REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

N° Série : 2021

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des hydrocarbures énergies renouvelables et science de la terre et de l'univers

Département de forage et mécanique de chantier pétrolier

MEMOIRE

Pour obtenir le Diplôme de Master

Option : Forage professionnelle

Présenté Par :

Babasaid M.ikbal
Laib Yassine
Baghoura Abdelali

-THÈME-

Etude de la stabilité des parois du drain horizontal fore en UBD au champ de Hassi Messaoud cas puits «OMN747 »

Fenazzi Bilal	Président
Frouhat Rachid	Examinateur
Dada Saada	Encadreur

Remerciements

*Nous tenons à remercier en premier lieu **ALLAH** le tout puissant qui a fait que ce travail soit terminé.*

En achevant ce modeste travail nous tenons à remercier vivement notre promoteur, chargé du suivi de notre travail,

Monsieur : ***Dada Saada*** *pour ses encouragements, ses conseils précieux et sa disponibilité.*

Nous adressons nos vifs remerciements aux membres de jury de notre soutenance

qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

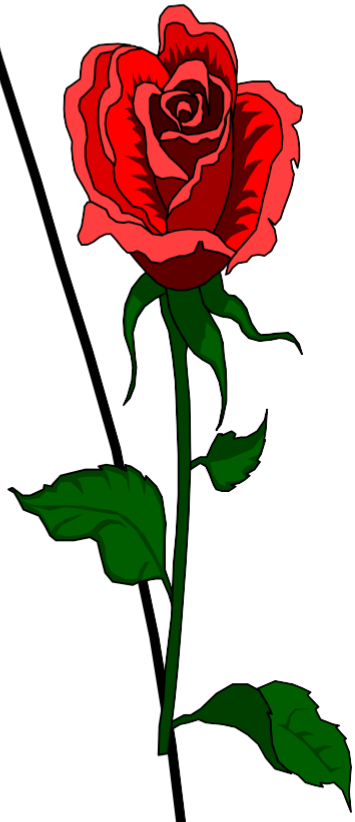
Nous remercions également nos enseignants de notre département

« Forage et mécanique de chantier pétrolier »

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- ***Mes très chers parents qui ontbeaucoup sacrifié à mon bonheur ;***
- ***Tous mes amis ;***
- ***Et à tous ceux qui m'ont encouragé durant ma vie estudiantine.***



Liste d'abréviations

Abréviation	Définition
TD	Total depth (profondeur finale)
TVD	True vertical depth
MD	Mesure depth
UBD	Underballance drilling
ROP	Rate off penetration
DST	Drill string stem
DP	Drill pipe
MW	Mud weight
ID	Internal diameter
UCS	Unconfined Compressive Sterngth
ASTM	American Society for Testing Material

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1 :	**Comportement des contraintes**	6
Figure I.2	**Forces de volume et de surface agissantes sur une portion du corps**	8
Figure I.3 :	**Interprétation physique de la compatibilité de déformation.**	9
Figure I.4 :	**Courbe contrainte-déformation**	11
Figure II.1	**Courbe enveloppe de résistance du roc intact selon le critère Hoek et Brown pour l'unité rocheuse (tiré de Simon) : (a) U4 ; et (b) U5a**	15
Figure II.2	**Schéma de principe d'un essai de compression triaxiale.**	17
Figure II.3	**Dispositif pour un essai brésilien.**	18
Figure II.4 :	**Représentation schématique de la zone envahie.**	24
Figure II.5 :	**Représentation schématique de l'invasion.**	25
Figure II.6	**Courbe de la compression Uniaxiale**	27
Figure II.7	**Compression triaxiale**	28
Figure II.8	**Détermination d'un UCS**	28
Figure II.9	**Détermination de C et σ.**	30
Figure II.10	**Courbe de Rm**	31
Figure III.1	**Cas d'un puits vertical**	33
Figure III.2	**Cas d'un puits dévie**	34
Figure III.3	**Cas de rupture par cisaillement et traction**	34
Figure III.5	**Caliper de (α) .**	38
Figure III.6	**Enregistrement de la stabilité de parois pour chaque densité .**	39
Figure III.7	**Simulation de la zone instable (d=0.8)**	40
Figure III.8	**Simulation de la zone instable (d=0.60)**	41
Figure III.9	**Simulation de la zone instable (d=0.45)**	42
Figure III.10	**Visualisation 2D de R2 .**	43

Liste des tableaux

Tableau	Titre	
Tableau II.1	Paramètres de résistances moyennes de la roche intacte pour les unités U4 et U5a (tiré de Simon).	13
Tableau II.2	Paramètres élastiques moyens de la roche intacte pour les unités U4 et U5a (tiré de Simon)	14
Tableau II.3	Tenseur de contraintes in-situ (modifié de Corthésy et Leite).	16
Tableau II.4	Tenseur de contraintes in situ (d'après Golder)	16
Tableau III.1	Détermination d'USC	38

SOMMAIRE

Remerciement
Dédicace
liste de figures
liste de tableaux
Introduction générale :..... 1
a) Récupération primaire :..... 1
b) Récupération secondaire 1
c) Récupération tertiaire 2
---------- CHAPITRE I ----------
I. Notions de mécanique des roches : 4
I.1.Le but de la mécanique des roches :..... 4
I.2.Domaines intéressés par la mécanique des roches : 4
b) Exploitation minière problèmes d'exploitation des réserves minérales :..... 4
I.3. Notion de contrainte :..... 4
I.4.Etat de contrainte : 5
I.5.Equations d'équilibre :..... 6
I.6.Notions de déformation :..... 7
I.7.Compatibilité de déformation : 7
I.8.Élasticité linéaire :..... 9
I.8.2. Définitions générales :..... 9
---------- CHAPITRE II ----------
8.3) Courbe contrainte-déformation :..... 10
II. Propriétés mécaniques : 12
II.1. Roche intacte : 12
II.2. Contraintes in situ :..... 14
II.2.1. Tenseur de contrainte, d'après Corthésy et Leite : 14
II.2.2 : Tenseur de contrainte, d'après Golder :..... 15
II.3. Estimation des propriétés mécaniques des roches :..... 16
II.4.Les diagraphies :..... 17
II.5. Représentation schématique de l'invasion : 20
II.6. Corrélation de calcul :..... 24
II.6.1.Module d'Young :..... 24
II.6.4.Module de compressibilité de la roche :..... 25
II.6.4.1.Compression Uniaxiale :..... 25
II.6.4.2.Compression Triaxiale :..... 25
II.6.5. Résistance à la compression simple UCS (Unconfined Compressive Strength) : 26

II.6.6. L'angle de frottement interne : 27
II.6.7.La cohésion :..... 27
II.6.8.La résistance à la traction : 28
II.6.9.1.Pourcentage d'argile : 29
---------- CHAPITRE III ----------
III.1.Analyse de la stabilité des parois d'un puits : 35
III.2. Etat de contraintes autour d'un puits :..... 35
III.2.1.Etat de contrainte autour d'un puits vertical :..... 35
III.2.2. Etat de contrainte autour d'un puits dévié :..... 35
III.3.2.Rupture par cisaillement :..... 36
III.4.1.2.Les inconvénients forage en Under balance :..... 37
III.6.Etude de cas d'un puits OMN747 : 38
III.6.1. Introduction : 38
III.9.Imageries de la densité : 40
III.9.1.Simulation des zones instables :..... 41
III.10.3.Visualisation 2D :..... 44
Conclusion et recommendation
Résumé
Bibiliographie

Introduction générale :

L'industrie pétrolière joue un rôle vital dans l'économie. Elle contribue de manière essentielle à la mobilité, qui est au cœur de la vie économique des entreprises et des ménages. Elle est aussi un maillon clé de la filière industrielle pétrochimique et chimique et contribue à faire vivre de grands bassins d'emploi dans le pays [1]. Des autres importances des hydrocarbures dans l'industrie comme :

- Les hydrocarbures est une source d'énergie.
- Les hydrocarbures est une source matière première.
- Les hydrocarbures est une source de revenus. [2]

Extraction des hydrocarbures à partir des gisements vers la surface .Il passe par trois étapes :

a) Récupération primaire :

Pendant la phase de récupération primaire, le pilotage du réservoir dépend d'un certain nombre de mécanismes naturels. Il s'agit notamment: de l'eau naturelle déplaçant le pétrole vers la base du puits, l'expansion du gaz naturel au sommet du réservoir, de l'expansion des gaz initialement dissous dans le pétrole brut et du drainage gravitaire résultant du mouvement du pétrole dans le réservoir de la partie supérieure vers les parties inférieures où se trouvent les puits.

b) Récupération secondaire

Au-delà de cette période, le puits ne produit plus suffisamment, et on met en œuvre des techniques permettant de ré augmenter la pression de fond pour continuer l'exploitation

- Injection d'eau : cette technique est de plus en plus courante ; elle nécessite une compréhension précise de la physionomie du gisement, et de l'eau disponible en grandes quantités ; cette technique est évidemment fréquemment employée dans l'exploitation en mer.

- Injection du gaz de formation : il est fréquent que le pétrole soit produit en association avec du gaz, ce dernier en trop petite quantité pour être vendu ; il est alors brûlé à la torche. Cette pratique est de plus en plus critiquée, et le gaz peut être réinjecté dans le gisement pour maintenir la pression et continuer l'exploitation.
- Injection de CO_2, d'azote : à partir d'une source à proximité, on injecte l'un de ces gaz dans le gisement, de la même manière que ci-dessus ; cette méthode implique de séparer le gaz miscible quand il parvient en surface, pour le réinjecter. L'azote est généralement obtenu par séparation cryogénique ; ce gaz a l'avantage d'être pratiquement inerte, donc

non corrosif pour l'équipement d'exploitation. Le CO2 peut être d'origine naturelle, ou venir d'une installation industrielle, ce qui permet de procéder à de l'enfouissement de CO2 par la même occasion. Il est généralement gratuit, mais corrosif. Ces méthodes sont employées couramment sur les gisements suffisamment importants ; elles permettent d'atteindre un taux de récupération de l'ordre de 25 % à 35 % du pétrole en place.

c) Récupération tertiaire

La « récupération tertiaire » désigne un ensemble de techniques visant notamment à diminuer la viscosité du fluide de formation, ou à améliorer la diffusion à l'intérieur du gisement. La mise en œuvre de l'une ou l'autre méthode dépend des caractéristiques du gisement, mais également des ressources disponibles localement.

On peut citer :

- Injection de dioxyde de carbone : cette technique emploie du CO_2 comme ci-dessus, mais l'injection se fait dans la phase liquide de la formation ; le CO_2, en se mélangeant avec le liquide, diminue sa viscosité, et améliore son écoulement vers le puits de production ; on peut également employer de l'azote .Injection de vapeur : le gaz produit en même temps que le pétrole est brûlé en surface, et les produits de la combustion sont injectés dans la formation
- Injection de surfactants : elle permet de mieux balayer l'ensemble du gisement, mais est limitée par l'existence de chemins préférentiels [3]
- Injection de gaz non-miscibles. Ces méthodes peuvent être utilisées séparément, successivement ou simultanément [4]. Signalons également d'autres méthodes qui, employées ponctuellement et éventuellement conjointement, contribuent à améliorer le taux de récupération tell que :
- Fracturation hydraulique [5], acidification
- Nettoyage du sable s'accumulant peu à peu à proximité du tubing ;
- Forage horizontal dans le gisement

CHAPITRE I

CHAPITRE I

I. Notions de mécanique des roches :

La mécanique des roches : La mécanique des roches est une science oriente vers l'étude théorique et pratique du comportement des roches de point de vue de leur réactions en face de son environnement physique.

I.1.Le but de la mécanique des roches :

L'objectif principal de la mécanique des roches est de déterminer la sécurité d'un massif, d'une construction ou d'exploitation minière en vue de réduire les risques d'accidents qui peuvent être très graves. Pour cela, la mécanique des roches étudie entre autres les phénomènes de la déformation et de la rupture, pour atteindre l'objectif théorique il faut impose de hypothèses comme :

- des matériaux rocheux considérés comme des agrégats de cristaux ou de corps amorphes ne contenant pas de discontinuités.
- des massifs rocheux constitués par un ensemble de blocs de roches séparés par des discontinuités.

I.2.Domaines intéressés par la mécanique des roches :

a)Cote géologique : Le géologue est intéressé principalement par :

- la déformation des roches et des massifs rocheux au cours des ères géologiques.
- la formation des failles, l'altération des massifs, les phénomènes sismiques.

b) Exploitation minière problèmes d'exploitation des réserves minérales :

- d'exploiter des gisements à grandes profondeurs
- laisser le moins possible de minerai inexploité : réduire au maximum les piliers de soutènement. Pour juger de la sécurité correspondant à sa méthode d'exploitation, il doit donc améliorer sans cesse sa connaissance du comportement des massifs rocheux soumis à des états de contrainte qui jusqu'à présent n'étaient pas habituels.

