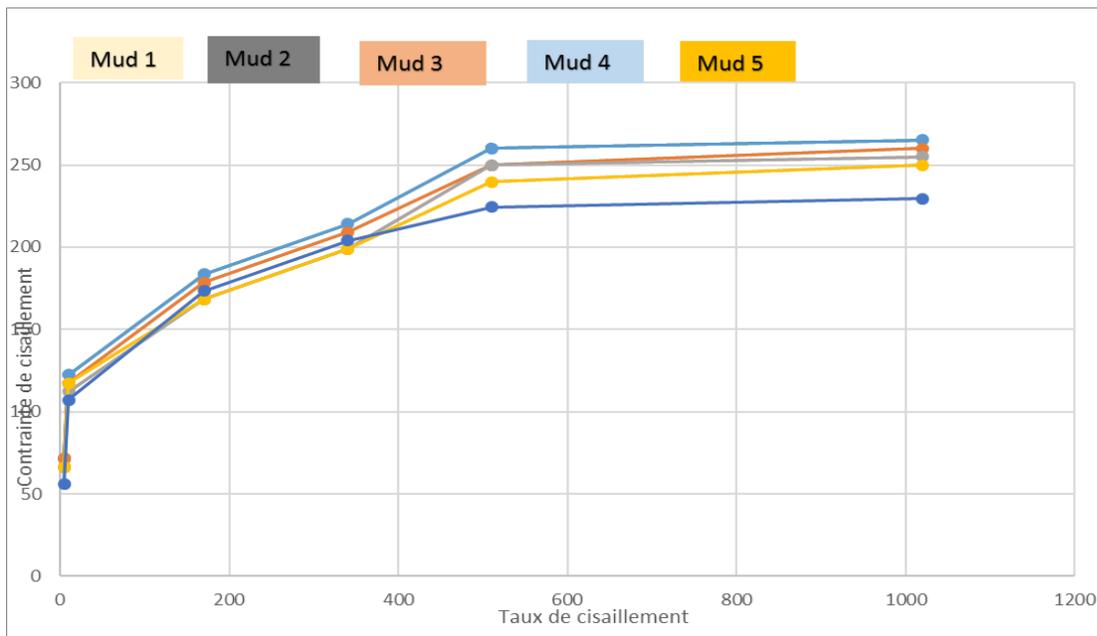


Figure 9.3. et 9.4 La contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement

Les figure 9.1 et 9.2 montrent que le comportement rhéologique de différentes concentrations du sel et le stabilisateur d'argile peut être décrit par le modèle d'Herschel-bulkley qui est donnée par l'équation suivante :

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$$

τ_0 : Contrainte seuil.

K : Indice de consistance.

n : indice d'écoulement.

Ces coefficients on peut déterminer par l'algorithme suivant :

```

%% Script de la régression par la méthode des moindres carrées%%
m=length(X) ;
Ybar=sum(Y) /m;
Xbar=sum(X) /m;
Y=ln(τ-τ0)
X=ln(γ̇)
b=(sum(Y.*X)-m*Xbar*Ybar) / (sum(X.^2)-m*Xbar^2)
a=Ybar-b*Xbar
k=exp(a)
n=exp(b)
    
```

Tableau 9.3. Les résultats des paramètres.

	MUD 1	MUD 2	MUD 3	MUD4	MUD 5	MUD 6	MUD 7	MUD 8	MUD 9
n	0,5734	0,4379	0,3884	0,3632	0,3853	0,3552	0,3545	0,3422	0,378
k	5,097	12,2047	16,3606	19,735	17,4527	20,7718	20,6769	21,8879	17,4067
τ ₀	81,6	71,4	66,4	56,1	51	45,9	40,8	40,8	36,7

On remarque que la viscosité apparente des fluides décroît lorsque le taux de cisaillement augmente.

Tableau 9.4. La viscosité en fonction du taux de cisaillement.

$\dot{\gamma}$	Mud 1	Mud 2	Mud 3
5,1	17	17	17
10,2	13	12,5	12,5
170	1,2	1,17	1,2
340	0,675	0,69	0,66
510	0,53	0,53	0,5
1020	0,27	0,275	0,265

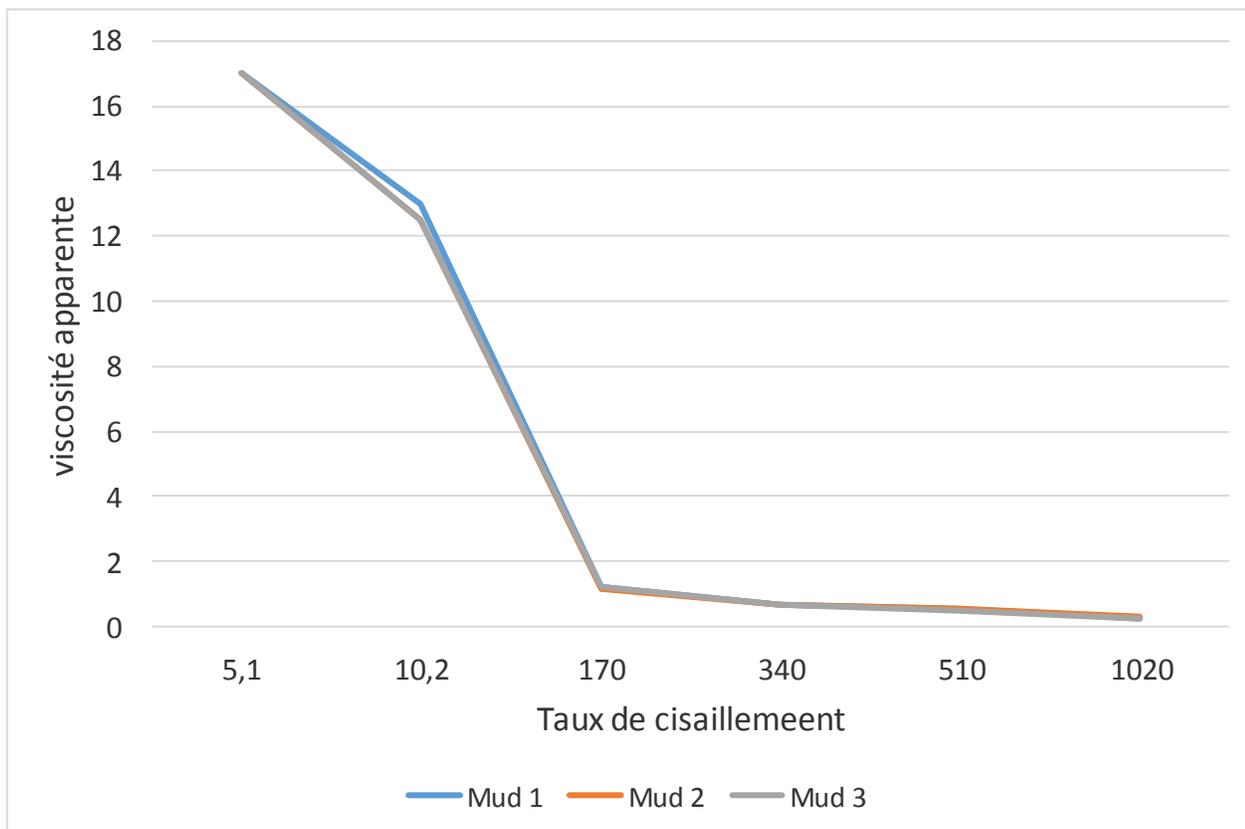


Figure 9. 5 La viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement.

9.7. Effet de la température sur le comportement rhéologique :

9.7.1. Effet de la température sur le comportement rhéologique de Xanthane :

Tableau 9.5. La viscosité apparente en fonction de la température.

TEMP	2g/l=	6g/l	8g/l
100	10	13	15,5
120	12	14,5	16
130	14	18	19
140	14	21	24
150	13	21	28
160	12	20,5	29

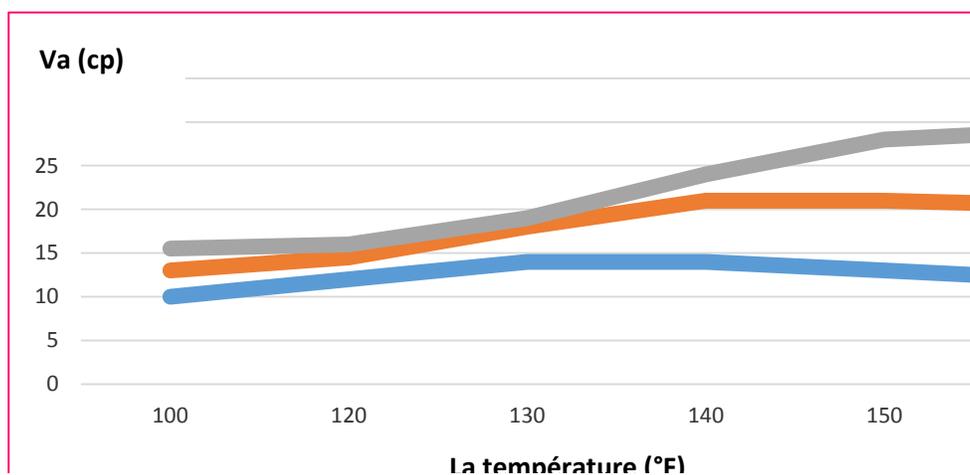


Figure 9.6 Effet de la température sur la viscosité apparente de Xanthane.

Tableau 9.6. La viscosité apparente en fonction de la température.

TEMP	2g/l=	6g/l	8g/l
100	12	15,5	19
120	14	19	21
130	16,5	24	27
140	16,5	27	33
150	15	26	38,5
160	14,5	25	37

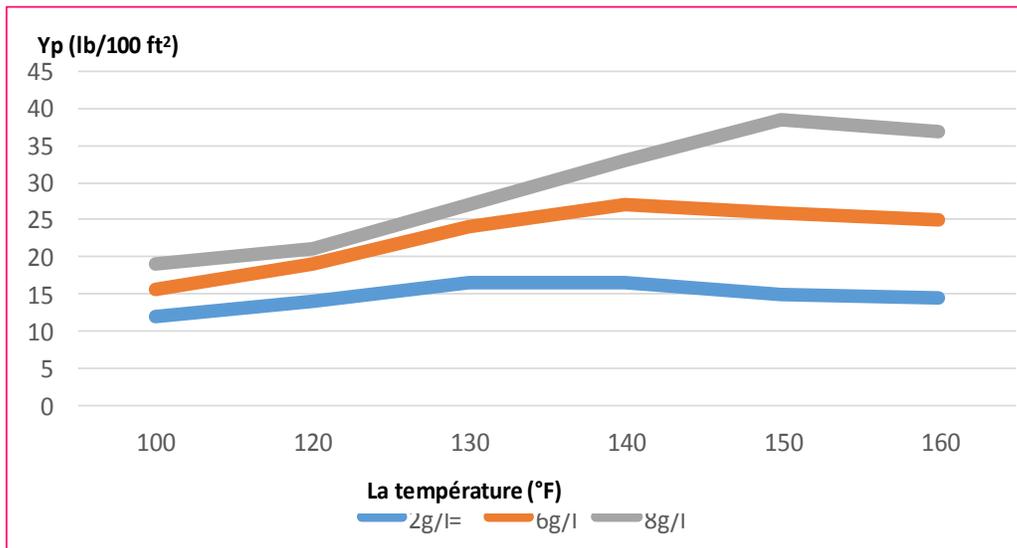


Figure 9.7 Effet de la température sur la yield point de Xanthane.

Interprétation

L'augmentation de la température de la solution des polymères provoquent une diminution de la viscosité à cause de :

- La diminution des forces intermoléculaire du polymère ;
- L'augmentation de la solubilité et l'activité ionique des électrolytes ;

La stabilité thermique des polymères dépend de leurs structures et poids moléculaires.