I.3. Notion de contrainte :

Par définition la contrainte est le rapport entre une force divisée par une surface. Si on considère une surface élémentaire dS d'un solide de normale n tournée vers l'extérieur de ce

solide, subissant une force df, la contrainte T,[6] donc **:**

$$T = \lim_{S \to 0}\left(\frac{df}{dS}\right) \qquad \textbf{(I.1)}$$

Donc les contraintes sont homogènes avec les pressions et sont exprimées, dans le système international (SI), en pascal. En mécanique des roches, on utilise classiquement le méga pascal (MPa).

Le vecteur contrainte s'exerçant sur une surface élémentaire (ou facette) se décompose en une composante normale, notée Sn et une composante tangentielle, notée τ.

Cauchy a décrit la notion de contrainte par « quand on soumet un corps à l'action de forces extérieures, des contraintes s'établissent par réaction, à l'intérieur de ce corps. ». Les efforts se développant à l'intérieur du corps en équilibre sont donc différents, selon le plan de coupe considéré[6].

I.4.Etat de contrainte :

Découpons au voisinage du point O du corps sollicité un parallélépède rectangle infiniment petit de cotes dx, dy, dz. Sur chaque face de ce parallélépède agissent une contrainte normale et deux contraintes tangentielles. La contrainte normale est positive quand elle agit sur une facette positive dans le sens positive de l'axe considéré ou sur une facette négative dans le sens négatif de cet axe. Une contrainte tangentielle est positive quand elle agit sur une facette positive dans le sens positif de l'axe parallèle à cette facette ou sur une facette négative dans le sens négatif de l'axe parallèle de cette facette. Toutes les contraintes de l'élément, sont représentées sur la figure 01.

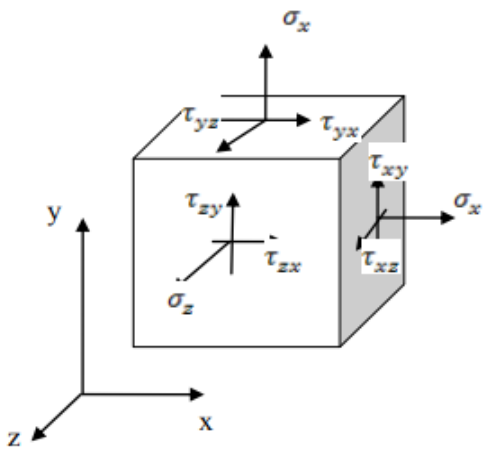


Figure I.1 : « Comportement des contraintes. »

L'état de contrainte plan est le cas particulier d'une seule facette du volume où sur chaque côté agissent une contrainte normale et une contrainte tangentielle. L'état de contrainte linéaire est le cas particulier d'un seul côté de la facette sur lequel agissent une contrainte normale et

une contrainte tangentielle.

L'état de contrainte en un point P se caractérise dans le repère (x, y, z) par le tenseur des contraintes :

$$[\sigma_{(x.y.z)}] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \qquad \textbf{(I.2)}$$

L'équilibre du cube impose $\tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{xz} = \tau_{zx} et \tau_{zy} = \tau_{yz}$

En 3D, l'état de contrainte en P est donc déterminé par un tenseur à six composantes indépendantes. Les termes diagonaux sont des contraintes normales, les autres des contraintes de cisaillement. On peut par ailleurs montrer qu'il existe un repère orthonormé (1, 2, 3) dans lequel les cisaillements perpendiculaires aux axes sont nuls. Ce repère est dit repère principal. Les contraintes $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, sont dites contraintes principales[7] .

I.5.Equations d'équilibre :

On considère ici un milieu continu (M) en équilibre statique. Soit (m) une masse représentées par le vecteur L. M occupant un volume(V) limitée par la surface (S). Les efforts agissants sur cette masse sont les forces de contact induites par le tenseur des contraintes (σ) et les forces à distance par ($\vec{b}$) [7]. L'équilibre de cette masse s'exprime ainsi :

$$\int \sigma \, \overrightarrow{dS} + \int \rho \, \vec{b} \, dV = \vec{0} \qquad \textbf{(I.3)}$$

Ou en coordonnée cartésienne par :

$$\int \sigma_{ij} n_j dS + \int \rho \, b_i dV = 0 \;, i \in \{1, 2, 3\} \qquad \textbf{(I.4)}$$

L'intégrale de surface peut se transformer en intégrale en utilisant le théorème de la divergence (théorème d'Ostrogradski) et l'équilibre prend la forme suivante :

$$\int \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \right) dV = 0 \;,\; i \in \qquad \textbf{(I.5)}$$

Pour un volume arbitraire (V). Par conséquent, en tout point du milieu (M), on obtient :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i = 0 \;, i \in \{1, 2, 3\} \qquad \textbf{(I.6)}$$

Qui expriment les équations indéfinies de l'équilibre. La forme générale de ces équations d'équilibre est :

$$\mathrm{div}(\sigma) + \rho \vec{b} = \vec{0} \qquad \textbf{(I.7)}$$

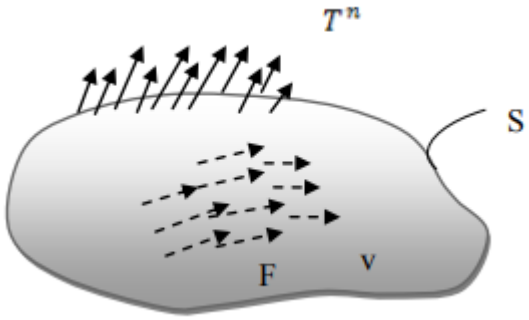


Figure I.2 : « Forces de volume et de surface agissantes sur une portion du corps. »

I.6.Notions de déformation :

Sous l'action d'un chargement externe ou d'une variation de température, les dimensions d'un corps varient provoque des déformations, d'où la premier est la déformation normale, la deuxième est la déformation de cisaillement [8].

On définit la déformation comme étant la réponse d'un matériau à une sollicitation externe. Ceci se traduit par un allongement, un accourcissement ou encore une distorsion. Elle s'exprime aussi sous forme d'un tenseur du second ordre Eij, tel que [9]:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \qquad \textbf{(I.8)}$$

I.7.Compatibilité de déformation :

Pour assurer la continuité de l'uniformité des déplacements, les déformations doivent satisfaire les relations additionnelles nommées les équations d'intégrabilité ou les équations de compatibilité. Avant de développer ces équations, il en série d'éléments dans le cas (a). Pour la simple visualisation, considérons uniquement quatre éléments. Dans la configuration indéformée montrée dans l'est instructif de considérer l'interprétation géométrique de ce concept. L'exemple bidimensionnel est montré dans la figure (3) où le solide élastique est premièrement divisé cas (b), ces éléments sont unis parfaitement. Après déformation arbitraire pour chaque élément et reconstruction le solide, pour le cas (c), les éléments ont été unis et arrangés de façon continue et d'un déplacement uniforme [10].

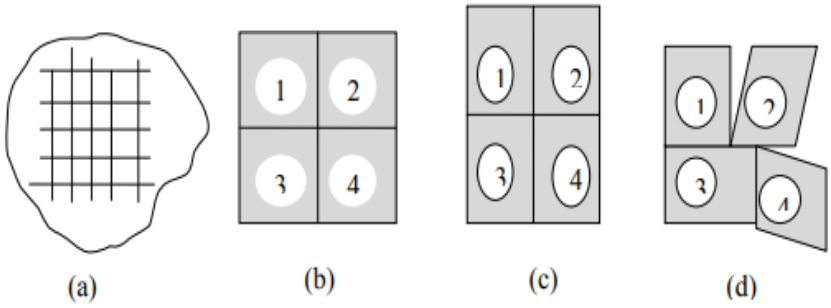


Figure I.3 : « Interprétation physique de la compatibilité de déformation. »

Cependant, pour le cas (d), les éléments ont été individuellement déformés sans aucun intérêt pour les déformations avoisinantes. Il est observé dans ce cas que le système ne sera pas ajusté sans des vides et des écarts et cette situation produits un champ de déplacement discontinu. Nous concluons donc que les comportements de déformation doivent être de manière ou d'autre reliés pour produire des déplacements continus et uniformes. La procédure de développer ces équations est basée sur l'élimination des déplacements des relations de déformation-déplacement.

Ceci nous conduit à une équation de compatibilité de Saint VENANT sous forme tensorielle.

$$\mathbf{e_{ij,kl} + e_{kl,ij} - e_{ik,jl} - e_{jl,ik} = 0} \qquad \text{(I.9)}$$

Ce système conduit à 81 équations individuelles, la pluparts, sont répétées et nous aurons six équations restent indépendantes. Ces relations deviennent pour l=k :

$$\frac{\partial^2 e_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 e_y}{\partial y^2} = 2\frac{\partial^2 e_{xy}}{\partial x \partial y} \qquad \text{(I.10)}$$

$$\frac{\partial^2 e_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 e_z}{\partial y^2} = 2\frac{\partial^2 e_{yz}}{\partial y \partial z} \qquad \text{(I.11)}$$

$$\frac{\partial^2 e_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 e_x}{\partial z^2} = 2\frac{\partial^2 e_{zx}}{\partial z \partial x} \qquad \text{(I.12)}$$

$$\frac{\partial^2 e_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(-\frac{\partial e_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial e_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial e_{xy}}{\partial z}\right) \qquad \text{(I.13)}$$

$$\frac{\partial^2 e_y}{\partial z \partial x} = \frac{\partial}{\partial y}\left(-\frac{\partial e_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial e_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial e_{yz}}{\partial x}\right) \qquad \text{(I.14)}$$

$$\frac{\partial^2 e_z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial z}\left(-\frac{\partial e_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial e_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial e_{zy}}{\partial x}\right) \qquad \textbf{(I.15)}$$

Ces relations sont de conditions nécessaires et suffisantes pour des déplacements continues et uniformes dans une région simplement connexe.

I.8.Élasticité linéaire :

I.8.1. Description du comportement élastique :

Le modèle de comportement le plus simple est le modèle élastique. Pour des matériaux ayant un comportement élastoplastique ou viscoplastique, ce modèle convient parfaitement, pourvu que l'on ne dépasse pas le seuil de plasticité. Pour des matériaux ayant un comportement de type viscoélastique, la transformation de Laplace permet de se ramener à un comportement élastique. Même pour des matériaux ayant un comportement plus complexe, un calcul élastique peut fournir des résultats intéressants, par exemple pour le calcul des fondations en Mécanique des Sols. Enfin, la résolution numérique d'un problème de Mécanique des Solides, avec une loi de comportement quelconque, s'effectue presque toujours par résolution d'une suite de problèmes élastiques. Il est donc naturel, dans un cours de Mécanique des Solides, de réserver une place importante à ce modèle de comportement [11].

I.8.2. Définitions générales :

L'élasticité est la capacité physique d'un corps à reprendre sa forme initiale après suppression de la sollicitation. Le corps est parfaitement élastique s'il recouvre complètement sa forme originale après suppression de la charge ; il est partiellement élastique si la déformation produite par les forces externes ne disparait pas complètement après avoir retiré la charge. Dans le cas d'un corps parfaitement élastique, le travail dû aux forces externes, pendant la déformation, est entièrement transformé en énergie potentielle de déformation. Dans le cas d'un corps partiellement élastique, une partie du travail, créé par les forces externes pendant la déformation, se dissipe sous forme de chaleur dans le corps pendant la déformation non élastique. [8]

Le modèle du corps élastique est caractérisé par les hypothèses fondamentales suivantes [12] :

- **Hypothèse de l'espace –temps newtonien** : l'espace est euclidien (à trois dimensions), le temps est indépendant des coordonnés spatiales.
- **Hypothèse du milieu continu :** chaque domaine élémentaire contient de la matière, cette hypothèse permet de considérer toutes les quantités comme fonctions du point dans le domaine élastique occupé par le corps.
- **Hypothèse de la rigidisation des parties (ou de la solidification)** : un corps se trouve en équilibre si, et seulement si, les forces agissent sur chacune de

ses parties forment un système nul ; cette hypothèse permet de séparer une partie arbitraire du corps, de remplacer l'action du reste par certaines forces, et de déterminer ces dernières par la condition que l'équilibre du corps entier reste intact.

- **Hypothèse de la dépendance locale** : Les forces intérieures (tension) sont des fonctions du point, de la déformation, de la température, etc.
- **Hypothèse de l'élasticité idéale** : il existe une correspondance bi-univoque entre les déformations et les tensions. Ceci caractérise un certain état de la matière, étant dans lequel la connaissance des tensions et celle des déformations fournissent des informations équivalentes. et les hypothèses simplificatrices :
- **Hypothèse de linéarité géométrique** : les déformations sont des fonctions linéaires des dérivées des déplacements.
- **Hypothèse de linéarité physique** : les tensions sont des fonctions linéaires des déformations. Hypothèse d'isotropie : les propriétés mécaniques du matériau ne changent pas avec la direction autour du point.
- **Hypothèse d'homogénéité :** les propriétés mécaniques du matériau ne changent pas avec le point dans le corps.

8.3) Courbe contrainte-déformation :

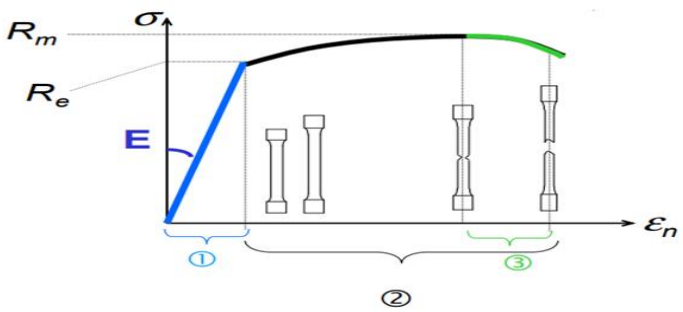


Figure I.4 : « Courbe contrainte-déformation »

① Domaine élastique (déformation réversible)

② Domaine plastique (déformation irréversible)

③ Striction puis rupture (irrémédiable)

CHAPITRE II

II. Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques mise à la disposition pour l'étude les résistances mécaniques de la roche intacte effectuées sur l'ensemble des zones géologiques, ainsi que le tenseur de contrainte sur situ. Les caractéristiques mécaniques d'une roche sont [13] :

- Module d'Young (E)
- Module de cisaillement (G)
- Coefficient de Poisson (ν)
- Résistance à la compression simple UCS (Unconfined Compressive Strength)
- Résistance à la traction (Rt)
- Angle de frottement interne (φ)
- Cohésion (C)

II.1. Roche intacte :

Une campagne exhaustive d'essais de laboratoire standard a été effectuée sur les différentes unités géologiques. Ces essais sont conformes aux normes établies par l'ASTM. Vu de l'intérêt ponctuel des unités rocheux U4 et U5a, les résultats (résistance en compression uniaxiale (σc), résistance en compression triaxiale, résistance en compression diamétrale (σt), module de déformation (E) et coefficient de Poisson (v)) sont résumés au Tableau II.1 et au Tableau II.2. Pour chacun type d'essais, le numéro de la norme, le nombre d'échantillons testés (Nb essais) et l'interprétation statistique des résultats sont indiqués[14] .

Unite	**Norme : ASTM D2938-95**			**ASTM D2664-95a**				**ASTM D3967-95a**		
	Nb essais	σ_c **(MPa)**	**Erreur sur la moyenne**	**Confinement (MPa)**	**Nb essais**	**Rupture (MPa)**	**Erreur sur la moyenne**	**Nb essais**	σ_t **(MPa)**	**Erreur sur la moyenne**
U4	**8**	**104.29**	**61.20%**	**5**	**5**	**139.24**	**107.20%**	**8**	**-15.20**	**31.80%**
				10	**4**	**130.88**	**96.80%**			
U5a	**8**	**124.98**	**44.80%**	**5**	**4**	**161.14**	**71%**	**8**	**-18.30**	**18.70%**
				10	**5**	**171.69**	**80.40%**			

Tableau II.1 : « Paramètres de résistances moyennes de la roche intacte pour les unités U4 et U5a (tiré de Simon). »

Unité	E moyen (GPa)	Erreur sur la moyenne	*v* moyen	Erreur sur la moyenne
U4	**48.58**	**30.60%**	**0.203**	**34.90%**
U5a	**62.59**	**21.20%**	**0.201**	**25.50%**

Tableau II.2 : « Paramètres élastiques moyens de la roche intacte pour les unités U4 et U5a (tiré de Simon) »

Les résultats de la résistance mécanique démontrent une dispersion variable de l'erreur sur la moyenne selon les unités : 45% et 61% pour la résistance en compression uniaxiale ; 71% à 107% pour la résistance en compression triaxiale et 19% et 32% pour la résistance en compression diamétrale. Seule la précision sur les résultats d'essais en compression diamétrale de l'unité U5a est acceptable (autour de 20%).

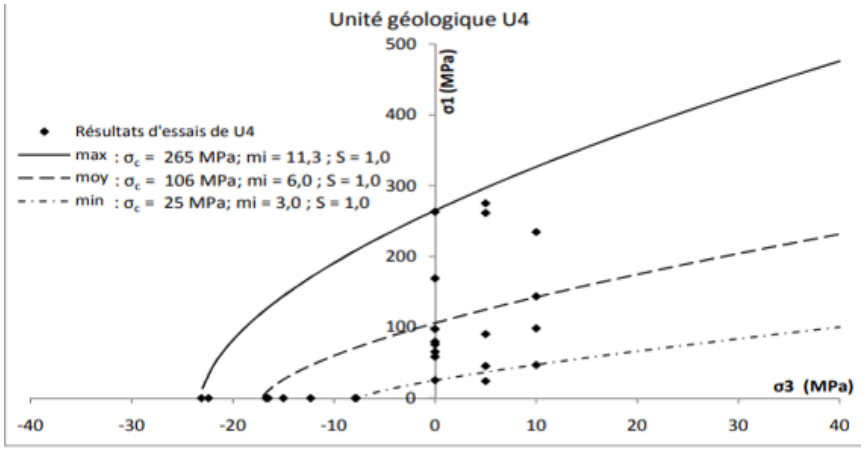
Toutefois, les résultats des paramètres élastiques démontrent une plus faible variabilité de l'erreur sur la moyenne selon les unités : 21% et 31% pour le module de déformation ; et 26% et 35% du coefficient de poisson. L'unité U5a présente la plus petite valeur de l'erreur relative sur la moyenne pour les deux paramètres de déformations. La Figure II.3 présente les résultats d'essais en laboratoire, les courbes enveloppes, ainsi que les paramètres du critère utilisé pour le lissage de ces courbes pour l'unité U4 et U5a. Les courbes enveloppe sont déterminées pour chaque unité géologique à partir de l'analyse des échantillons selon le critère Hoek et Brown. Ce critère est exprimé dans un plan des contraintes principales($\sigma_1 - \sigma_3$), celui-ci est défini comme suit :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \sigma_c \sigma_3 + S\sigma_c^2} \qquad \textbf{(II.1)}$$

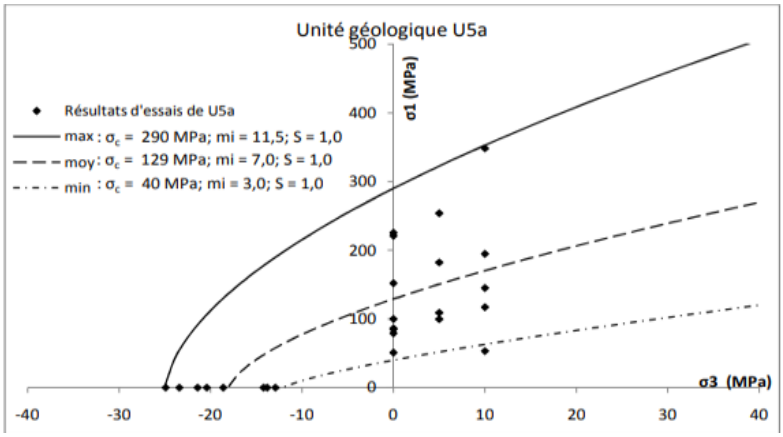
Où σ_1 et $\sigma_3$sont respectivement la contrainte principale majeure et mineure, σc est la résistance en compression uniaxiale, mi et S sont les paramètres du critère dépendant du matériau.

Par rapport aux propriétés mécaniques, l'unité U4 et U5a sont considérées comme étant une roche de résistance moyenne. Par contre, une grosse dispersion des résultats de rupture (erreur sur la moyenne élevée) produit une distribution accrue de la courbe enveloppe (formation de trois courbes distinctes) pour les deux unités. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'orientation des plans de schistosité n'a pas été prise en considération lors des essais de laboratoire. D'après les photos de ruptures disponibles en compression uniaxiale et

diamétrale, les échantillons testés ont été pris avec des orientations des plans de foliation aléatoire par rapport à l'axe de sollicitation. L'anisotropie induite par les plans de faiblesses génère donc un comportement préoccupant.



(a)



(b)

Figure II.1 : « Courbe enveloppe de résistance du roc intact selon le critère Hoek et Brown pour l'unité rocheuse (tiré de Simon) : (a) U4 ; et (b) U5a »

II.2. Contraintes in situ :

II.2.1. Tenseur de contrainte, d'après Corthésy et Leite :

Une campagne de mesure du tenseur de contrainte a été entreprise par Corthésy et Leite, effectué selon la méthode du "Doorstopper" modifié dans l'éponte de l'unité U2 à une profondeur d'environ 840m. Les résultats de cette campagne sont présentés au Tableau II.3. Le paramètre H représente la profondeur en mètre et l'orientation (azimut/plongée) est présentée selon le nord du système minier.

Contrainte principale	Valeurs absolues (MPa)	Magnitude (MPa)	Orientation Azimut/plongée
σ_1	25.2	5.5 x σ3	003°/05°
σ_2	14.5	3.2 x σ3	093°/-09°
σ_3	4.6	0.005x H	122°/79°

Tableau II.3 : « Tenseur de contraintes in-situ (modifié de Corthésy et Leite). »

Corthésy et Leite rapportent que les contraintes mesurées au niveau 084 semblent faibles pour une profondeur de 840m quand comparées aux contraintes in situ régionales. Elles sont possiblement affectées par la schistosité de la roche ou les structures régionales (e.g. faille Cadillac et Bousquet). De grands niveaux d'anisotropie élastique ont aussi été rapportés lors de l'analyse du tenseur partiel ponctuel. Le rapport d'anisotropie (E1/E2) pouvant atteindre des valeurs allant jusqu'à 14,5, caractérisant une roche de très haute anisotropie. D'après les recommandations du consultant Golder, ce tenseur de contrainte est ainsi jugé trop faible pour la région géographique.

II.2.2 : Tenseur de contrainte, d'après Golder :

Pour essayer de contrer le comportement anisotrope évident, Golder présente une alternative qui semble mieux appropriée à ce stade du projet pour le calcul des contraintes principales basé sur des valeurs standard pour la région de l'Abitibi. Le Tableau II.4 présente le résultat du tenseur de contraintes utilisé pour les travaux d'analyse et de modélisation du Projet Westwood :

Contrainte principale	Magnitude (MPa)	Orientation Azimut/plongée
σ_1	1.5 x σ3	N-S /00°
σ_2	1.2 x σ3	E-W/00°
σ_3	0.027x H	Vertical/90°

Tableau II.4 : « Tenseur de contraintes in situ (d'après Golder) »

Encore une fois, le paramètre H représente la profondeur en mètre et l'orientation (azimut/plongée) est présentée selon le Nord du système minier.

D'un point de vue général, l'orientation de la contrainte principale majeure est perpendiculaire à la direction de la foliation, tandis que la contrainte principale intermédiaire est parallèle à celle-ci. De graves erreurs peuvent se développer lors de l'évaluation des

contraintes in situ par un modèle basé sur des données isotropes et que la roche s'avère en réalité anisotrope [15].

II.3. Estimation des propriétés mécaniques des roches :

L'estimation des propriétés de la roche peut être effectuée soit au laboratoire de mécanique des roches soit par mesures in situ. Il existe un troisième moyen pour estimer les caractéristiques de la formation. Ce dernier repose sur des corrélations entre les propriétés de la roche et les logs de diagraphie tel le Sonic, densité, porosité... [13]

II.3.1. Les essais effectués au laboratoire :

II.3.1.1. Les essais soniques :

Cet essai consiste à placer un échantillon cylindrique dans une cellule triaxiale spéciale munie de deux transducteurs ultrasoniques pour l'onde P et S. [13]

II.3.1.2.Essai de compression triaxiale :

L'essai de compression triaxiale est destiné à mesurer la résistance d'échantillons cylindriques de roche soumis à un état de compression triaxiale (figure II.2). Il permet d'obtenir les valeurs nécessaires à la détermination de l'enveloppe de rupture ainsi que les valeurs d'angle de frottement interne et de cohésion apparente[16] .

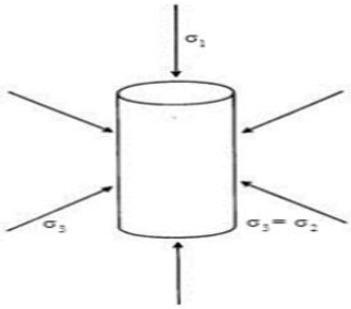


Figure II.2 : « Schéma de principe d'un essai de compression triaxiale. »

II.3.1.3.L'essai de compression simple :

L'essai de compression simple consiste à appliquer une charge perpendiculaire au plan de la discontinuité et à mesurer le déplacement relatif normal correspondant en fonction du niveau de contrainte normale appliquée. La déformation réelle ou la fermeture du joint (V_j) dérive de l'équation :

$$\Delta V_j = \Delta V_t - \Delta V_r \qquad \textbf{(II.2)}$$

Où ΔV_t la déformation totale du bloc rocheux sous la charge normale σ_n et ΔV_r la déformation correspondante de la matrice rocheuse. La déformation de la matrice (ΔV_r) peut être déterminée séparément sur un échantillon de roche intacte identique[17] .