9.8. Le traitement de la contamination de la boue KAc-Polymère.

Le traitement de la contamination de la boue KAc-Polymer.		
Contaminant	Indicateurs	La Stratégie de traitement
Augmentation de la teneur de solide	L'augmentation de V_p , Y_p , % solides, MBT. Épaisse de mud cake sur les parois	Dilution. Améliorer les éliminations des solides, Traitement mécanique mud cleaner, mud centrifugeuse .
Ciment	L'augmentation de P_m , P_f , PH, gels Y_p , les pertes de la boue, Marsh viscosité.	Traiter avec carbonate de sodium. Si la rhéologie est stabilisée, ajouter de l'amidon ou de PAC pour contrôler propriétés de filtration.
Les sels	L'augmentation des chlorures, Marsh viscosité, Y_p , gel, les pertes	Augmentation la densité pour empêcher intrusion. Pendant le forage des sels massifs.
Gyp/Anhydrite	L'augmentation de Ca^{++} , Y_p , les gels, les pertes. La diminution du pH, P_M , P_F	Traiter avec SAPP, carbonate de soude, ou Carbonate de potassium. Ajouter défloculant pour contrôler les propriétés rhéologiques, si nécessaire
Carbonates	L'augmentation de M_F , Y_p . La diminution de PH, P_M , P_F . Mud cake	Exécutez GGT pour une analyse précise. Élever le pH au-dessus de 10,7 avec du KOH. Ajouter la chaux.

CHAPITRE 10.

EVALUATION D'INHIBITION DU GONFLEMENT DES ARGILES

Introduction :

Généralement, les techniques de laboratoires utilisées pour la détermination du caractère d'inhibition des argiles donnent des résultats variables, pour les tests qui suivent, chacun complète l'autre et globalement ils donnent des résultats très fiables. En utilisant trois échantillons de différentes profondeurs d'un puits dans la zone d'Ain Saleh. Les fluides testés sont à base d'eau en présence de la potassium acétate polymère. Et cela afin de déterminer les paramètres optimums sans oublier qu'il faut atteindre l'objet avec des couts minimums.

10.1. Essai de temps de section capillaire (capillary section timer) :

10.1.1. Le dispositif :

La mesure du temps nécessaire pour une suspension filtrat pour parcourir une distance ou un volume donné sur une épaisseur de papier filtre poreux. Ce dispositif de filtration représenté sur **la figure 10.1** a été initialement développé pour l'Instrument Fann mode 440. Le dispositif CST a été utilisé pour étudier la stabilité d'argile en suspension. Une description de la filtration est représentée par l'équation de la CST

$$V = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{A \Delta P}{(r_k + r_f)} \mu$$

V : volume de filtrat.

μ : viscosité du filtrat.

ΔV : variation de volume.

r_f : résistance du filtre.

Δt : différence du temps.

r_k : résistance du cake.

A : surface de papier filtre.

ΔP : pression différentielle.



Figure 10.1: dispositif de filtration temps de section capillaire.

10.1.1. Méthodes expérimentales

Les expériences de filtration pour cette étude ont été réalisées avec un l'appareil de type Fann mode 440. Les cuttings ont été nettoyés puis ils ont été mis dans un étuve à température de 105°C pendant deux heures, ensuite le refroidissement à la température ambiante, les échantillons d'argile étaient broyés par un broyeur à marteau puis passée à travers un tamis à 75 µm. Ensuite, la saumure est un mélange d'eau avec le Potassium acetate avec différentes concentrations 2,3% et 5%, l'argile-brine a été préparé une quantité de 24ml de saumure avec 2g d'argile tamisée et ils sont mixés avec une vitesse élevée pendant 2 min, et la prise d'un échantillon de 2-5 ml pour le test .

10.1.2 Résultats et discussion

La meilleure valeur de CST correspondante au mélange solution-argile de différentes profondeurs d'un puits foré dans la région d'Ain Saleh est 3% (montré sur les figures ci-dessus), Il est bien connu que les cations dans l'argile peuvent être facilement remplacés par d'autres cations (interaction préférentielle) ce qui montre le scenario de la diminution des valeurs de CST ayant réagi correspond à la quantité des ions de Potassium qui pénètrent dans l'espace interfloculaire et excluent les molécules d'eau, ces derniers se rassemblent et s'écoulent en bas sous l'effet de la pression différentielle.

Echantillon 1 (300-348 m).

Tableau 10.1: CST en fonction de la concentration de KAc ech 1

La cote (m)	CST (Sec) 2% KAC	CST (Sec) 3% KAC	CST (Sec) 5% KAC
300-348	455	463	543

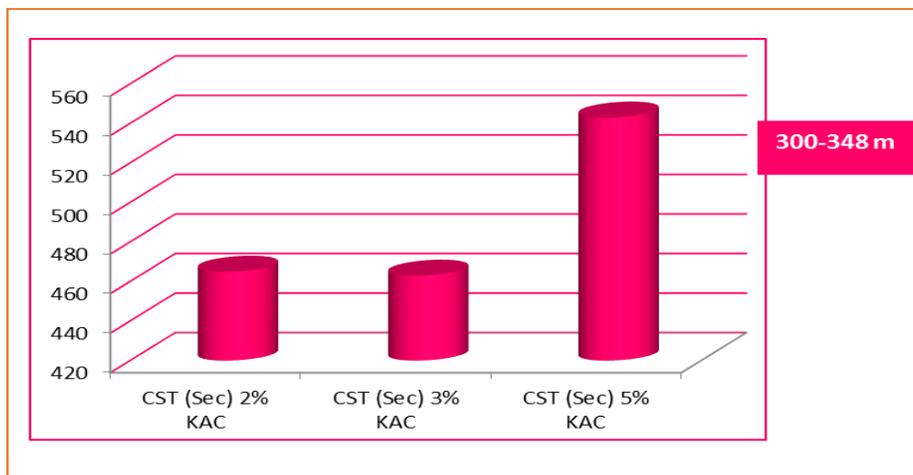


Figure 10.2: CST en fonction de la concentration de KAc ech 1

Echantillon 2 (700-750 m).

Tableau 10.2: CST en fonction de la concentration de KAc ech 2

La cote (m)	CST (Sec) 2% KAC	CST (Sec) 3% KAC	CST (Sec) 5% KAC
750-772	232	204	223

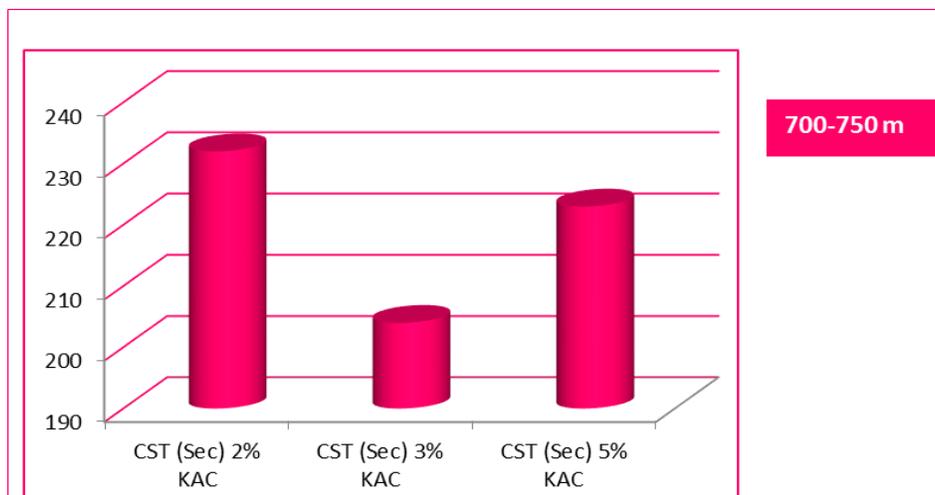


Figure 10.3: CST en fonction de la concentration de KAc ech 2

Echantillon 3 (1450 m).

Tableau 10.3: CST en fonction de la concentration de KAc ech 3

La cote (m)	CST (Sec) 2% KAC	CST (Sec) 3% KAC	CST (Sec) 5% KAC
1450	169	163	208

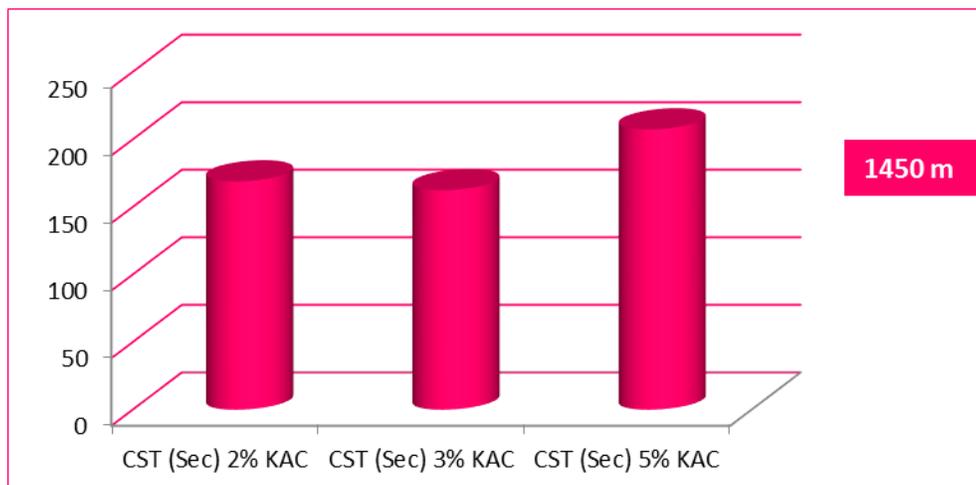


Figure 10.4.: CST en fonction de la concentration de KAc ech 3

10.2. Essai de la dispersion d’argile (Shale Erosion Test) :

10.2.1. Procédure :

Le SET a été réalisé par la méthode American Petroleum Instituée (API RP 13 I). Ce test a été conçu pour simuler l'exposition des déblais à un fluide de forage en particulier pendant le transport vers la surface à travers l’espace annulaire du puits. Un échantillon d’argile a été broyé et tamisé à travers un tamis de 4mm (5mesh) et un autre de 2mm (10 mesh). La sélection des particules d’argile collectée entre les deux tamis afin de les utiliser dans ce test.

Pour chaque fluide à tester, un échantillon de 20 grammes d'argile a été pesé et sélectionné.

Ensuite, environ 350 ml de chaque fluide a été versé dans une cellule, telle que cette dernière a été bouché et secoué pour assurer une distribution uniforme, et elle a été placée dans une étuve en hot Rolling à 65° C (176 ° F) pendant 16 heures, suivant la méthode Baroid Algeria WM-GL-HAL-BAR-LAB. L'échantillon a été refroidi à température ambiante. Le contenu de la cellule d'échantillon est ensuite été versé sur un tamis de 2 millimètres (10 mesh). L'intérieur de la cellule a été rincée soigneusement avec une solution de Chlorure de Sodium et on verse à nouveau sur le même tamis. La cellule a été rincée à plusieurs reprises et on le verse jusqu'à ce que toute la quantité d'argile a été retiré de la cellule. Ensuite, l'argile retenue a été soigneusement lavé avec une solution de Chlorure de Sodium. Les particules lavées d'argile ont ensuite été lavées avec l'eau pour éliminer les restes de la saumure de Chlorure de Sodium. Ensuite, elles ont été placées dans une étuve préchauffée à 220° C pour se sécher jusqu'au poids constant. Après, l'échantillon a été pesé, et le pourcentage de récupération d'argile a été déterminé par l'équation suivante :

$$\text{Argile recupérée \%} = \frac{\text{le poids d'argile sec (gr)}}{\text{le poids d'argile initial (20 gr)}} * 100$$

10.2.2 Résultats :

Echantillon 1 (300-348 m).