II.3.1.4. L'essai de traction indirecte :

La résistance à la traction est la résistance qu'oppose une roche à la rupture lorsqu'elle est

soumise à une sollicitation de tension. L'essai brésilien permet de mesurer de façon indirecte la résistance à la traction de la roche. Son principe est de mettre sous contrainte de tension une carotte de roche par application d'une force de compression suivant son diamètre. La figure II.4 présente un dispositif pour un essai brésilien. La résistance à la traction de la roche testée se calcule comme suit [18] :

$$\sigma_t = (2P)/(\pi DL) \qquad \textbf{(II.3)}$$

σ_t: Résistance à la traction,

P : charge à la rupture.

D : diamètre de l'éprouvette.

L : longueur de l'éprouvette.

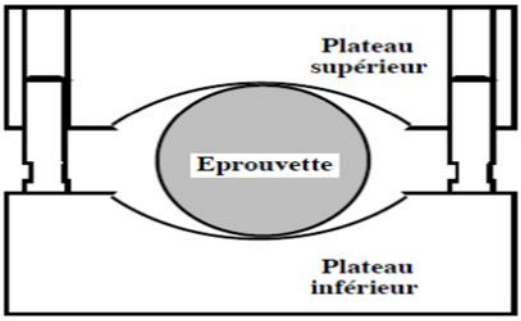


Figure II.3 : « Dispositif pour un essai brésilien. »

II.4.Les diagraphies :

Pour pallier ces inconvénients est apparue, en 1927, la technique des enregistrements dans les forages. On parle de diagraphies ou logging. Une diagraphie est un enregistrement continu des variations d'un paramètre donné en fonction de la profondeur.

Les diagraphies sont enregistrées lors d'un arrêt ou en fin de forage et les paramètres mesurés ne sont accessibles qu'avec un certain retard sur l'exécution du forage d'où le nom de diagraphies différées.

Des outils, ou sondes, conçus dans ce but, sont descendus dans le trou de forage à l'extrémité d'un câble qui assure la liaison avec les instruments de surface commandant les opérations et les groupés soit dans un camion, soit dans une cabine fixe pour les forages en mer.

Pour autant que l'on sache relier les paramètres mesurés et leurs variations aux propriétés physiques et/ou chimiques des formations géologiques et des fluides contenus dans ces formations, on dispose d'un instrument sans égal pour étudier les roches et leur contenu éventuel. Il existe des relations étroites entre les paramètres physiques enregistrés et les paramètres géologiques. On peut définir un "faciès géophysique" qui est pour un niveau

donné, la somme des caractéristiques vues par les diagraphies. Le "faciès géophysique" reste inchangé pour un même niveau au cours de plusieurs enregistrements successifs avec les mêmes outils, dans le même trou. Il en résulte que la modification d'un paramètre géologique doit se répercuter sur un ou plusieurs paramètres physiques. De même, une variation de paramètre physique aura une signification géologique.

Les diagraphies sont donc très utiles pour faire des corrélations de puits à puits et donnent des indications très précieuses sur les variations lithologiques.

II.4.1.Les moyens techniques d'enregistrement :

L'ensemble des équipements utilisés pour l'enregistrement des diagraphies comprend :

- **Un treuil** volumineux et puissant, sur le tambour duquel sont enroulés plusieurs milliers de mètres de câble. Le câble est un organe essentiel dont le rôle est à la fois mécanique et électrique. Fixé à une extrémité du tambour, il se termine à l'autre extrémité par un raccord rapide qui permet la connexion mécanique et électrique avec l'outil descendu dans le trou de forage. Le câble assure la transmission, vers l'outil, de l'énergie électrique assurant son fonctionnement, et permet le retour en surface des signaux émis par l'outil. C'est le défilement du câble qui permet la mesure des profondeurs. La mesure des profondeurs est une mesure imparfaite .Le câble en effet, est soumis à des efforts considérables, il peut s'allonger sous l'effet de son poids ou par vieillissement, certains outils collent à la paroi du trou, il peut aussi y avoir des dépôts de boue sur le câble ou sur la molette. Une première chose à faire avant toute interprétation est donc de recaler les diagraphies entre elles.
- **Les circuits de contrôle** et de commande des appareils de mesure, ainsi que les équipements de traitement de l'information. Ils sont réunis dans des "panels " que l'on met en place dans des supports adaptés en fonction des outils utilisés.
- **Les outils**, ce sont les appareils que l'on descend dans le trou de forage, à l'extrémité du câble. Cela peut aller de la simple électrode aux outils à plusieurs patins et aux outils de diagraphies de production en prospection pétrolière.
- **Un système d'enregistrement**, l'avancement du film ou du papier était synchrone du déroulement du câble et l'enregistrement se faisait en fonction de la profondeur. Dorénavant un enregistreur digital est utilisé.

II.4.2.Présentation d'une diagraphie :

La présentation est très importante. Sur l'entête du log on doit voir figurer un certain nombre de renseignements :

- ❖ Le nom de la compagnie

- Le numéro du forage et ces coordonnées
- L'outil utilisé
- Tous les autres logs enregistrés en même temps, c'est-à-dire pendant la même opération.
- Depth - driller = la profondeur atteinte par le forage
- Depth - logger = la profondeur maximum atteinte par le log
- Btm log interval = La profondeur à laquelle le log commence véritablement
- Top log interval = la profondeur à laquelle le log est arrêté
- Type fluid in hole = le type de fluide remplissant le forage, type de boue avec ses caractéristiques, densité, viscosité, PH, etc.
- Source sample = l'endroit où l'on a prélevé l'échantillon de boue, généralement à la dernière circulation dans le bac à boue
- Rm (de m = mud = boue) = résistivité de la boue
- Rmf (mud filtrate) = résistivité du filtrat
- Rmc (mud cake) = résistivité du mud cake.

Exemple de présentation d'une diagraphie :

DATE : LOG :

COMPAGNIE : FORAGE N° : Coordonnées : Pays : Altitude :

Opérateur :

Origine des profondeurs :

Profondeur du forage :

Diamètre du forage

Tubage :

Nature de la boue : Provenance de l'échantillon :

Densité : Viscosité :

Rm : à T :

Rmf : à T :

Roc : à T : Température du fond du trou (B.H.T.) :

Température de surface :

Temps après la dernière circulation :

Autres logs effectués :

Echelle verticale choisie :

Vitesse d'enregistrement :

Remarque :

Time since last circulation = temps qui s'est écoulé après la dernière circulation jusqu'à l'enregistrement du log.

Permanent datum = niveau de référence Casing = tubage.

II.5. Représentation schématique de l'invasion :

D'une manière générale, la présence du fluide de forage est génératrice de perturbations dans les formations. Dans le cas le plus général, les formations forées contiennent des fluides (eau et pétrole) qu'il est important de maintenir en place afin d'éviter leur venue en surface. Pour cela, la boue de forage, en phase liquide, exerce une pression hydrostatique supérieure à la pression des formations et des fluides qu'elles contiennent.

Dans ces conditions, il se produit dans la formation une filtration de la phase liquide et des substances dissoutes : c'est le **filtrat**. Les particules dispersées, elles,

s'accumulent sur la paroi du trou, formant le dépôt de boue encore appelé **"gâteau de boue"** ou **"mud-cake"**. La composition, l'épaisseur et la perméabilité du mud cake dépendent surtout de la nature de la boue. L'épaisseur du mud cake varie en général entre 1/8'' et 1'' (3 mm à 2,54 cm). Ce mud cake a une perméabilité faible et c'est lui qui conditionne en partie la filtration, petit à petit la filtration va diminuer puis stopper.

Le filtrat, envahit la formation, perturbe la répartition des fluides en place, et ses caractéristiques physiques contribuent à modifier celles des formations. La figure suivante II.5. Montre la représentation schématique de l'invasion d'une formation par le filtrat de boue :

- La boue de résistivité **Rm** remplit le trou de forage
- La filtration a laissé un mud cake de résistivité **Rmc**
- Le filtrat de boue, phase aqueuse de résistivité **Rmf**, a sur une certaine distance refoulée toute l'eau de formation créant la **zone lavée.** Cette zone a pour résistivité **Rxo**
- Puis la quantité de filtrat diminue jusqu'à ce que l'on retrouve dans la **zone vierge** la saturation complète des pores par l'eau de formation dont la résistivité **Rw** contribue à donner à la formation sa résistivité **Rt**
- La zone s'étendant de la paroi du trou jusqu'à la limite atteinte par le filtrat est la zone envahie de résistivité **Ri**, son extension est symbolisée par son diamètre **di.**

Lorsque la formation contient des hydrocarbures et de l'eau l'invasion prend une allure un peu différente. En raison des phénomènes capillaires, le filtrat de boue n'est pas en mesure de repousser la quantité totale d'hydrocarbures présente dans la formation. Dans la zone lavée, l'eau de formation et une partie seulement des hydrocarbures seront remplacée par le filtrat.

Puis, jusqu'à la limite de la zone envahie (Voir Fig. II.6), la quantité de filtrat diminue, l'eau et les hydrocarbures revenant progressivement à la saturation primitive que l'on retrouve dans la zone vierge, dont la résistivité est **Rt**.

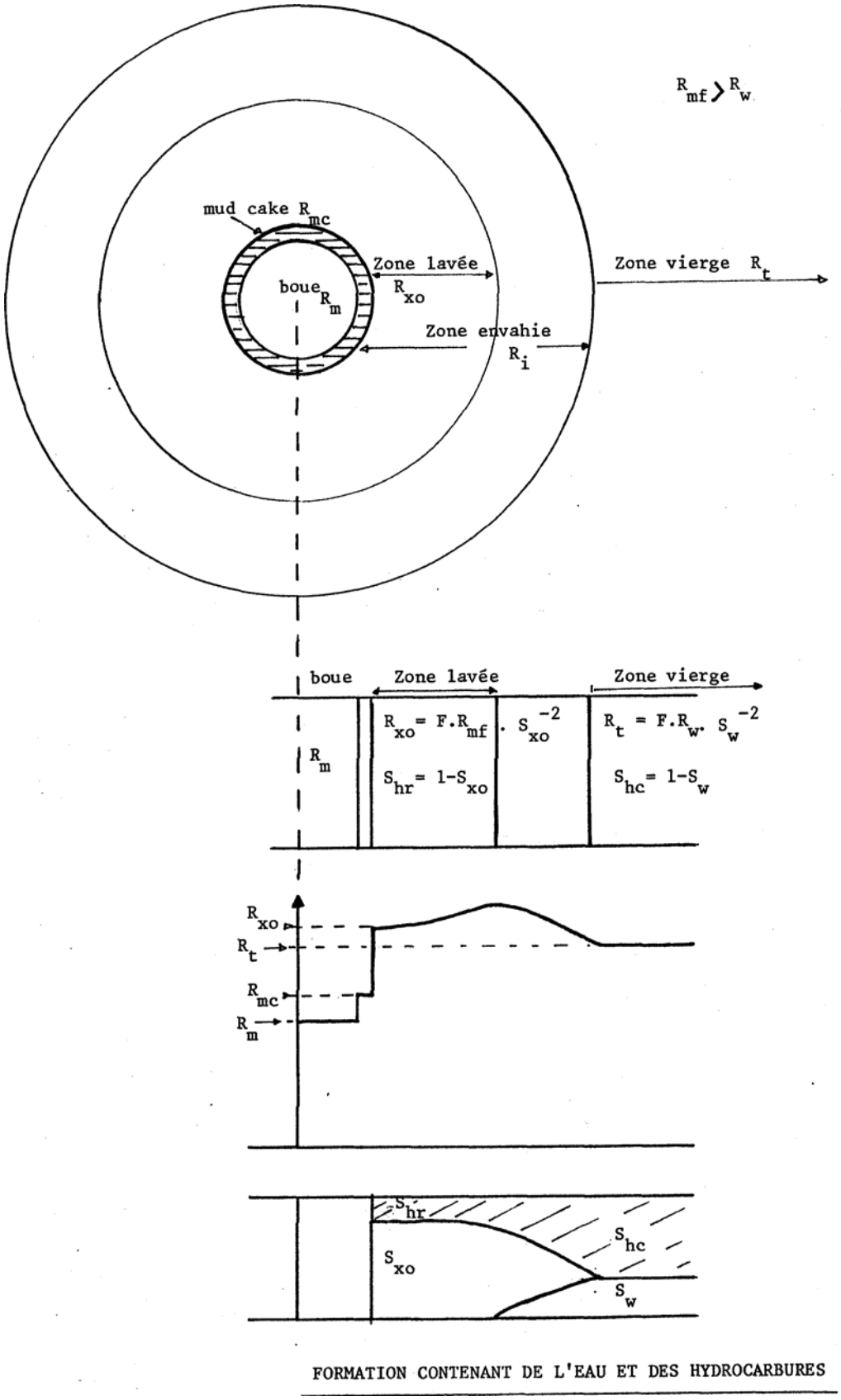


Figure II.4 : « Représentation schématique de la zone envahie. »

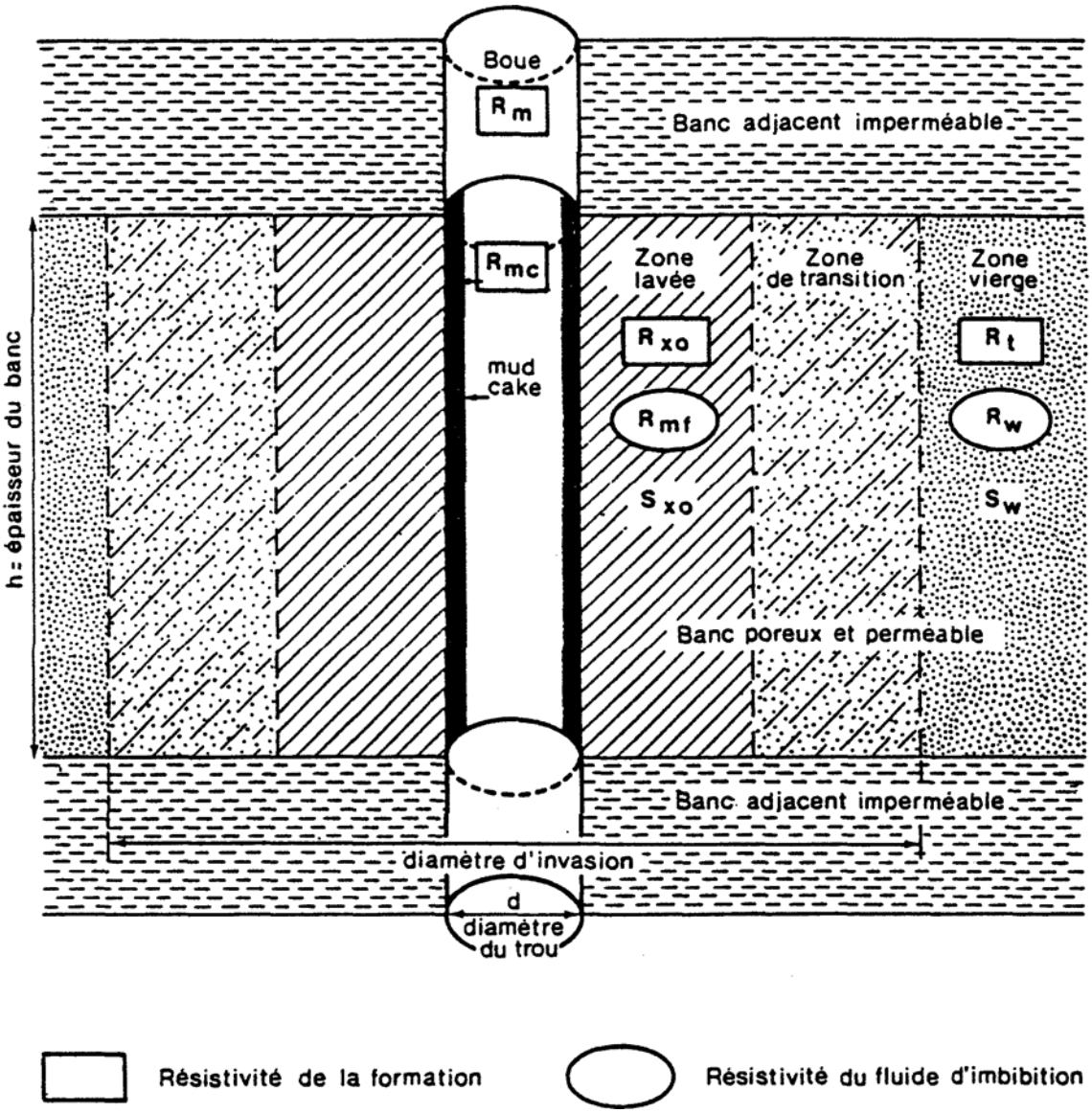


Figure II.5 : « Représentation schématique de l'invasion. »

La profondeur d'invasion est très variable, elle dépend de l'eau libre de la boue, de la différence de pression entre la colonne de boue et la formation, de la porosité etc. En général, plus la porosité est grande, plus la profondeur d'invasion est faible. C'est en effet le mud-cake qui règle la quantité d'eau qui peut pénétrer. Pour la même quantité d'eau, di sera plus petit si la porosité est forte. Si l'on exprime di en fonction du diamètre d du sondage, on peut dire que pour les boues habituelles :

- **di** < 2d pour les sables très poreux.
- **di** < 5 à 10d pour les formations à faible porosité comme les grès et les calcaires consolidés.

II.6. Corrélation de calcul :

Dans ce qui suit nous présentons les corrélations les plus utilisées pour estimer les propriétés des roches à partir des diagraphies. [13]

II.6.1.Module d'Young :

L'expérience a montré que la réponse élastique de la roche diffère selon le type de chargement : statique comme le cas d'un appareil triaxial ou dynamique pour une diagraphie acoustique. On a constaté que les roches paraissent plus rigides quand il s'agit de chargement dynamique. Ceci nous conduit à la définition de deux types de module d'Young :

- Module d'Young Dynamique :

On détermine ce module en utilisant la diagraphie sonique donnant la vitesse (ou la lenteur) des ondes P de compression et des ondes S de cisaillement. Son expression est donnée par :

$$E_{dyn} = \frac{\rho_b V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{(V_P^2 - V_S^2)} \qquad \textbf{(II.4)}$$

Ou :

E_{dyn} : Le module de Young dynamique.

ρ_b : La densité de la roche.

V_S : Vitesse des ondes de cisaillement.

V_P : Vitesse des ondes compression.

- Module d'Young Statique :

La conversion du module de Young dynamique en module statique peut être effectuée en utilisant les corrélations suivantes :

Pour les argiles et les grès (D'après Fuller (Schlumberger) 1996) :

$$E_{stat} = 0.032 E_{dyn}^{1.623} \qquad \textbf{(II.5)}$$

Pour les roches carbonatées, les évaporites et les sels (D'après Yale et al.1994).

$$E_{stat} = 0.713 E_{dyn} + 2.8808 \qquad \textbf{(II.6)}$$

Il existe une autre corrélation établie par Coates et Denno (1981) et qui prend en compte en plus du module de Young dynamique la compressibilité globale de la roche Cb et qui s'écrit sous la forme :

$$E_{stat} = E_{dyn} \left[\frac{0.0868}{C_b}\right] . 10^{-6} \qquad \textbf{(II.7)}$$

II.6.2.Coefficient de poisson :

Il peut être obtenu en utilisant le module de Young et le module de cisaillement :

$$v = \frac{E_{dyn}}{G_{dyn}} - 1 \qquad \textbf{(II.8)}$$

II.6.3.Module de cisaillement :

Le module de cisaillement est obtenu en fonction de la vitesse des ondes de cisaillement par la relation suivante :

$$G_{dyn} = \rho_b . V_S^2 \qquad \textbf{(II.9)}$$

II.6.4.Module de compressibilité de la roche :

II.6.4.1.Compression Uniaxiale :

La résistance à la compression uniaxiale est la contrainte ultime d'un échantillon de roche cylindrique sous chargement axial. C'est la plus importante des propriétés mécaniques de la roche.

En parallèle avec la mesure de la charge, on mesure aussi les déformations axiales et radiales, utilisée en dimensionnement, analyse et modélisation.

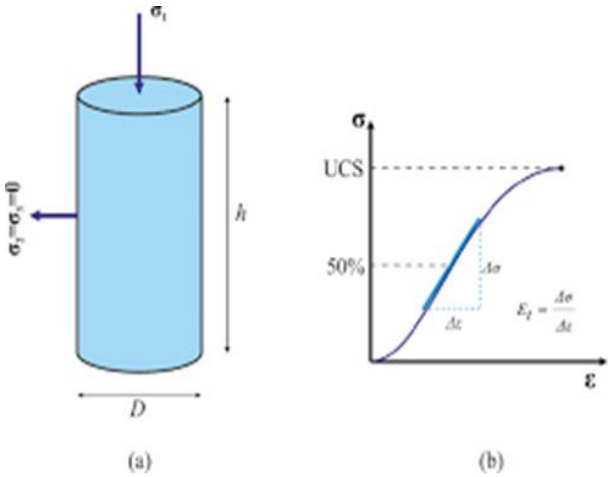


Figure II.6 : « Courpe de la compression Uniaxiale »

II.6.4.2.Compression Triaxiale :

En profondeur, la roche est soumise à des contraintes axiales et radiales (triaxiales), et la résistance à la compression est plus forte en conditions triaxiales. L'état de compression triaxiale vraie signifie 3 contraintes principales différentes. On admet souvent pour simplifier que les 2 contraintes radiales sont égales à la contrainte principale mineure (essai triaxial axisymétrique)[18].

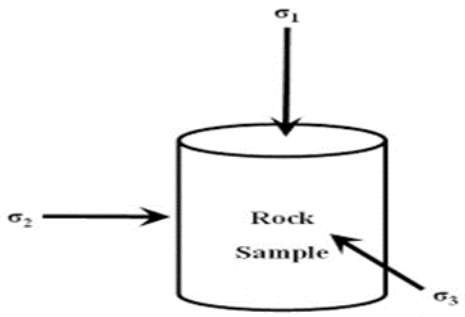


Figure II.7 : « Compression triaxiale »

II.6.5. Résistance à la compression simple UCS (Unconfined Compressive Strength) :

C'est la résistance de la roche à un effort de compression uni axial, qui reste libre d'effort dans le plan perpendiculaire.

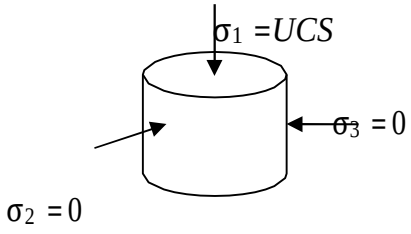


Figure II.8 : « Détermination d'un UCS »

Il existe une corrélation entre le module de Young statique et la résistance à lacompression simple (Plumb 1994) qui s'écrit :

$$USC = 2.280 + 4.1089E_{stat} \qquad \textbf{(II.10)}$$

Ou : USC en (MPa)

E_{stat} en (GPa)

Une autre corrélation a été développée par Lal's (en 1999) qui s'applique uniquement pour les argiles :

$$UCS = 2C\tan(45 + \emptyset/2) \qquad \textbf{(II.11)}$$

Ou :

C : Cohésion en MPa.

$\emptyset$: Angle de frottement interne en radians.

Une autre corrélation de Coates et Denno (1981) pour la résistance à la compression simple est donnée en fonction de l'apport en argile Vsh et de module statique de Young. Elle s'écrit

comme suit :

$$UCS = E_{stat}(0.008Vsh + 0.0045(1 - Vsh)) \qquad \textbf{(II.12)}$$

Ou : Vsh en fraction et UCS et E_{stat} en (MPa).

II.6.6. L'angle de frottement interne :

L'angle de frottement interne est un paramètre très difficile à estimer à travers les logs. Il existe .cependant une corrélation linéaire entre ce dernier et le log du gamma ray.

Cette corrélation s'écrit sous la forme suivante[19] :

- Pour les formations argile-grès :

$$\varphi = 30° - \frac{30-25}{110-20}(\gamma_{ray} - 20) \qquad \textbf{(II.13)}$$

- Pour les formations argiles-carbonates :

$$\varphi = 38° - \frac{38-25}{110-20}(\gamma_{ray} - 20) \qquad \textbf{(II.14)}$$

Aves : φ en degrés.

- Pour les argiles :

$$\varphi = \sin^{-1}(V_p - 1)(V_p + 1) \qquad \textbf{(II.15)}$$

Avec : φ en rad.

II.6.7.La cohésion :

La cohésion C est obtenue par les relations suivantes :

$$\tau = C + (\sigma \tan \varphi) \qquad \textbf{(II.16)}$$

Avec :

τ : Contrainte de cisaillement (MPa).

σ : Contrainte normale (Mpa).

φ : Angle de frottement.

C : Cohésion.