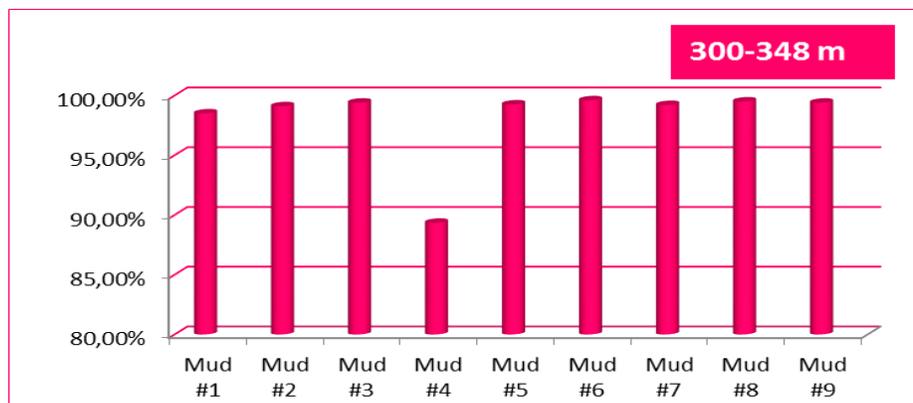


Figure 10.5: récupération en fonction de la concentration ech 1

Echantillon 2 (700-750 m).

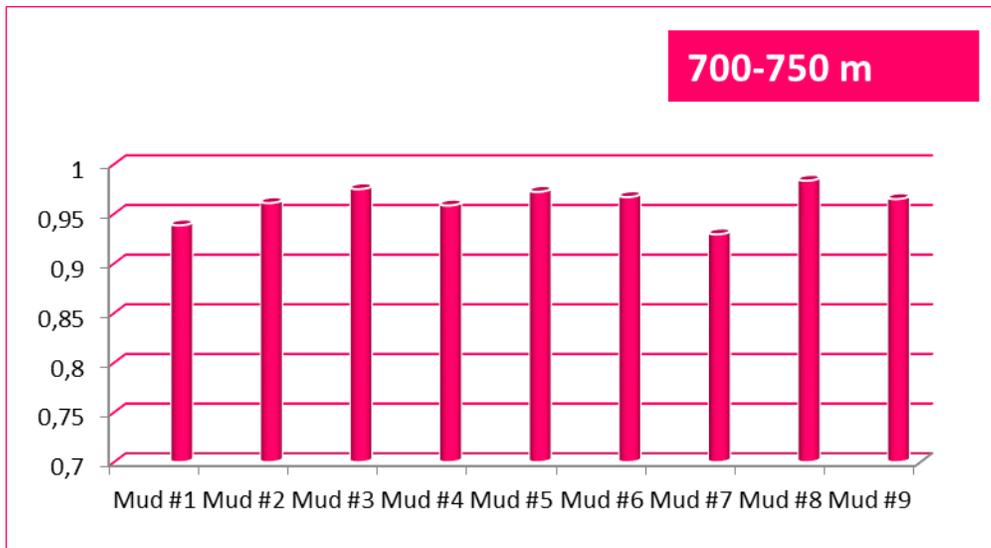


Figure 10.6: récupération en fonction de la concentration ech 2

Echantillon 3 (1450 m).

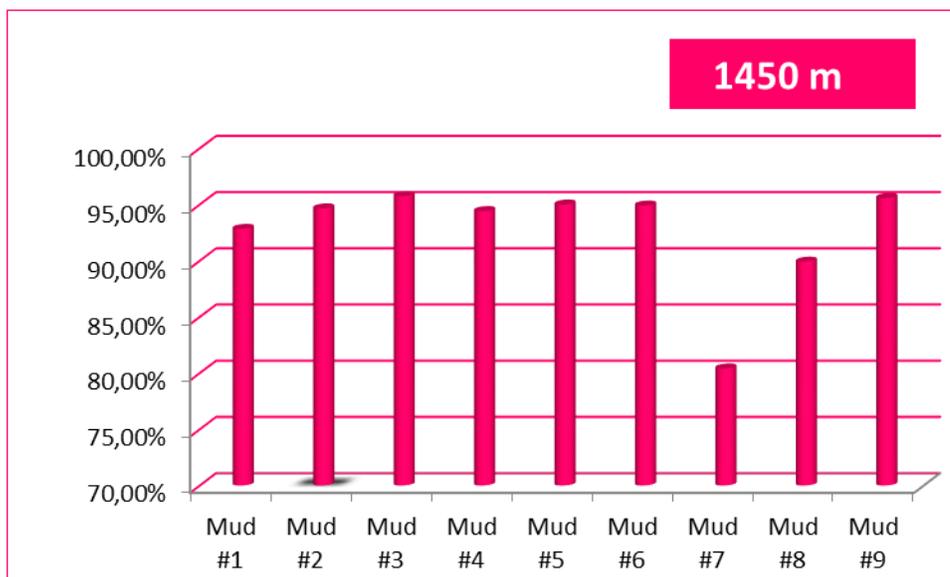


Figure 10.7: récupération en fonction de la concentration ech 3

10.2.3. Interprétation des résultats

Nous avons utilisé une formulation d'une boue à base d'eau salée de Potassium acétate polymère, les échantillons ont été pris de différentes cotes d'un puits foré dans la région d'Ain Saleh.

Les figures 10.5, 10.6 et 10.7. Montrent l'effet d'un stabilisateur d'argile et de KAc sur le pourcentage de récupération pour les échantillons argileux 1, 2 et 3. Les fluides ont des quantités variables de stabilisateur-KAc a été observé que la reprise de pourcentage a augmenté d'une manière significative et proportionnelle.

En principe, la concentration du sel dans la formulation et la récupération des argiles sont inversement proportionnelles. Grâce au système complexe dans nos formulations et le grand pouvoir d'inhibition de KAc et le mécanisme d'encapsulation d'Amidon et le rôle important de PAC qui va compléter sa fonction par l'adsorption et la floculation qui surviennent comme résultat des liaisons d'hydrogène entre les surfaces solides et les groupes hydroxyles sans oublier le rôle important de stabilisateur d'argile clayseal qui renforce ce système et donne des bons résultats. La gomme de xanthane procure une grande rigidité sous un large étendu de salinité et de température.

Ce système emploie des sels comme le potassium d'acétate, les polymères comme l'Amidon et le PAC simultanément pour fournir l'inhibition de formation et la suppression d'hydrate. L'inhibition primaire est réalisée avec de clayseal. Ce dernier empêche l'interaction de molécule d'eau avec l'argile. Les polymères d'encapsulation, l'ion de potassium, et la basse activité de l'eau fournissent l'inhibition secondaire des argiles par encapsulation c'est-à-dire les chaînes du polymère s'adsorbent sur la surface de la formation bloque la migration extérieure de l'eau dans la structure d'argile.

L'échange cationique du potassium avec la formation réduit la tendance de gonflement de l'argile par interférence directe avec le mécanisme de gonflement.

L'effet des propriétés d'argile sur la récupération est représenté par l'argile gonflante et sa dureté qui est une indication du degré de compaction, par conséquent, leur effet simultané sur l'érosion est pris en compte.

10.3. Essais de filtration sur pastilles (linear swell meter test).

10.3.1. Procédure :

Le LSM [LSM-Model 2100] de Fann Instrument Company a été utilisé pour tester la réponse de gonflement des argiles. La procédure comprend le compactage des échantillons d'argile en poudre par le compacteur hydraulique à 10000 psi pendant 120 min; l'échantillon compacté a ensuite été exposé aux neuf formulations de fluides de forage qui ont été sélectionnées afin d'évaluer l'effet de diverses substances chimiques sur l'inhibition de l'argile à 80 ° F. Un piston a été placé en contact avec l'extrémité supérieure de l'âme de l'échantillon. L'appareil a ensuite été laissé au repos pour un total de 72 h, le gonflement de l'échantillon comprimé a été mesuré par un déplacement linéaire du piston dans la direction axiale au moyen d'un capteur de déplacement fixé sur le piston. La dilatation linéaire d'échantillon compacté a été mesurée en limitant l'expansion en direction radiale. Après, le pourcentage gonflement linéaire a été mesurée en utilisant un compteur.

Les résultats de gonflement linéaire ont été calculés en utilisant l'équation de **Hook** ci-dessous :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

ε : le pourcentage de gonflement linéaire .

Δl : le changement de longueur d'argile en **inch** .

l : la longueur initiale d'argile en **inch** .

Les expériences de test d'inhibition ont procédé à la mesure et l'enregistrement des effets de KAc et stabilisateur d'argile (clayseal) avec les réducteurs de filtrats Amidon et PAC sur le gonflement d'argiles, ensuite la prise des mesures du gonflement linéaire des échantillons en contact avec la formulation de plusieurs concentrations de stabilisateur-KAc.

En effectuant l'expérience d'inhibition sur les échantillons, nous avons obtenu les résultats représentés sur les figures ci-dessous.

10.3.2 Résultats :
Echantillon 1 (300-348 m).

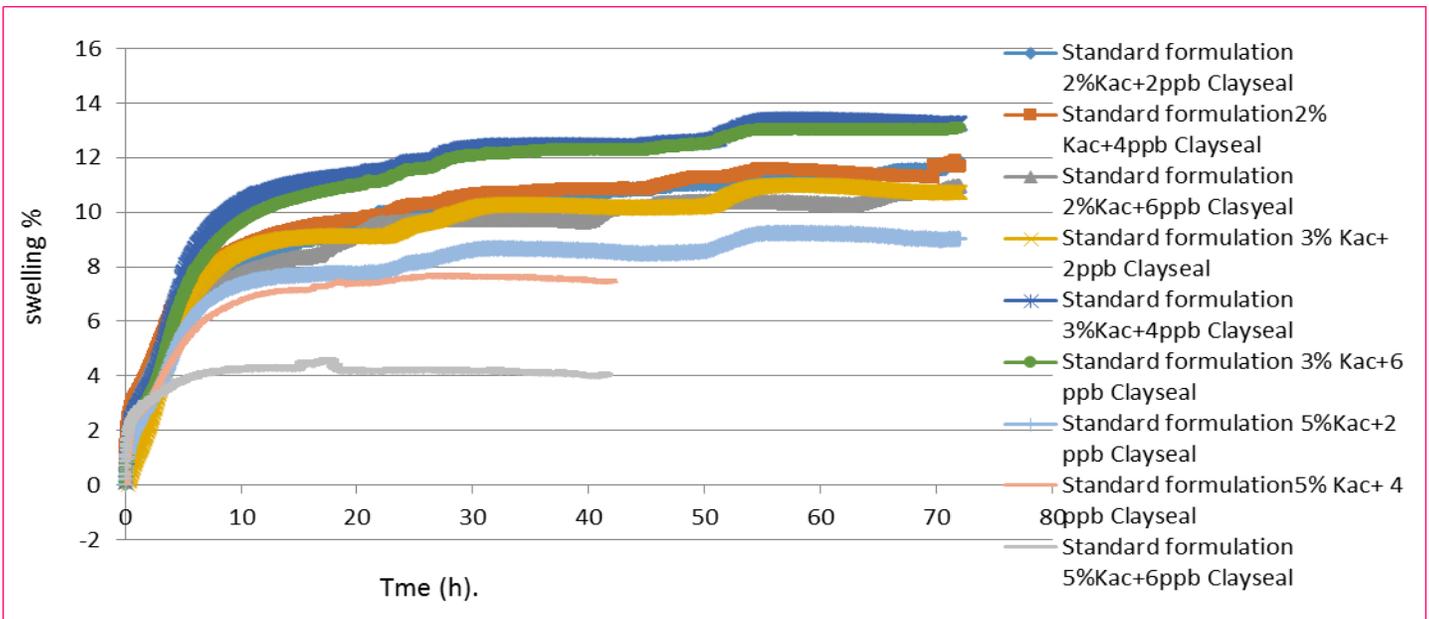


Figure 10.8. Gonflement des argiles en fonction de temps Ech1

Echantillon 2 (700-750 m).