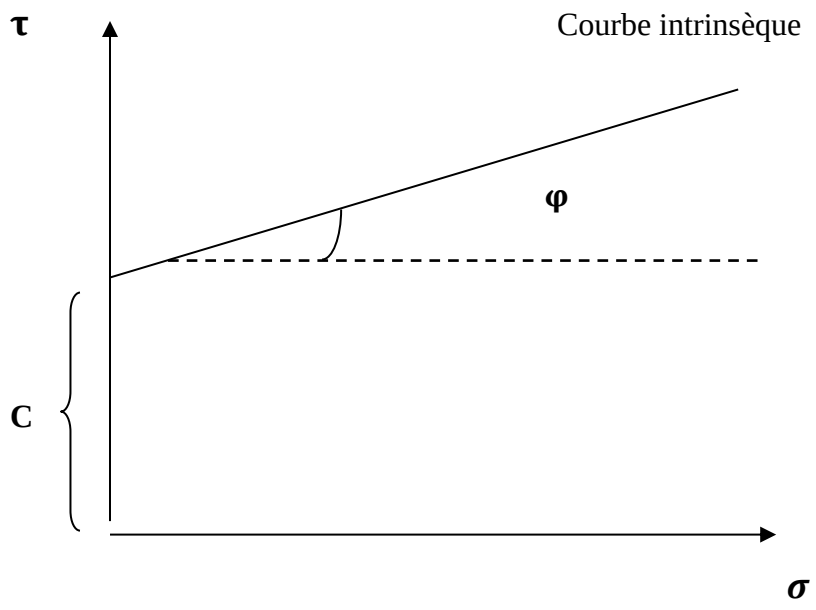


Figure II.9 : « Détermination de C et σ. »

II.6.8.La résistance à la traction :

La résistance à la traction R_m(également appelé la résistance à la rupture) est un caractéristique matériau pour l'évaluation du comportement de résistance .La résistance à la traction est la contrainte de traction mécanique maximale avec laquelle une éprouvette peut être chargée.

Lorsque la résistance à la traction est dépassée, le matériau défaille : l'absorption des forces diminue jusqu'à ce que l'échantillon de matériau se déchire. Le matériau se déforme cependant plastiquement, de manière permanant avant même que la résistance à la traction n'ait approchée. La résistance à la traction $R_m$est déterminée à l'aide de l'essai de traction, elle se calcule à partir de la force de traction maximale approchée F_m et de la surface de section transverse de l'éprouvette en début d'essai de traction :

La résistance à la traction R_m= force de traction maximal F_m/surface de section transverse de l'éprouvette s_0 .La résistance à la traction est indiquée en MPa (Méga pascale) ou N/mm^2 .Sur le diagramme de contrainte- déformation (ou courbe de contrainte-déformation), la contrainte de traction de l'éprouvette est représenter pour sa déformation relative la contrainte lors de l'essai de traction. Les différentes grandeurs caractéristiques du matériau à tester pourront être déterminée à partir de cette courbe, par exemple, le comportement élastique ou tester ou la résistance à la traction .dans le diagramme contrainte-déformation, la résistance à la traction est la valeur maximale approchée en essai de traction après que la contrainte de traction ait de nouveau augmenté[20] .

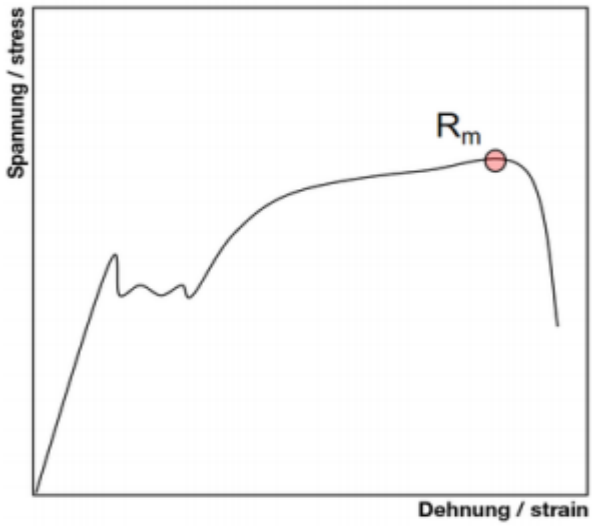


Figure II.10 : « Courbe de R_m»

II.6.9.1.Pourcentage d'argile :

Nous avons vu que l'on peut dans certaines conditions tracer sur le log P.S. la ligne de base des argiles qui correspond à un volume de 100 % d'argile. Il est aussi possible de tracer la ligne de base des sables qui représente alors 0 % d'argile. Cette particularité permet d'estimer le volume d'argile en un point donné. Le volume d'argile au point X se calcule de la façon suivante [21]:

$$V_{sh} = \frac{P_{.s.s} - P_{.s.au\ point\ X}}{P_{.s.s}} \qquad \textbf{(II.17)}$$

Avec :

V_{sh} : Volume d'argile en %.

$P_{.s.s.}$: Valeur maximum de la déflexion P.S. dans l'intervalle considère, valeur qui correspond à la ligne de base des sables.

$P_{.s.s.au\ point\ X}$: Valeur de la déflexion P.S. à la profondeur choisie.

II.6.9.2.Détermination du pourcentage d'argile :

Dans les zones à faible résistivités, la résistivité dépend surtout de la teneur en argile et de la résistivité de l'argile. On peut donc utilisé la formule empirique suivante [21] :

$$V_{sh} = \sqrt{\frac{R_{sh}}{R_t}} \qquad \textbf{(II.18)}$$

Ou :

V_{sh} : Le pourcentage volumique d'argile.

R_{sh} : La résistivité dans les argiles.

R_t : La résistivité dans le sable argileux.

CHAPITRE III

III.1.Analyse de la stabilité des parois d'un puits :

Le trou circulaire foré dans une roche autrement stable cause une concentration de contraintes autour du puits. Cet état de contraintes peut excéder la résistance de la roche et causer la rupture du puits. La rupture résultante dépendra des magnitudes des contraintes, de la pression des pores et du type de la formation.

III.2. Etat de contraintes autour d'un puits :

III.2.1.Etat de contrainte autour d'un puits vertical :

Toute perturbation géométrique au sein d'un milieu continu modifie la distribution des contraintes initiales. Cette modification est plus ressentie près de la perturbation qu'aux régions lointaines. [22]

Soit un puits vertical de rayon r_0 forer dans une roche assimilée à un milieu continu. La roche est soumise à l'infini (zone non perturbée) au tenseur de contrainte qui s'écrit dans le repère (e_1, e_2, e_3) sous la forme suivante :

$$T_{e_1 e_2 e_3} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \qquad \textbf{(III.1)}$$

Avec un état de déformation : $\sigma_3 = v.(\sigma_1 + \sigma_2)$ **(III.2)**

La figure suivante présente les contraintes dans un puit verticale

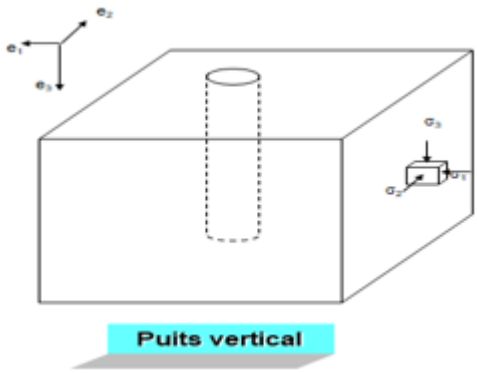


Figure III.1 : « Cas d'un puits vertical »

III.2.2. Etat de contrainte autour d'un puits dévié :

Nous considérons maintenant que le puits n'est plus vertical mais dévié avec une inclinaison α dans un azimut β par rapport au repère initial (e_1, e_2, e_3). Le nouveau repère dans lequel on va exprimer le tenseur des contraintes est $(e_1$ », e_2 », e_3 ») de sorte que α sera l'angle entre les vecteurs unitaires e"3 et e3, et β est l'angle entre e1 et la projection de e"1 sur un plan horizontal. [22]

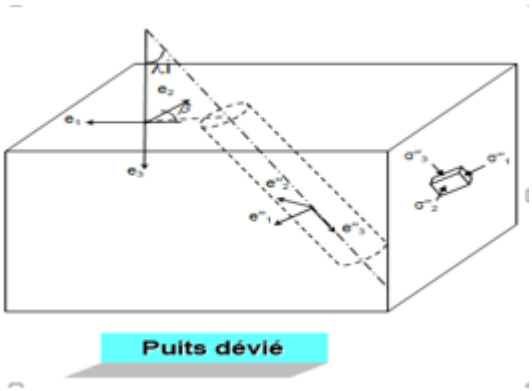


Figure III.2 : « Cas d'un puits dévie »

III.3. Modes des ruptures :

III.3.1. Rupture par traction :

Lorsque la résistance à la traction est dépassée, le matériau défaille :

L'absorption des forces diminue jusqu'à ce que l'échantillon de matériau se déchire. Le matériau se déforme cependant plastiquement, de manière permanente avant même que la résistance à la traction n'ait été approchée.

III.3.2. Rupture par cisaillement :

Il y a une rupture du sol par cisaillement lorsque la contrainte de cisaillement τ devient « trop importante ». La contrainte de cisaillement maximum que peut supporter un sol (correspondant donc à la rupture) n'est pas unique mais dépend de l'intensité de la contrainte normale.

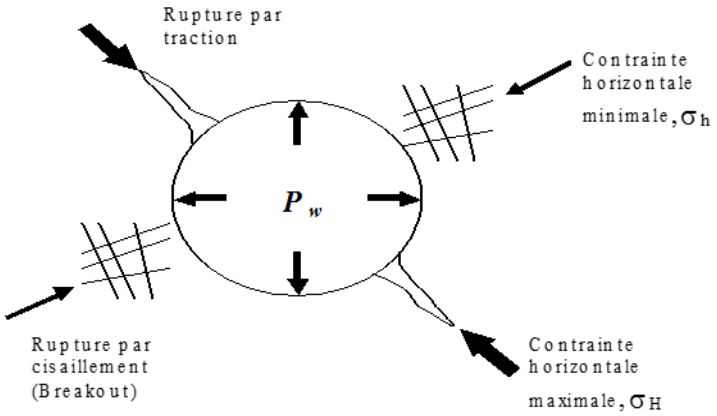


Figure III.3 : « Cas de rupture par cisaillement et traction »

Figure III.4 : « Représentation diagraphie des contraintes »

III.4. Définition de forage en Underbalance :

L'UBD (Underbalance Drilling) est une méthode de forage dans laquelle la pression de

fond exercée par le fluide de forage (pression hydrostatique (Ph)) est maintenue inférieure à la pression des pores du réservoir (pression de gisement (Pg)), contrairement à l'Overbalance où la pression exercée par le fluide de forage est légèrement supérieure à la pression de pores.

Si la différence de pression entre la pression de fond et la pression de gisement (ΔP) ainsi que la perméabilité sont suffisantes, les fluides de formation entrent dans le puits. Par conséquent, des équipements spéciaux devront être prévus pour l'acheminement et la séparation de la production en surface.

III.4.1.Les principaux avantages et inconvénients de l'UBD :

III.4.1.1. Les Avantages forage en Under balance :

- Minimiser la perte de circulation.
- Augmenter la vitesse d'avancement (ROP).
- Diminuer l'endommagement des formations.
- Augmenter la durée de vie de l'outil et la détection immédiate des intervalles productifs.

III.4.1.2.Les inconvénients forage en Under balance :

- Instabilité des parois.
- Complexité des opérations et l'utilisation des équipements spéciaux.
- Le problème du nettoyage du fond du puits.

III.5.l'UBD en Algérie :

Le problème de forage en Overbalanced du réservoir de « Rhourd el Baguel » posait de sérieux problèmes de pertes dans le réservoir. A partir de « 1997 Sonarco »a entamé sa compagne de reprise des puits en UBD à Rhourd el Baguel avec le Rig « ENAFOR 27 et la compagnie Oil Tools »

Le même problème survenu dans le champ de Hassi Messaoud où le forage conventionnel OBD génère de sérieux problèmes, pertes de circulation, faible vitesse de pénétration (ROP), utilisation de plusieurs outils de forage et des durées de réalisation des puits élevées. Le coût de revient des puits très élevés et les résultats qui n'étaient pas au niveau escompté. Les forages Horizontaux ont permis à la Sonatrach d'envisager l'utilisation de l'UBD dans le champ de Hassi Messaoud afin d'évaluer les résultats.

En effet deux projets UBD ont été lancés en « 2001 » pour la réalisation du puits « OMOZ 243 et OMJZ 502 »par « Enafor 28 ». Après ses résultats, un vaste programme

ambitieux de forage en UBD est lancé à « Hassi Messaoud ».

III.6.Etude de cas d'un puits OMN747 :

III.6.1. Introduction :

Notre étude s'articule autour la stabilité des parois de puits « **OMN747** » qui situe dans le champ de « **Hassi Messaoud** » au droit du réservoir lors d'un forage en Under balance, pour un but de déterminer l'orientation la plus stable et l'intervalle de densité assurant une stabilité optimale. L'avantage d'un état de paroi plus stable est de faciliter le forage en limitant le volume des déblais et améliorant le nettoyage, il permettra au puits d'avoir une plus longue durée de vie pendant la production.

Cette modeste travail a été réalisée en prenant des enregistrements des diagraphies et nous avons analysé afin d'atteindre les résultats souhaites.

III.6.2.Presentation de la problématique :

Durant le forage en Under balance l'instabilité de parois est un gros problème qu'il cause la fracturation et la perte de circulation, le cavage excessif ou les difficultés de maîtrise de la direction ,le resserrement du trou, le coincement de la garniture ,ou notre étude sert à assurer et garder la stabilité des parois en utilisant les données des enregistrement des diagraphies et en suivant l'intervalle des densité de la boue .

III.7.Methodologie d'analyse :

Dans ce qui suit de notre étude, on analyser la stabilité des parois d'un drain horizontal foré en UBD à Hassi Messaoud « OMN747 » en passant par les étapes suivantes :

- D'abord, Nous avons introduit un coefficient de calibrage (α) sur la corrélation de Plumb, et on déterminer l'USC de chaque subdivise.
- Ensuite, on détermine une simulation des zones instables pour différentes valeurs des densités (représentation graphiques du Log densité).
- La partie la plus importante est l'analyse des USC et Logs densité assurant la stabilité du puits «OMN747» qu'on va la subdiviser en 3 parties, l'analyse du trou dans les drains D1 et R2.
- On termine notre étude par le choix de la densité requise pour assurer une trajectoire optimale (le plus stable).

  La marché à suivre est éclairer dans le schémas suivante

III.8. Calibration du modèle :

Nous avons introduit un coefficient de calibrage (α) sur la corrélation de Plumb :

$$UCS = \alpha(2.280 + 4.1089E_{stat})$$

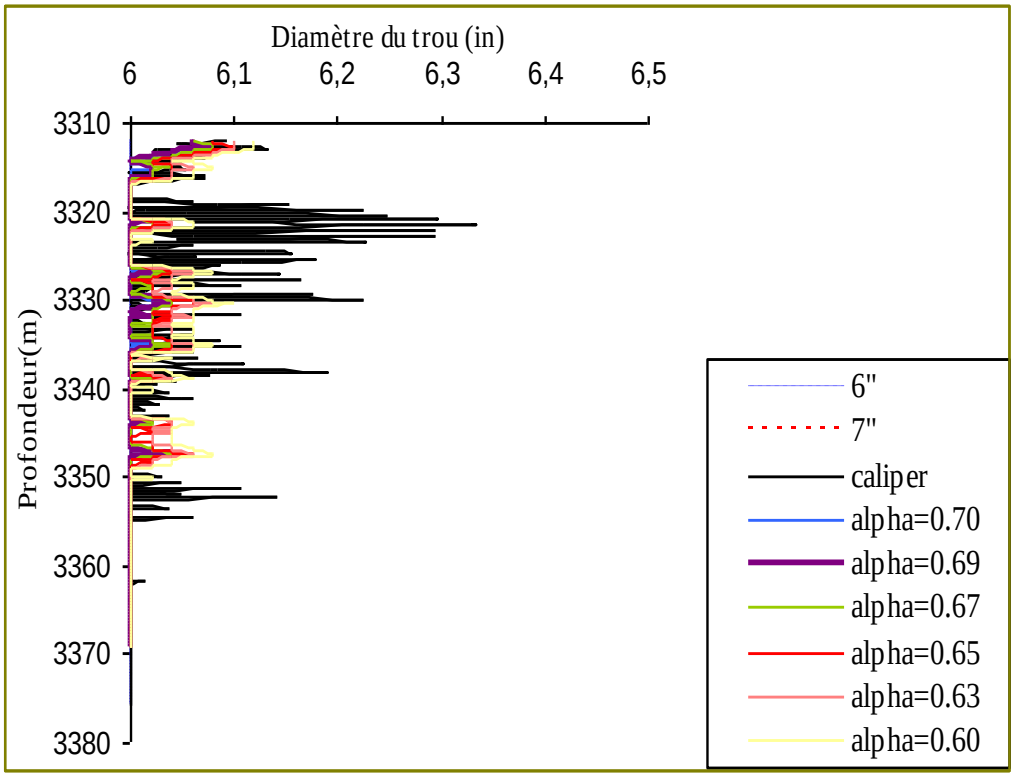


Figure III.5 : « Caliper de (α) ».

D'âpres le log et pour les paramètres du puits «OMN747», on prendre la valeur de coefficient de calibrage ($\alpha = 0.67$).

L'analyse de la stabilité des puits en utilisant des valeurs moyennes permettra de simuler

avec plus de facilité les profondeurs des cavages, On obtenir les résultats d'USC suivants :

	Moyenne	Ecrat type	Min	Max
D2	**86.30**	**6.00**	**62.99**	**99.00**
ID	**81.63**	**3.27**	**74.28**	**87.62**
D1	**75.71**	**6.81**	**58.41**	**91.43**
R2	**53.68**	**6.00**	**27.15**	**80.18**

Tableau III.1 : « Détermination d'USC »

III.9.Imageries de la densité :

L'opération de « logging » permet d'obtenir des enregistrements continus des variations d'un paramètre donné en fonction de la profondeur, dans ces imageries on a l'enregistrement de la densité possible utilisée en cours de forage du puits « OMN747 ».

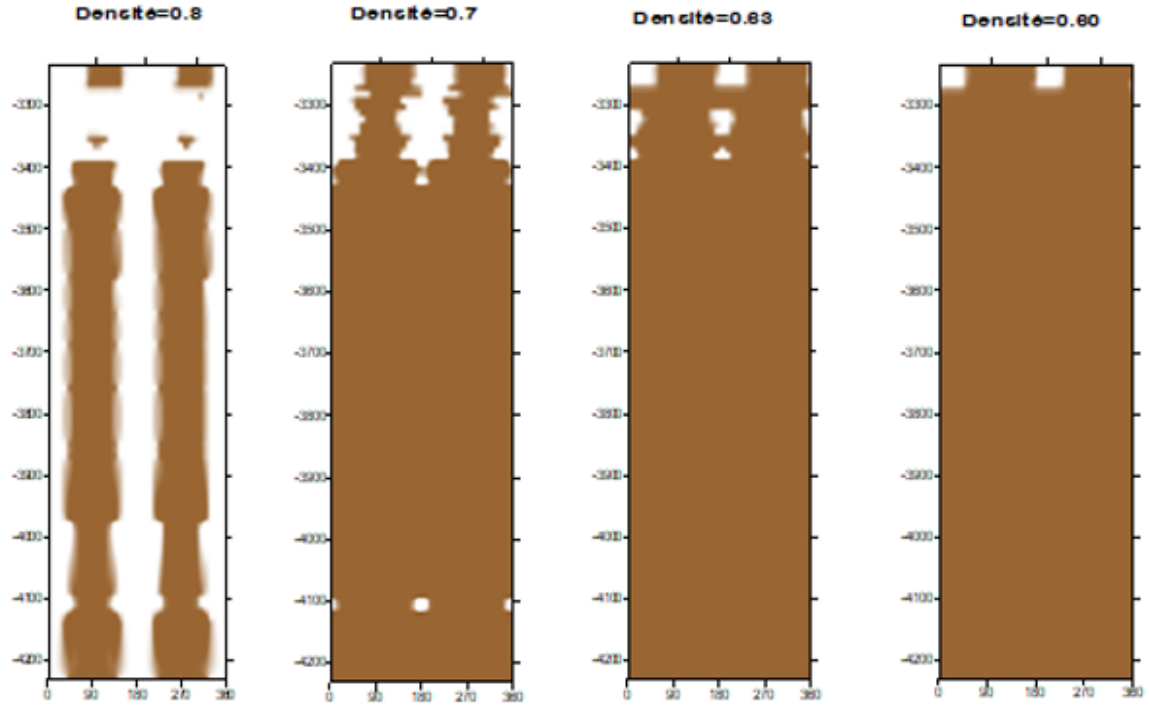


Figure III.6 : « Enregistrement de la stabilité de parois pour chaque densité ».

On note dans l'enregistrement ci-dessus que la densité de (d=0.8) est celle qui doit être évitée en raison de la quantité de vide qui représente l'étendue de l'instabilité des parois du puits ,par contre la densité de (d=0.6) qui est considère la meilleure choix pour assurer la stabilité des parois .

III.9.1.Simulation des zones instables :

Il existe cependant une corrélation linéaire entre l'angle de frottement et le log du gamma ray.

- **Densité = 0.8 :**

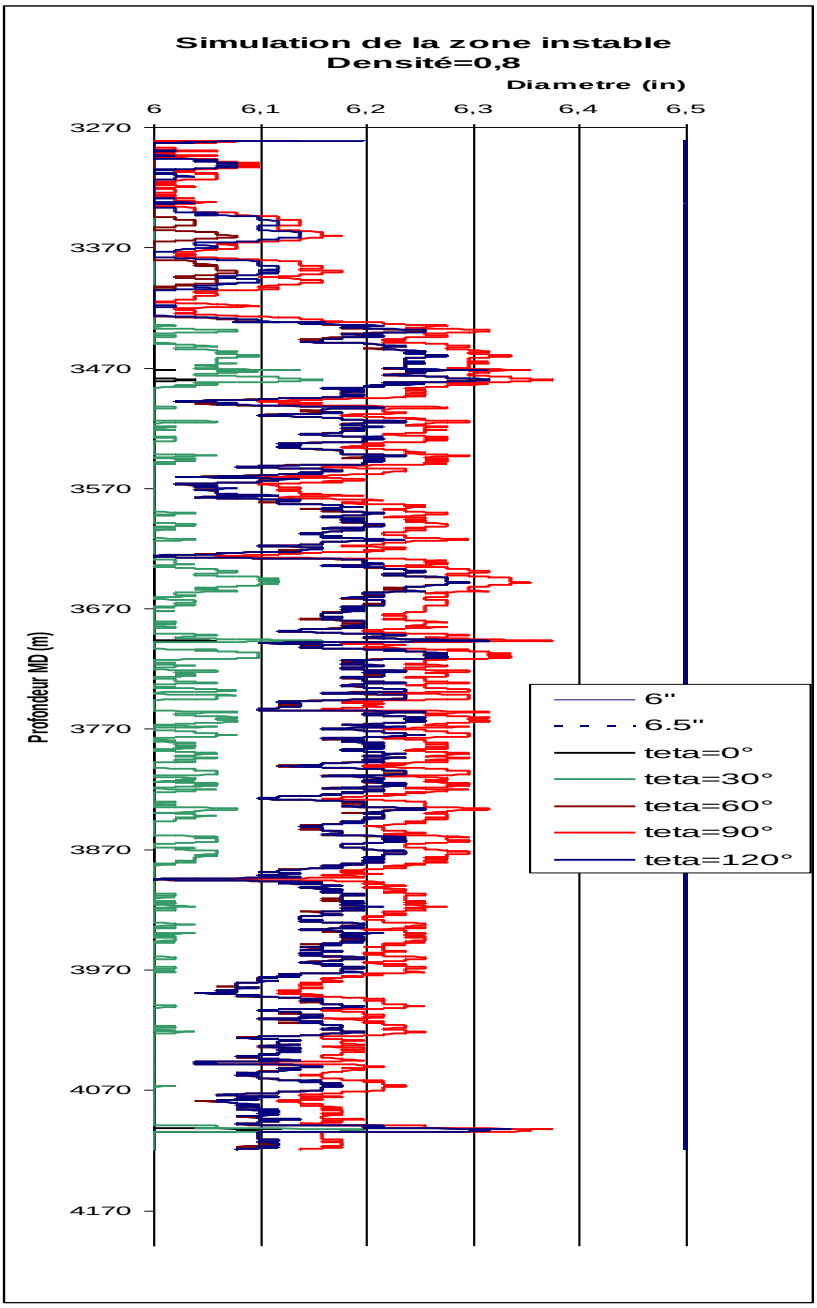


Figure III.7 : « Simulation de la zone instable (d=0.8) »

On remarque que le drain D1 possède des angles de frottement interne large et très rapproche de 6’’, Donc d’après le graphe et la corrélation entre l’angle de frottement interne et log on n’a que le drain D1 est le mois résistant pour densité égale 0.80.