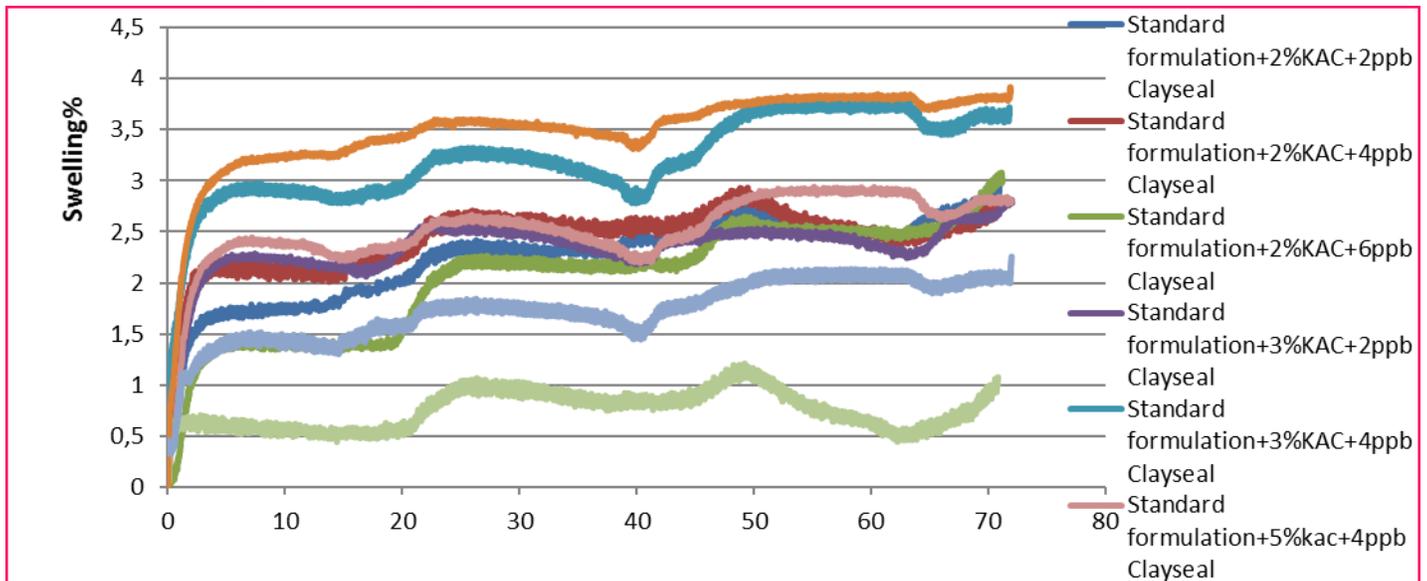


Figure 10.9. Gonflement des argiles en fonction de temps Ech2

Echantillon 3 (1450 m).

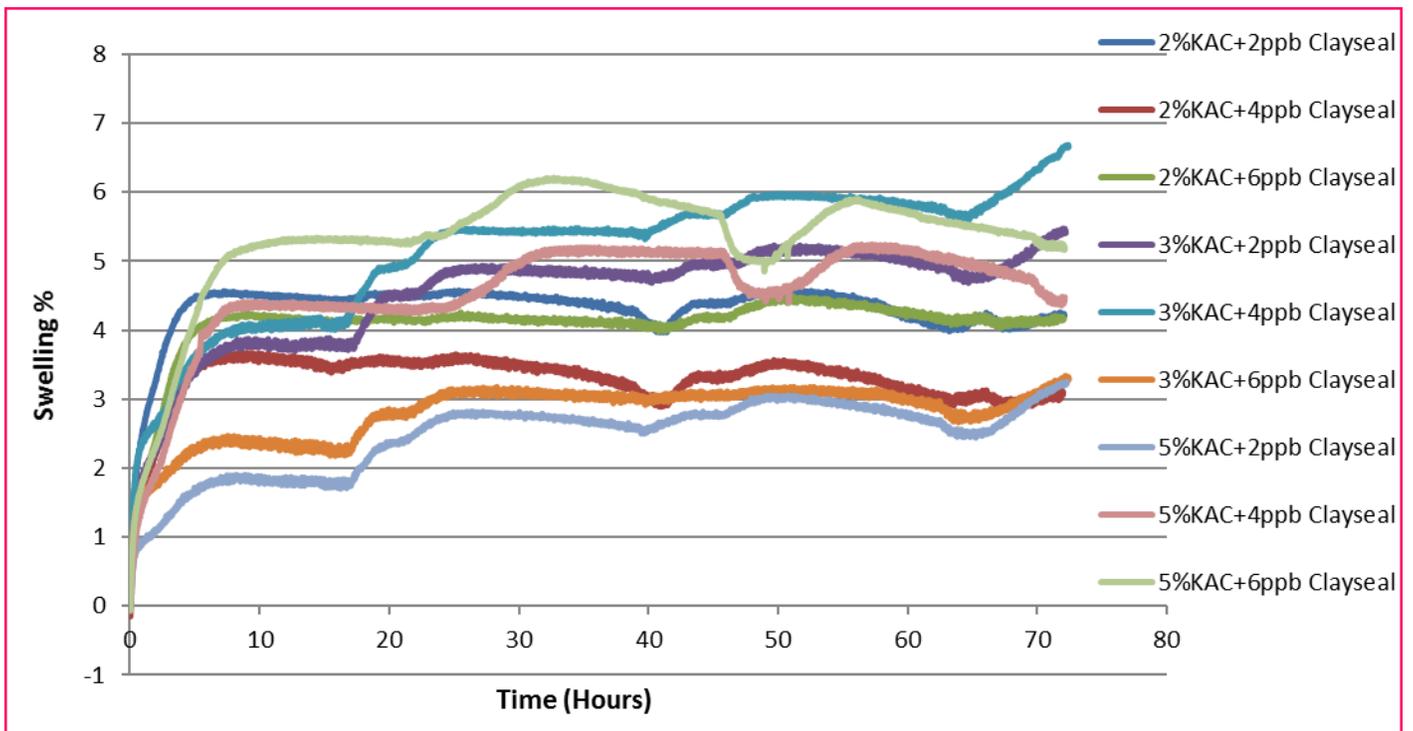


Figure 10.10. Gonflement des argiles en fonction de temps Ech3

10.3.3. Interprétation :

L'influence de la concentration de KAc sur les propriétés de filtration pour le système sel-polymère a montré de faible volume de filtration (**les figures 10.8, 10.9 et 10.10**). Pour l'échantillon 1 (300-348 m) qui correspond à la formulation 6 (3% KAc et 6g clayseal) a donné une bonne inhibition de gonflement d'argile. Pour l'échantillon 2 (700-750 m) correspondant a la formulation 9 (5% KAc et 6g clayseal) a donné une bonne inhibition mais elle est très chère à cause de la grande concentration de potassium acétate (économiquement non rentable). Il est à noter que la formulation 5 (3% KAc et 4g clayseal) reste plus rentable et efficace. Pour ce qui est de l'échantillon 3 (1450 m), c'est la formulation 6 (3% KAc et 6g clayseal) qui nous a donné des bons résultats concernant l'inhibition d'argile.

Il est bien connu que les cations dans l'argile peuvent être facilement remplacés par d'autres cations (interaction préférentielle) .

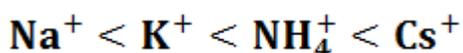
Rosana et al. (2000) ont montré que la pression osmotique a un faible effet sur le flux de l'eau et des sels par rapport au potentiel osmotique ce qui laisse supposer que le contrôle du transport de l'eau à travers les argiles pourra être affecté par l'ajustement de la concentration du soluté dans le fluide. En plus des considérations économiques sur le coût du forage, une augmentation des concentrations en additifs n'est pas toujours la meilleure solution. Une bonne optimisation des concentrations en additifs (polymères et sels) avec une bonne méthode d'évaluation de l'inhibition contribuera à résoudre les problèmes rencontrés.

La température a une influence sur l'augmentation du filtrat, qui peut être expliquée par une diminution de la viscosité des solutions. On observe une diminution du filtrat, correspondant à une masse importante du cake formé, qui peut être liée au comportement d'Amidon et PAC.

La température élevée favorise l'hydrolyse des molécules en présence de cations, ce qui permet de former des gels améliorant la précipitation et réduisant la filtration de la solution à travers les pastilles.

En plus de ces paramètres liés à la formulation du fluide, il faut ajouter l'influence de la composition et des propriétés des pastilles traversées. Effectivement, plusieurs auteurs (**Thomas et Crowe 1978 ; Khiilar, 1981 ; Khiilar et Fogler, 1984**) ont montré l'existence d'une concentration critique en sel (CSC : Critical Salt Concentration indépendante du débit, mais ni du type de cation en solution ni de la température. Pour les cations monovalents,

la séquence de la CSC est la suivante :



Influence de la force de compaction a une influence significative sur la perméabilité. Pour l'ensemble des systèmes, le volume du filtrat est inversement proportionnel à la force de compaction.

La pression et la teneur initiale en eau de la poudre au moment du compactage, sont les deux paramètres pris en compte ayant une influence sur le comportement mécanique même pour les anomalies qui peuvent être expliquées par la fracturation partielle à l'intérieur de l'échantillon compacté qui permet la pénétration d'une quantité de fluide, ainsi les vibrations à l'intérieur de laboratoire.

10.4. Analyse par le scanne d'échantillon d'argile (shale simple scanning).

10.4.1. Résultats et discussion

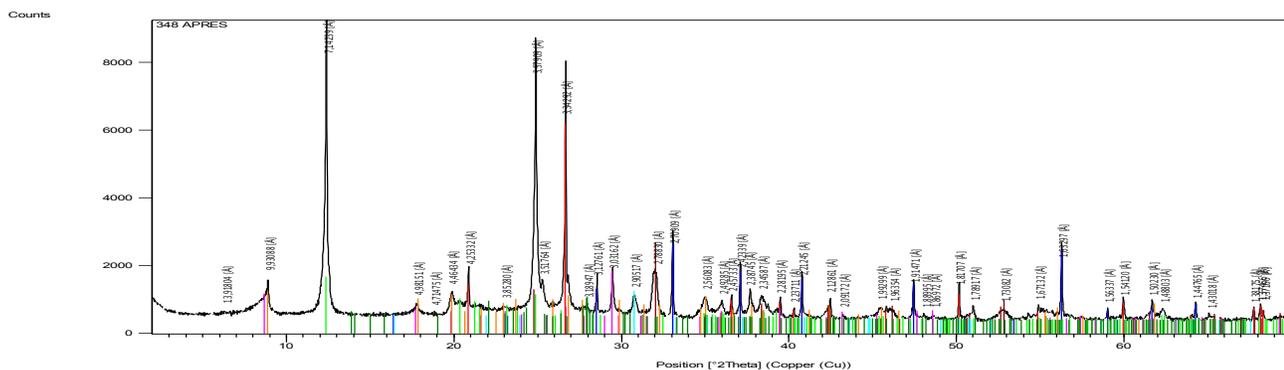


Figure 10.11. Diffractogramme de DRX des déblais de la formation.

Pour le système de boue polymère on a utilisé KAc et un stabilisateur d'argile clayseal, tels que les cations K^+ s'installent entre les feuillets grâce à ses formes qui se coïncident avec l'interface ce qui empêche la pénétration des molécules d'eau sans oublier que ce système est renforcé par un stabilisateur d'argile (clayseal) et des contrôleurs de filtrats, Amidon et PAC.

Les ions de K^+ vont remplacer les ions existants dans ces argiles, grâce à la potentielle préférentielle qui va rompre la coordination entre les molécules d'eau c'est-à-dire la force d'interaction de Van der Waals qui empêchent la pénétration d'eau dans cet espace.

CHAPITRE 11.

MODELISATION LSM ET SET A L'AIDE DE RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIAIL.

Introduction :

Ce chapitre fournit un modèle basé sur l'approche de RNA pour prédire la réponse du gonflement et l'érosion d'argile avec la formulation de fluide et de la chimie d'argile comme des entrées "inputs". Le modèle de RNA établit une relation mathématique entre l'ensemble des entrées et des sorties, qui sont développés en utilisant les neurones cachés avec des interconnexions parallèles denses. Dans ce contexte, le modèle est développé en utilisant les données expérimentales et les informations sur la composition des fluides et de la minéralogie des argiles, pour l'interaction argile-fluide. Les données expérimentales ont été représentées sous la forme des paramètres qui caractérisent cette interaction de ce système (**Maghrabi et al. 2013**). Du point de vue de l'application, le modèle de RNA pour le gonflement d'argile est utilisé pour réduire le nombre des essais requis dans les laboratoires de recherche. Sur le terrain, le modèle peut fournir une mesure rapide et directe sur la performance du fluide d'une autre façon son optimisation afin d'obtenir un comportement de gonflement d'argile désiré.

11.1. Définition :

Un réseau de neurones peut être défini comme un modèle de raisonnement basé sur le cerveau humain. Ce dernier est constitué d'un ensemble densément interconnecté de cellules nerveuses, ou des unités de traitement des informations de base, appelées neurones. Le cerveau humain contient plus des 10 milliards de neurones et 60 trillions de connexions entre eux (Shepherd et Koch, 1990). En utilisant plusieurs neurones simultanément, le cerveau peut exercer ses fonctions beaucoup plus rapides que les ordinateurs les plus puissants qui existent aujourd'hui. Bien que chaque neurone a une structure très simple, une armée de ces éléments constitue une puissance de traitement considérable. Les informations sont stockées et traitées dans un ensemble de neurones simultanément dans l'ensemble du réseau, plutôt que dans des endroits spécifiques. En d'autres termes, dans les réseaux de neurones, les données et leurs traitements sont globaux plutôt que locale. En raison de la plasticité, les connexions entre les neurones conduisant à la bonne réponse, sont renforcées tandis que celles qui conduisent à la mauvaise réponse affaiblissent. En conséquence, les réseaux de neurones ont la capacité d'apprendre par l'expérience. L'apprentissage est une caractéristique fondamentale et essentielle des réseaux de neurones. Les neurones sont reliés par des liens, et chaque maillon a un poids numérique qui lui est associé. Les poids sont les moyens de base de la mémoire à long terme dans le RNA. Ils expriment la force, ou en d'autres termes l'importance de chaque entrée de neurone.

11.2. La modélisation Computationnelle de RNA :

11.2.1. Théorie et concept : est un réseau des neurones artificiel qui se compose d'un groupe interconnecté de neurones cachés [groupe des systèmes Ward AI-Neuroshell prédictives trilogie]. **Figure.5.1** fournit un schéma qui décrit le fonctionnement de RNA, par une relation complexe entre les entrées et les sorties a été généralisée en utilisant les neurones cachés avec des interconnexions parallèles denses. Pour la version actuelle de RNA juste une seule sortie peut être sélectionnée contrairement le nombre des entrées et les neurones cachés peuvent varier selon les exigences du modèle.

Le processus de modélisation de RNA est constitué de deux étapes

- 1- **Développement** : La construction d'un modèle pour pourcentage sélectionné pour toutes les informations mettent de manière uniforme à travers les expériences.
- 2- **Validation** : L'application du modèle formé afin de prédire les résultats pour l'ensemble de données restantes.

Dans la modélisation de RNA, la composition fluide (type et concentration du sel, type et concentration de stabilisateur d'argile et la rhéologie de fluide utilisé), et les propriétés d'argile qui sont représentés par la dureté et le gonflement

Les paramètres de gonflement d'argiles A, B et C désirés seront les résultats obtenus en utilisant la méthode de moindre carré non linéaire qui est représenté comme suit :

```
clear all
clc
load matlab
ceof= [1 0,5 0,5];
lower= [0 0.01 0];
upper= [20 20 1];
```

```
[a] = lsqcurvefit(@swillF,ceof,t,s,lower,upper)
```

Ainsi, la corrélation entre les propriétés argile-fluide et les caractéristiques des paramètres de gonflement et le pourcentage d'argile récupérable a été établis en utilisant la modélisation computationnelle RNA, le modèle est illustré comme suit :

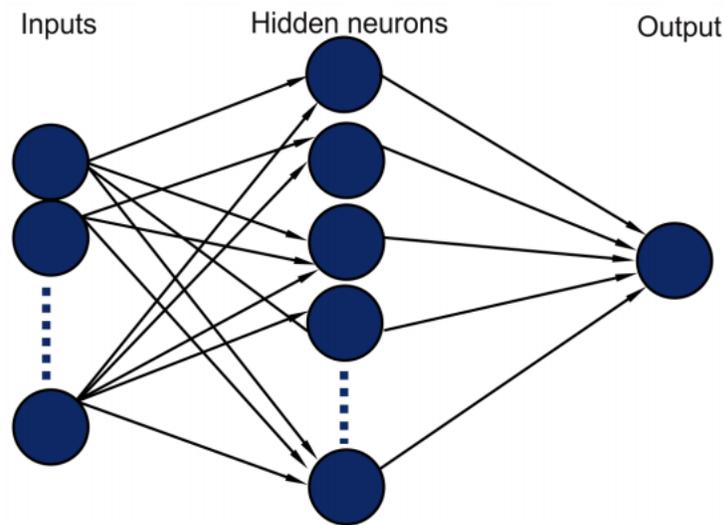


Figure 11.1. Modèle des neurones artificiels.

11.3. L'étude computationnelle : modélisation de gonflement d'argile

11.3.1. Modélisation dynamique de gonflement d'argile à partir de LSM :

11.3.1. Théorie et concept : la cinétique de gonflement d'argile (gonflement d'argile en fonction de temps) obtenue à partir de test LSM analysé. La caractéristique dynamique de gonflement dans la présence d'une boue à base d'eau est notée par l'équation :

$$\%S(t) = \frac{\text{volume d'argile en t} - \text{volume d'argile initial}}{\text{volume d'argile initial}} * 100\% \quad \text{équation 11.1}$$

Le test LSM fourni les résultats expérimentaux : $\%S=f(t)$

Maghrabi et al.2013 ont développé une équation qui caractérise la dynamique de gonflement d'argile pour tirer ces paramètres caractéristiques.

$$\%S(t) = A(1 - \frac{1}{e^{Bt} + C\sqrt{t}}) \quad \text{équation 11.2}$$

Où :

A : saturation de gonflement.

B : rapport de gonflement en premier ordre.

C : rapport de filtration.

Lorsqu'on dérive l'équation 11.2 en combinant l'équation cinétique de premier ordre avec le premier terme instantané de filtration

$$\frac{d\%S(t)}{dt} \approx -B * (A - \%S(t)).$$

$$t \rightarrow \infty$$

$$\%S(t) \rightarrow A$$

Le paramètre B représente en pratique la relation entre la microscopie et le nombre des endroits disponibles pour le gonflement autrement dit le gonflement a un instant donné va être proportionnel à la différence entre la saturation de gonflement (A) et le gonflement qui a produit jusqu'à cet instant.

McCabe,1993 l'effet de la filtration sur le gonflement des argiles est représenté par le terme $C\sqrt{t}$ dans l'équation 11.2

11.4. Résultats et discussion.

11.4.1. La modélisation de RNA pour le paramètre A (saturation de gonflement.) :

La corrélation entre les caractéristiques du paramètre de gonflement A et les propriétés de l’interaction d’argile-fluide correspondent, a été élaborée en deux étapes :

Le modèle de RNA a été utilisé pour calculer la corrélation afin de lier la valeurs de A à la concentration donnée de sel dans la boue de forage et les entiers qui sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 11.1 Les entiers et sortie pour la modélisation de RNA de A.

Input	La minéralogie et le pourcentage d’argile, CEC, le type et la concentration de sel, la stabilisateur d’argile, calcium.
output	Le paramètre de la saturation de gonflement A

La construction du modèle RNA pour prédire la valeur de A en fonction de la chimie d’argile et la concentration de sel et le stabilisateur d’argile. Les argiles sélectionnés pour ce travail ont des propriétés variées, et en conséquence des différentes valeurs de CEC. Pour ces argiles, les valeurs de la saturation du gonflement A ont été obtenues à partir des données expérimentales des essais de LSM. Avec un total de 20 combinaisons de différentes caractéristiques d’argile et des données de LSM correspondent, un ensemble de données a été regroupées pour la construction de ce modèle ; une portion représentative de cet ensemble de données est présentée dans le tableau 11.2. L’algorithme de la modélisation de RNA est décrit comme suit. Une partie importante de l'ensemble de données fourni a été utilisé comme l'ensemble des informations de base 70% pour l’entraînement. 15 % pour la validation et le reste pour le test de cet algorithme

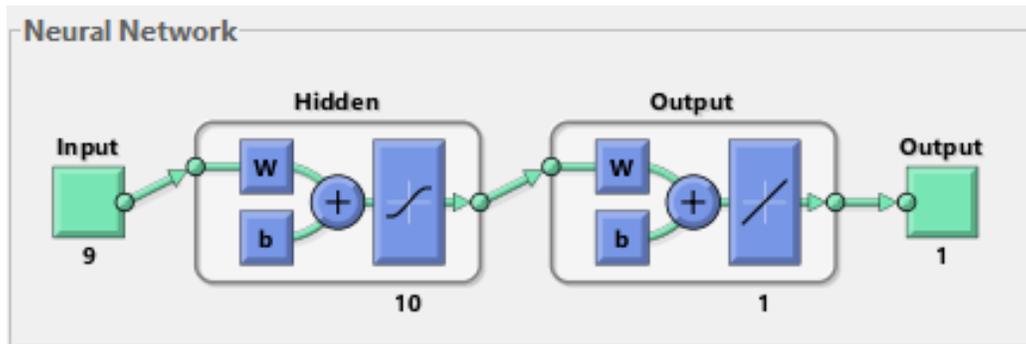


Figure 11.1. Modèle des neurones artificiels pour le paramètre A.

Le modèle RNA a été formé par cet ensemble de transfère pour établir des corrélations entre les entrées et de sortie. Le modèle ANN optimisé fourni le RMSE le plus bas ou R^2 le plus proche de 1. Les prédictions pour la paramètre de saturation de gonflement A était déterminé précisément (R^2 est 0,96555), la courbe de parité correspondante est représentée par la figure 11.2.

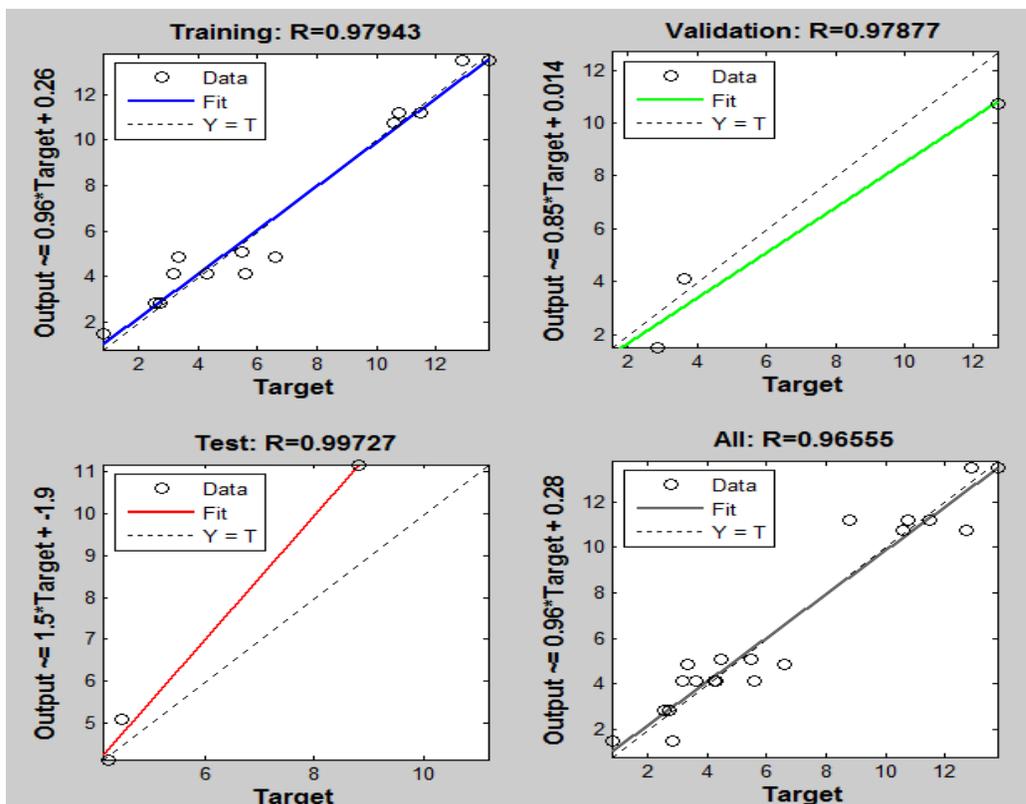


Figure 11.2. La prédiction de modèle RNA pour la saturation de gonflement A

11.4.2. La modélisation de RNA pour le paramètre B (rapport de gonflement) :

La modélisation RNA pour la caractéristique du gonflement de paramètre B qui représente la cinétique / taux de gonflement est réalisée d'une manière similaire à celle de la saturation de gonflement de paramètre A ; cependant, dans ce cas, à la fois la chimie d'argile et les composants avec les paramètres rhéologiques du fluide ont été utilisés comme des entrées dans le modèle RNA, comme décrit dans le **tableau 11.2**. On a constaté que, pour toutes les combinaisons d'argile-fluide étudié à l'aide LSM,

Tableau 11.2. Les entiers et sortie pour la modélisation de RNA d'B.

Input	La minéralogie et le pourcentage d'argile, CEC, le type et la concentration de sel, la stabilisateur d'argile, eau, barite, yield point, calcium.
output	Le paramètre de la saturation de gonflement B

Ce modèle est décrit comme suit, Une partie importante de l'ensemble des données fournies ci-dessus a été prise comme l'ensemble d'information ; dans ce cas, 80% de l'ensemble des données fournies ont été sélectionnés pour l'apprentissage du modèle. Notez que l'ensemble des données a été choisi au hasard par le logiciel ANN. Le modèle ANN a été formé sur cet ensemble pour établir la corrélation entre les entrées et de sortie (vitesse de gonflement B).

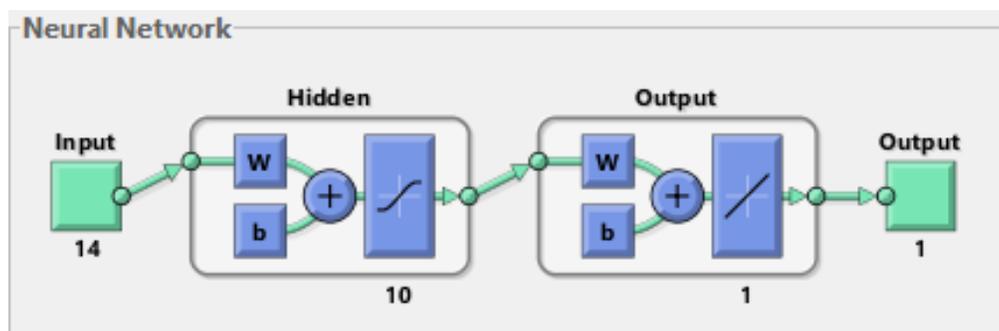


Figure 11.3. Modèle des neurones artificiels pour le paramètre B.

Le modèle de RNA optimisé a donné le RMSE le plus bas ou R^2 le plus proche de 1 lorsque le prédit contre la sorties a été évaluée., les prévisions pour le taux de gonflement B ont été jugées raisonnablement exactes (RMSE et R2 sont de 0,3432 et 0,97776, respectivement). La courbe de parité correspondante est représentée par la figure.11.4.

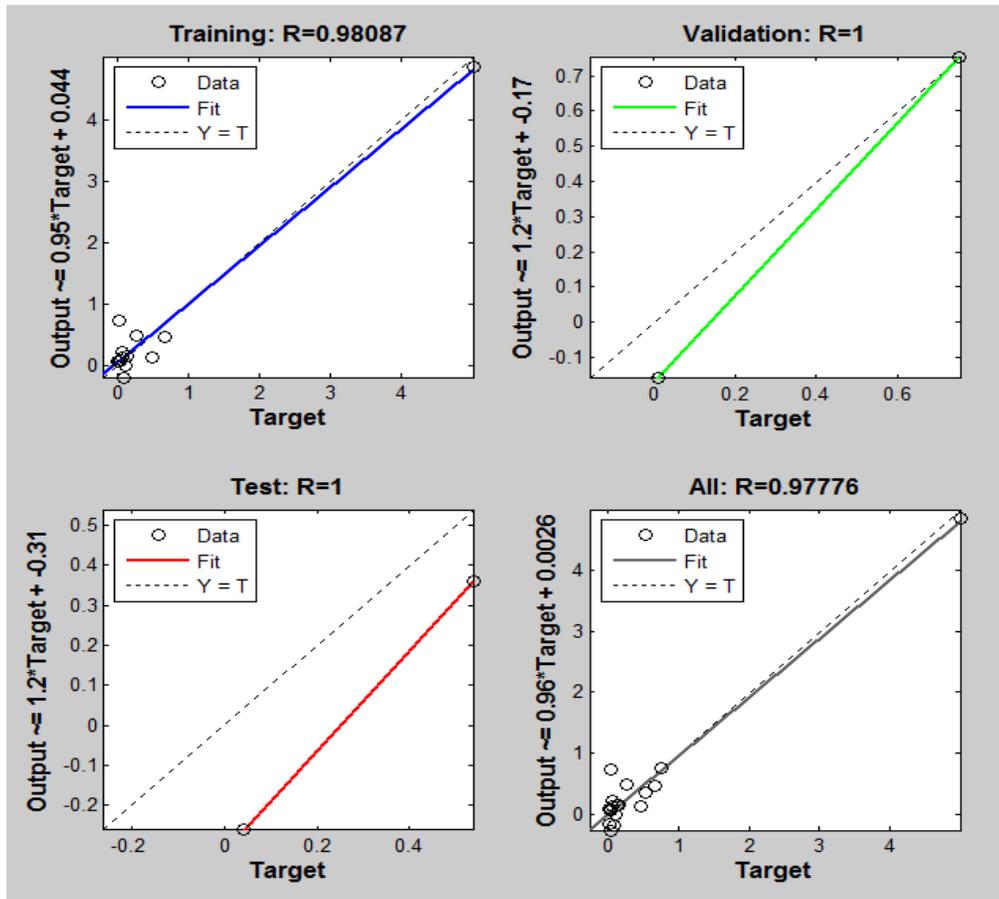


Figure 11.4. La prédiction de modèle RNA pour la saturation de gonflement B

11.4.3. Le Modélisation de RNA pour le C (rapport de filtration) :

Prédiction de C (terme Filtration-loss). Les valeurs de C varie généralement entre 0 et 1. En outre, il a été noté que les variations de la valeur C a le moindre d'effet sur le profil général du gonflement d'argile donné, dans ce cas, à la fois la chimie d'argile et les composants avec les paramètres rhéologiques du fluide ont été utilisés ainsi la température et la pression comme des entrées dans le modèle RNA, comme décrit dans le **tableau 11.3**. On a constaté que, pour toutes les combinaisons d'argile-fluide étudié à l'aide LSM.

Tableau 11.3. Les entiers et sortie pour la modélisation de RNA de C.

Input	La minéralogie et le pourcentage d’argile, CEC, le type et la concentration de sel, la stabilisateur d’argile, eau, barite, les réducteurs de filtrat, yield point, calcium, pression, température.
Output	Le paramètre de la saturation de gonflement C

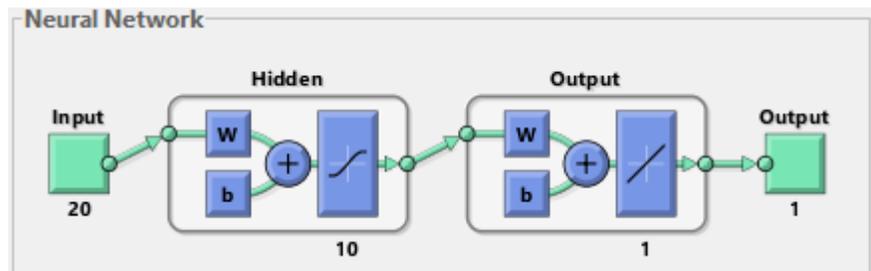


Figure 11.5. Modèle des neurones artificiels pour le paramètre B.

Ce modèle a été prise comme l'ensemble des entrées ; dans ce cas, 85% de l'ensemble des données fournies ont été sélectionnés pour l'apprentissage du modèle. Notez que l'ensemble des données a été choisi au hasard par le logiciel ANN. Le modèle ANN a été formé sur cet ensemble pour établir la corrélation entre les entrées et de sortie. Les prévisions pour le paramètre de filtration C ont été jugées raisonnablement exactes (RMSE et R2 sont de 0,4321 et 0,9714, respectivement). La courbe de parité correspondante est représentée par la figure.11.4.

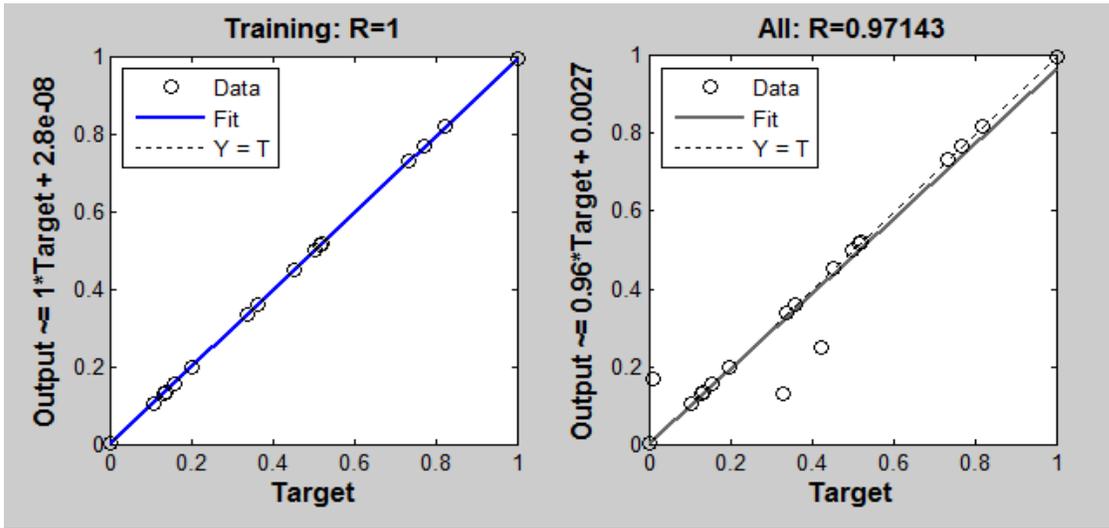


Figure 11.6. La prédiction de modèle RNA pour la saturation de gonflement C.

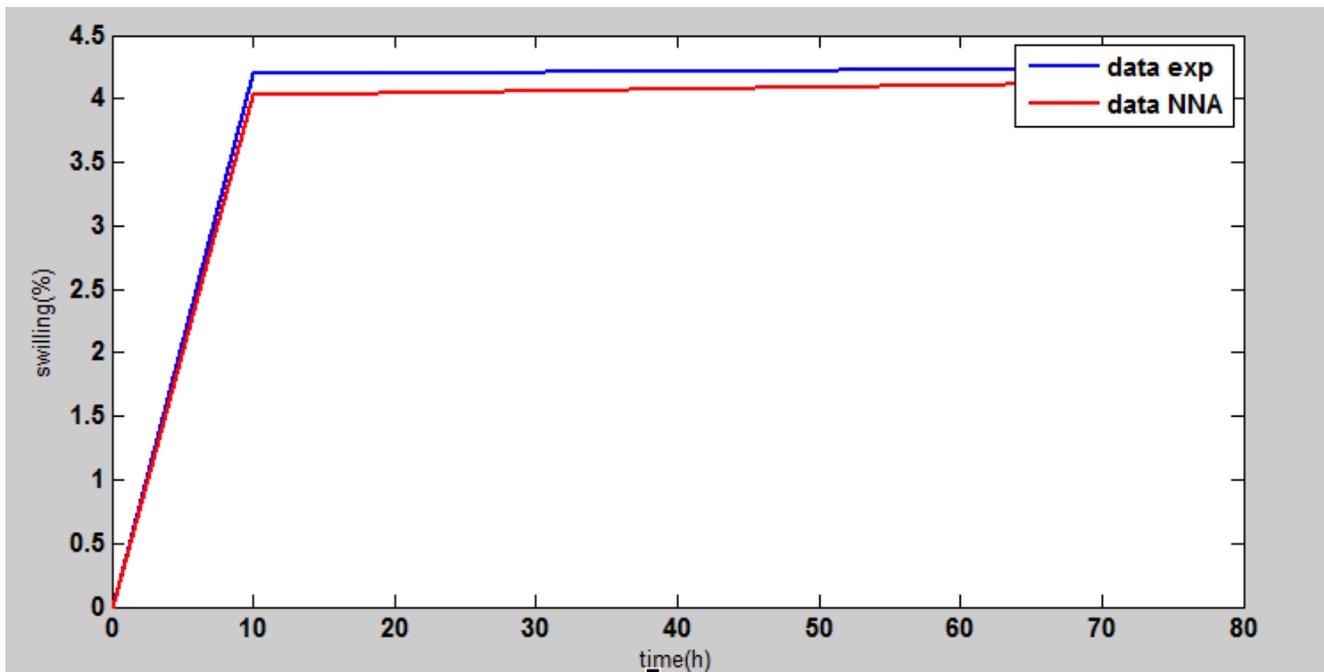


Figure 11.6. Le modèle RNA Vs expérimental de LSM pour le gonflement d'argile.

Tableau 11.4. Les paramètres de gonflement d'argile par le modèle RNA Vs expérimental

Profondeur concentration % sel / Pg stab arg	Les paramètres expérimentaux			Les paramètres calculés par RNA		
	LSM			A	B	C
	A	B	C	A	B	C
300-348 2//2	11,4706	0,0676	0,4214	11,17859	0,116766	0,483191
300-348 2//4	13,743	0,01	0,515	13,47859	0,05564	0,515
300-348 2//6	10,5678	0,0874	0,3616	10,72286	0,057866	0,361599
300-348 3//2	10,7257	0,1384	0,0089	11,17859	0,146158	0,016888
300-348 3//4	12,8895	0,1237	0,1361	13,07859	0,17092	0,1361
300-348 3//6	12,6806	0,1156	0,1031	12,72286	0,142115	0,1031
300-348 5//2	8,8118	0,1435	0,1565	9,178588	0,146158	0,1565
700 2//2	2,8661	0,0329	0,5008	2,522843	0,261841	0,500801
700 2//4	2,7548	0,0683	0,7328	2,852239	0,081454	0,7328
700 2//6	3,6425	0,0409	1	4,022735	0,071952	1
700 3//2	0,806	4,9981	0	1,022843	4,767591	1,79E-07
700 3//4	2,5621	0,7494	0	2,852239	0,880484	4,86E-07
700 3//6	4,3029	0,01	0,8207	4,122735	0,028597	0,8207

1450	2//2	4,4965	0,6672	0,329		5,082184	0,416055	0,315189
1450	2//4	3,3775	0,5369	0,3373		4,853527	0,518798	0,3373
1450	2//6	4,2355	0,4773	0,1992		4,130454	0,469798	0,1992
1450	3//2	5,4844	0,0451	0,5201		5,082184	0,278722	0,5201
1450	3//4	6,619	0,0313	0,4527		5,853527	0,014355	0,4527
1450	3//6	3,1938	0,0749	0,7698		3,130454	0,342471	0,7698
1450	5//6	5,588	0,2564	0,131		5,130454	0,418685	0,131

11.5.1. Le Modélisation de pourcentage d’argile récupérable (shale erosion test) :

La corrélation entre le pourcentage d’argile récupérable et les propriétés argile-fluide correspondants a été établies **tableau 11.5.**, les composantes de fluide influent sur l’erosion sont le type et la concentration de sel, la chimie de stabilisateur d’argile et sa concentration et la rhéologie de fluide, donc ces paramètres ont été sélectionnés comme étant des entrées pour le modèle RNA comme la dureté d’argile et les paramètres de gonflement.

Tableau 11.5. Les entiers et sortie pour la modélisation de RNA de C.

Input	La minéralogie et le pourcentage d’argile, CEC, le type et la concentration de sel, la stabilisateur d’argile, la dureté et yield point, calcium, les paramètres du gonflement d’argile
Output	le pourcentage d’argile récupérable

11.5.2. Résultats et discussion :

Pour développer le modèle, les datas ont été générés à partir des expériences en laboratoire (shale erosion tests) pour une gamme d'interaction argile-fluide, il a été observé que le pourcentage récupérable d'argile est influencé par les composantes précédemment mentionnés et qui sont des entrées.

La construction du modèle RNA pour prédire le pourcentage d'argile récupéré qui est en relation avec l'argile sélectionné et les propriétés de fluide indiqué dans le tableau 11.5, dans le totale de 20 expériences ont été réalisées pour générer l'ensemble des datas en termes de pourcentage d'argile récupérable pour d'interactions diverses d'argile-fluide.

Le type de cet algorithme de modélisation RNA est décrit comme suit. Une partie importante de l'ensemble fournisseur de données a été utilisé comme l'ensemble de l'entraînement est répartie comme suit : 70% pour l'entraînement. 15 % pour la validation et le reste pour le test de cet algorithme Le modèle RNA a été formé sur cet ensemble de formation pour établir des corrélations entre les entrées et les sorties Figure 11.7.

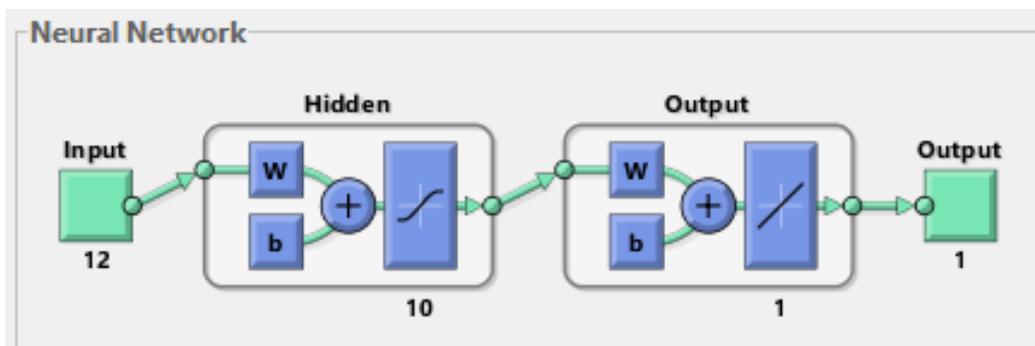


Figure 11.7. Modèle des neurones artificiels pour le pourcentage d'argile récupérable.

Le modèle RNA optimisé fourni le RMSE le plus bas ou R^2 le plus proche de 1 lorsque la prédite a été évaluée. Pour être raisonnablement précis (RMSE et R^2 sont de 0,1664 et 0,9919, respectivement). La courbe de parité correspondante est représentée par la figure.11.8.

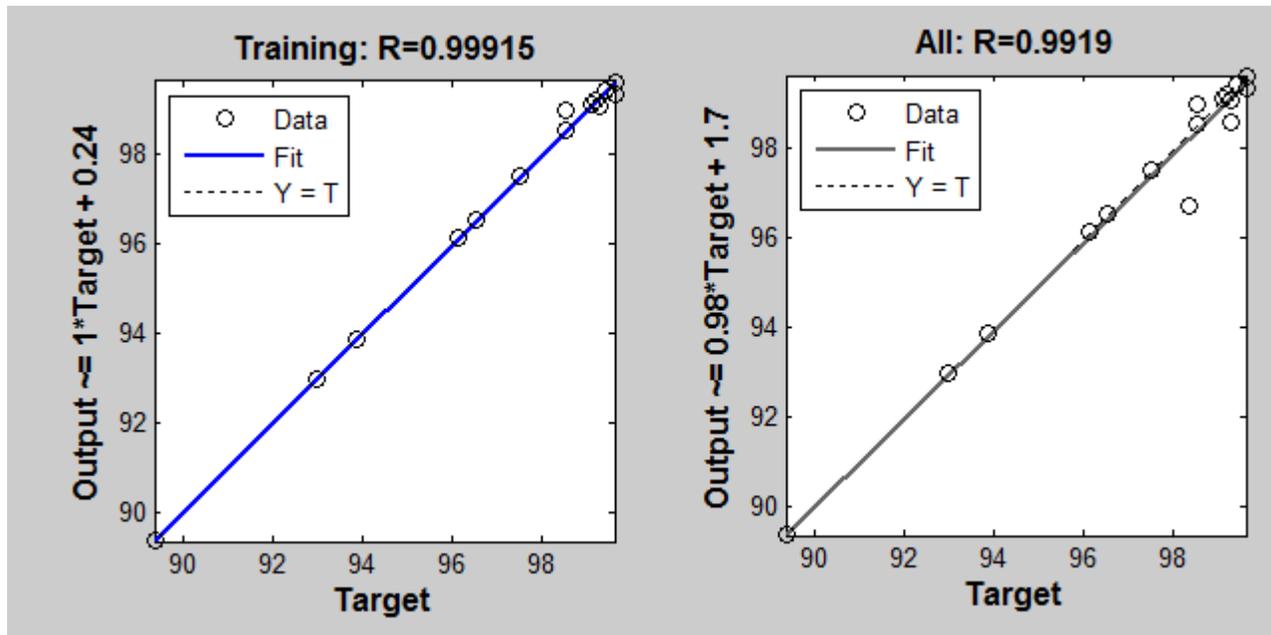


Figure 11.9. La prédiction de modèle RNA pour le pourcentage d’argile récupérable..

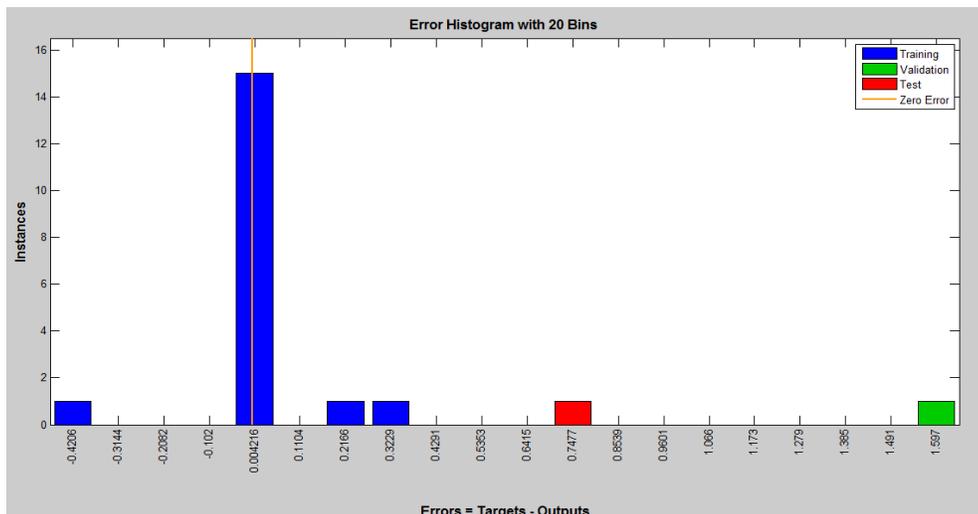


Figure 11.10. Histogramme des erreurs RNA Vs expérimental.

Figure.11.11 montre l'effet de la rhéologie de fluide sur le pourcentage d'argile récupérable. Les fluides ont des quantités variables de concentrations de viscosifiant (Xanthane) pour le système potassium acétate avec stabilisateurs d'argile (clayseal). Il a été observé que le pourcentage de reprise d'argile augmente de manière significative lorsque la rhéologie de fluide représenté par le yield point (YP) mesurée dans le fluide augmente. De la même manière, les données expérimentales ont été obtenues pour différentes fluides, L'effet des propriétés d'argile sur le pourcentage récupérable d'argile est représenté par la dureté d'argile et les paramètres de gonflement. La dureté d'argile est une indication du degré de compaction d'argile, tandis que les paramètres de gonflement représentent la chimie d'argile. Ces deux propriétés sont liées entre eux, et par conséquent, leur effet simultané sur le pourcentage d'érosion est pris en compte.

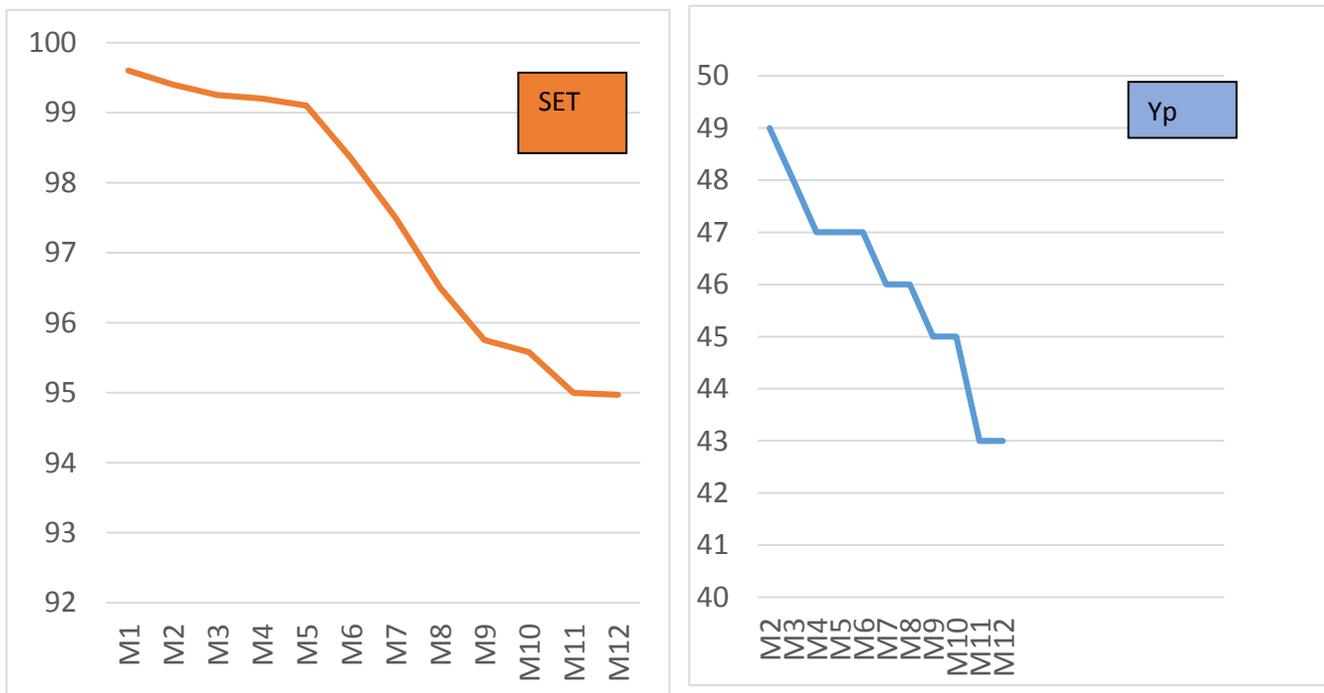


Figure.11.11 shale erosion test vs yield point.

CONCLUSION GENERALE

Le but de ce fut l'étude de l'inhibition du gonflement des argiles dans le cas du champ de Ain Salah, pour cela une formulation de l'évolution du gonflement des argiles en fonction de minéralogie de la région a été faite, cette dernière étant été déterminée par un test XRD (X-Rays Defraction). En plus d'une étude rhéologique dans le cas de l'utilisation d'une boue Potassium acétate polymère, et ce pour :

- Connaitre l'effet de la concentration des sels de Potassium sur les paramètres rhéologiques de la boue, avec incorporation de stabilisateurs d'argiles « clayseal ».
- Etude de l'effet de la température sur la rhéologie de la boue qui influence directement la tendance inhibitrice de cette dernière.
- Evaluation de la performance de la formule (sels de Potassium+ clayseal) dans l'inhibition du gonflement des argiles en utilisant les tests Capillary Section Timer, Shale Erosion test, Linear Swell Meter.
- Modélisation des résultats et établissement d'un modèle mathématique pour la prédiction de l'interaction argile/fluide.

De part ce travail, il est conclu :

- L'utilisation des sels de Potassium donne des très bons résultats dans l'inhibition du gonflement des argiles, en plus de son caractère non nocif pour l'environnement.
- L'utilisation du couple (amidons+ Polyanionique cellulose) va diminuer efficacement le filtrat des boues à base d'eau, ce qui renforce l'action des inhibiteurs de gonflement d'argiles.
- L'utilisation des réseaux de neurones est un outil très efficace pour la modélisation et la mise en place de modèles mathématiques pour la prédiction des phénomènes physiques.

BIBLIOGRAPHIE

Chenevert M.E., and Osisanya, Shale/Mud Inhibition Defined with Rig-Site Methods. *SPE* (1989).

Erzin, Y. The Use of Artificial Neural Networks for the Prediction of Swell Pressures. Paper presented at the 12* International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). Goa, India, October (2008).

Horsnid, P, Sonstebo, E.F., and Holt, R.M. Interaction Between Shale and Water-Based Drilling Fluids: Laboratory Exposure Tests Give New Insight into Mechanisms and Field Consequences of KCl Contents. Paper SPE 48986 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans Louisiana, USA, 27-30 September, (1998).

Huang, H., Azai, J.J., and Hale, A.H. Numerical Simulation and Experimental Studies of Shale Interaction with Water-Base Drilling Fluid. Paper IADC/SPE 47796 presented at the IADC/SPE Asia Pacific drilling conference, Jakarta, Indonesia, 7-9 September. (1998).

Jeirani, and Mohebbi, A. Artificial Neural Networks Approach for Estimating Filtration Properties of the Drilling Fluids. 2006.

Kulkarni, S, Maghreb, S, Kulkarni, and Jamison, D. Mathematical Modeling of Shale Swelling in Water-Based Muds. Paper SPE 16332 presented at the SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition, Kuwait City, Kuwait, (2012).

Maghrabi, S Kulkarni, D, Teke, K, Kulkarni, S.D., and Jamison, D. Modeling of Shale-Swelling Behavior in Aqueous Drilling Fluids. Paper SPE 164253 presented at the SPE Middle East Oil and Gas Show and Exhibition, Manama, Bahrain, (2013).

McCabe, w Smith, j, and Harriott, p. Unit Operations of Chemical Engineering. New York: McGraw Hill Publishing Company. (1993).

Molenaar, M.M., Huyghe, J.M., and van den Bogert, P.A.J. A Constitutive Model for Swelling Shales. Paper SPE/ISRM 47332 presented at SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Trondheim, Norway, (1998).

KHODJA Mohamed LES FLUIDES DE FORAGE : ETUDE DES PERFORMANCES ET CONSIDERATIONS ENVIRONNEMENTALES (2008).

ANIBA A, BENACHOUR H Caractérisation des comportements rhéologiques de fluide de forage à base d'eau (2014).

Fourar K Amélioration des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de biopolymères (2007).

YOKOI, H., SHRAKI, M., et al. Flocculation properties of xanthan produced by *Xanthomonas Campestral* ». *Biotechnology Techniques*, 10,789-792,1996

JEAN-LUC SIMON Gomme xanthane : agent viscosant et stabilisant », *Techniques des ingénieurs*.

JANSON, P.-E., KENNE, L., LINDBERG, B., Structure of the acellular polysaccharide from *Xanthomonas campestris* vol. 45, 275-282 (1975).

MELTON, L. al. Covalent structure of the extracellular polysaccharide from *Xanthomonas campestris*: evidence from partial hydrolysis studies ", (1976).

CAPRON, I., BRIGAND, G., MULLER, G., "about the conformation of xanthan exopolysaccharide", (1997).

CAPRON, I., Traitement thermique des moûts de fermentation et organisation moléculaire du xanthane, conséquences rhéologiques, France (1996).

MEYER, E.L., & al. Investigation of xanthan gum solution behaviour under shear flow using rheoptical techniques (1993).

BARBARA KATZBAUER, Properties applications of xanthan gum". *Polymer Degradation and Stability*,(1998)

Khodja, M., Canselier, J. P. Warr, L. Bergaya, F. et Khodja-Saber, M. Les argiles dans le forage pétrolier : Solution à petite échelle pour de grands problèmes. 7ème Journées Scientifiques et Techniques (JST7) de Sonatrach, 28-29 Novembre, Oran, Algérie (2006c)

Chenevert, M.E. Glycerol mud additive provides shale stability. Oil Gas J (1989).

Chenevert, M.E. et Pernot, V. Control of Shale Swelling Pressures Using Inhibitive Water Bas Muds, SPE Paper 49263, Presented at 1998 SPE Annual Technical Conference and Exhibition in New Orleans, Louisiana, (1998).

Cliffe, S., Dolan, B. et Reid, P.I. Mechanism of shale inhibition by polyols in water based drilling fluids. Paper SPE 28960 presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, San Antonio, Février (1995).

Cross, M.M. Rheology of non-Newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic systems. (1965).

Guizhong, C., Chenevert, M.E., Sharma, M. M. et Mengjiao, Y. A study of wellbore stability in shales including poroelastic, chemical, and thermal effects. Journal of Petroleum Science and Engineering (2003).

Van Damme, H. (1992) Stacking, deformation and rupture in smectite clays, XI Reunion Cientifica SEA (1992).

van Oort, E. A novel technique for the investigation of drilling fluid induced borehole instability in shales. Paper SPE/ ISRM 28064 presented at the SPE/ISRM Conference on Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Delft, Aout 29–31 (1994).

Mody, F. K. et Hale, A. H. Borehole-Stability Model To Couple the Mechanics and Chemistry of Drilling Fluid/Shale Interactions”, Journal of Petroleum Technology, November, (1993).