- **Densité = 0.60 :**

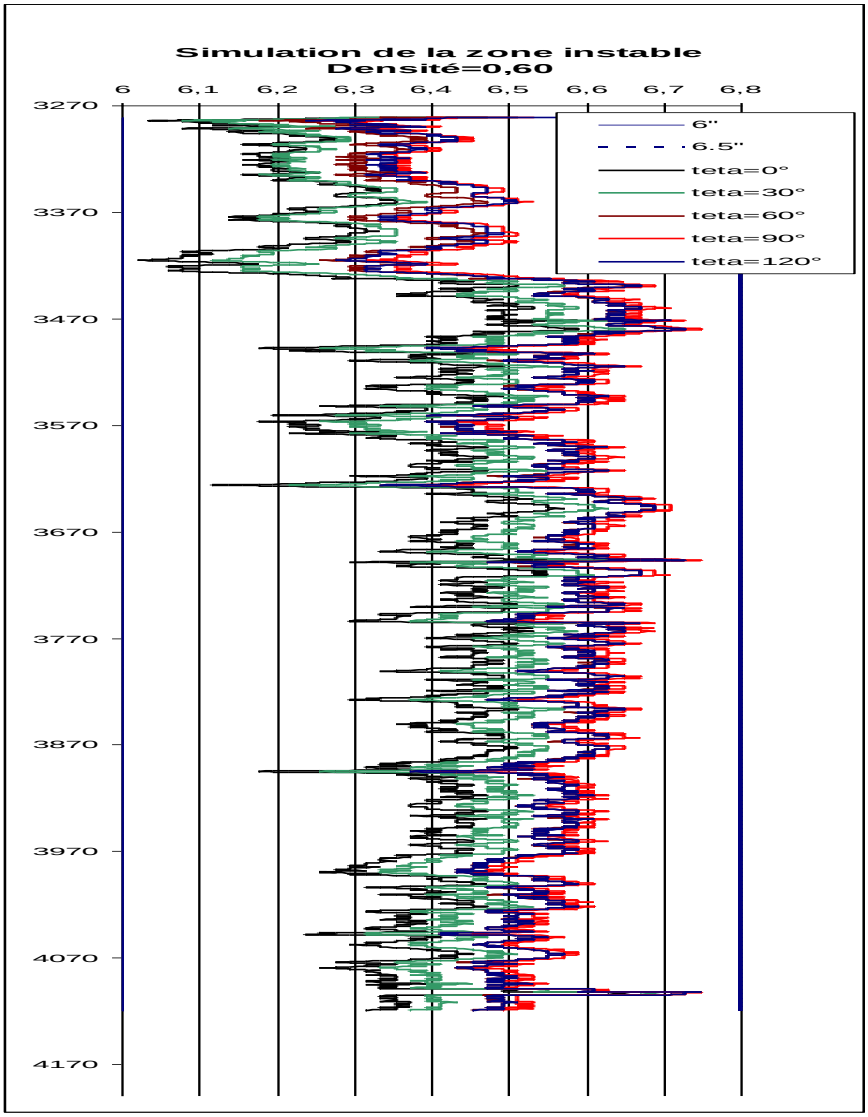


Figure III.8 : « Simulation de la zone instable (d=0.60) »

D’après le log, on remarque de même que le graphique des angles de frottement interne est très rapproche de diamètre de (6’’), et par conséquente le drain D1 est moins résistant et instable lorsque la densité égale (d=0.6).

- **Densité 0.45 :**

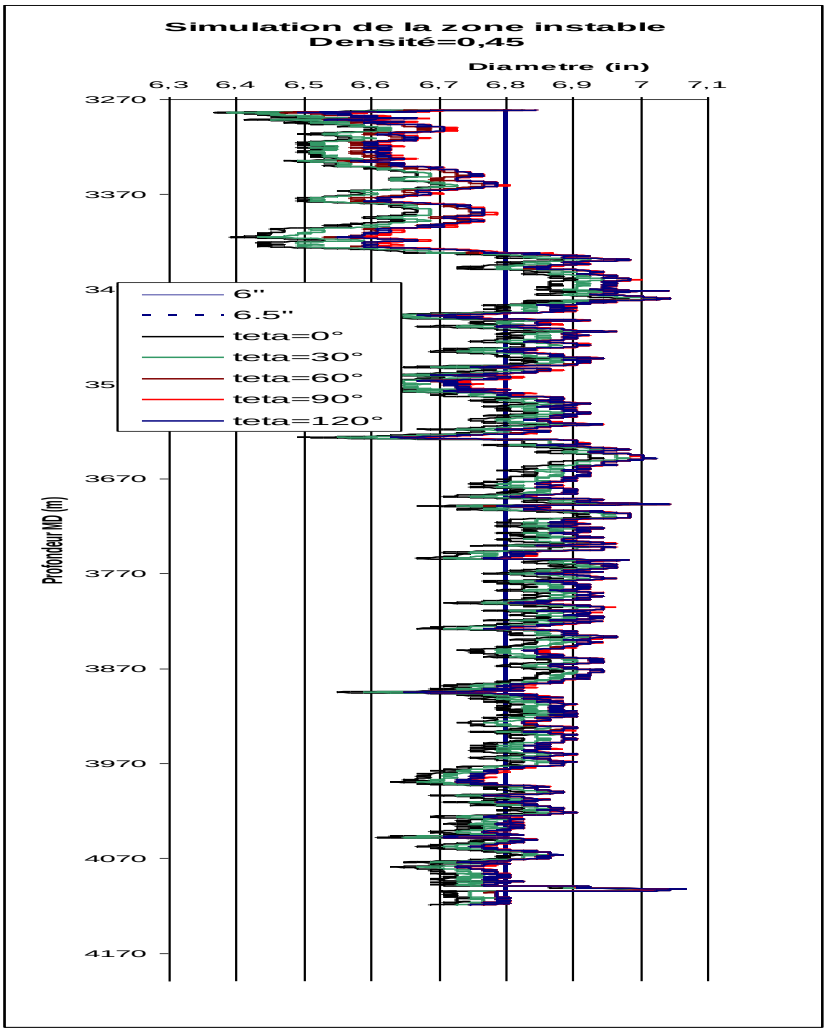


Figure III.9 : « Simulation de la zone instable (d=0.45) »

A densité de boue (d=0.45) au drain D1 on remarque que il y a une faible propagation de le graphique des angles de frottement, et l'absence de $\varphi = 90$ (colore en rouge) alors que $\varphi = 120$ (colore en bleu) rester à distance de diamètre de (6'').Ainsi les lecteurs de la déclaration pour densité égale (d=0.45) sont relativement meilleurs pour la réalisation de drain D1.

III.10.3.Visualisation 2D :

Pour drain : R2 (MD =4120 m, Inc=87.50°, UCS=63.09 MPa) :

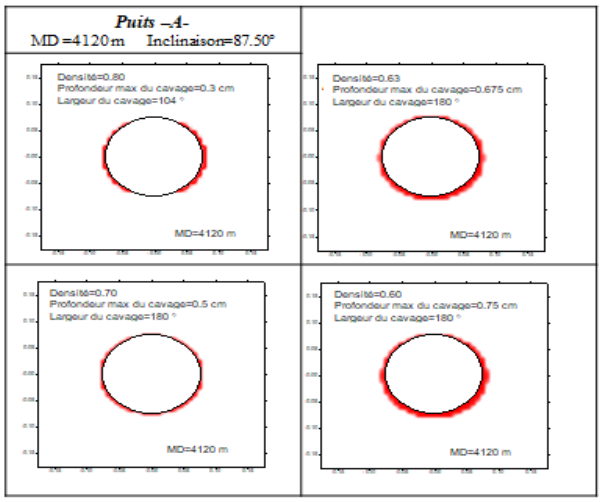


Figure III.10 : « Visualisation 2D de R2 ».

D'après la visualisation 2 dimension de puits au drain R2, Les zones en couleur rouge exprime la forte résistance et la stabilité du paroi, alors on remarque que la densité de boue égale 0.6 c'est le bon choix dans cette profondeur R2.

III.9.2.Les résultants des simulations :

Les drains du cambrien présentent une assez forte résistance à la compression simple variant de 54 à 86 MPa.

D'après cette étude et par corrélation entre log et l'angle de frottement nous avons trouvé que les densités requises pour le forage en UBD pour le puits « OMN747 » sont :

- (d=0.60) Pour le **R2**.
- (d=0.45) Pour le **D1**.

Conclusions et recommandations :

L'objectif de ce travail était d'analyser la stabilité des parois des puits horizontaux forés en Under balance au niveau du champ de Hassi Messaoud. Pour cela, un programme informatique a été élaboré pour les différents calculs nécessaires à notre étude.

Dans ce travail, nous avons essayé de trouver la bonne densité qui assurerait une forte stabilité des parois du puits .Cela se fait par une analyse des enregistrements récupères a partir l'opération diagraphie. Les résultats obtenus indiquent que les recommandations suivantes doivent être suivies :

- La grande valeur de l'UCS des drains du cambrien fait que le forage en UBD est réalisable.
- Les caractéristiques mécaniques des roches, les contraintes en place et la pression des pores sont les facteurs essentiels agissant sur la stabilité des puits déviés.

Pour ne pas dépasser la limite admissible du cavage qui est de l'ordre de 1", il ne faut pas descendre au - dessous d'une densité de (d=0.6) dans le **R2** et (0.45) pour le **D1**.

RESUME

Le forage aura comme conséquence d'enlever une partie de la roche, qui était préalablement en équilibre. Pour atténuer cette perturbation de la roche, on essaye de remplacer la résistance qui était fournie par la partie enlevée par l'effet du fluide de forage. Mais dans le forage en Under balance la pression de ce fluide est inférieure à celle de réservoir ce qui pose un problème de stabilité du puits, pour éviter ce problème nous devons surveiller et analyser la stabilité des parois du puits avant et lors de forage.

Cette étude repose essentiellement sur déterminer l'orientation la plus stable et l'intervalle de densité assurant une stabilité optimale. Pour arriver aux résultats, nous sommes appuyées sur les enregistrements de logging.

Au final, l'analyse de la stabilité des parois et la dernière partie est l'étude de la stabilité des parois pour le cas du puits « **OMN747** » sur laquelle repose notre objectif d'étude.

Abstract

The drilling will result in removing part of the rock, which was previously in equilibrium. To mitigate this disturbance of the rock, we try to replace the resistance that was provided by the part removed by the effect of the drilling fluid. But in the drilling in Under balance the pressure of this fluid is lower than that of the reservoir which poses a problem of stability of the well, to avoid this problem we must monitor and analyze the stability of the walls of the well before and during drilling.

This study is essentially based on determining the most stable orientation and the density interval ensuring optimal stability. To arrive at the results, we rely on the logging records.

In the end, the wall stability analysis and the last part is the wall stability study for the "OMN747" well case on which our study objective is based.

ملخص

سينتج عن الحفر إزالة جزء من الصخر الذي كان في حالة توازن سابقًا. للتخفيف من هذا الاضطراب في الصخر ، يتم إجراء محاولة لاستبدال المقاومة التي تم توفيرها بواسطة الجزء الذي تمت إزالته بواسطة تأثير مائع الحفر. لكن في الحفر في تحت التوازن يكون ضغط هذا السائل أقل من ضغط الخزان مما يطرح مشكلة استقرار البئر ، ولتجنب هذه المشكلة يجب علينا مراقبة وتحليل استقرار جدران البئر قبل وأثناء الحفر .

تعتمد هذه الدراسة بشكل أساسي على تحديد الاتجاه الأكثر استقرارًا وفاصل الكثافة لضمان الاستقرار الأمثل. للوصول إلى النتائج ، نعتمد على سجلات التسجيل.

" التي يعتمد عليها هدف OMN747 في النهاية ، تحليل ثبات الجدار والجزء الأخير هو دراسة ثبات الجدار لحالة البئر " دراستنا.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[1] Francis Duseux, Le rôle des hydrocarbures dans la transition énergétiques, novembre2015

[2] Brogini Maurice. Hydrocarbures et industrialisation en Algérie ,1972.

[3] Tzimas, Enhanced Oil Recovery using Carbon Dioxide in the European Energy System, 2005.

[4] Editions TECHNIP, Recherche et production du pétrole et du gaz, 2002.

[5] Isabelle Couillet, Fracturation hydraulique : Propriétés dynamiques en milieu aqueux de systèmes mixtes micelles vermiculaires-polymères associatifs d'origine naturelle, 10 janvier 2006.

[6] Gasc-Barbier Didier Hantz, La mécanique des roches pour les ouvrages du génie civil Ingénierie des roches.

[7] Mondher NEIFAR, Institut Supérieur de l'Education et de la Formation Continue

[8] TIMOSHENKO, Résistance des matériaux ,1977 .

[9] Mourad ABERKANE, MEMOIRE PRÉSENTÉ À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGENIERIE

[10] ELSEVIER. SADD, MARTIN. Elasticity Theory, Applications, and Numerics, 2005.

[11] François Sidoroff, Mécanique des milieux continus, 1980.

[12] Masson, SOLOMON, Elasticité linéaire ,1968 .

[13] V. Maury, notes de coure de mecanique de roche, février 2002.

[14] Simon, 2014.

[15] MACIEJ ARMATYS, MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES, AVRIL 2012.

[16] Berlin Heidelberg, Paterson, Experimental rock deformation-the brittle field, 1978.

[15] Thi Thanh Nhan Hoang, Etude du comportement d'un milieu rocheux fracturé : Application à la réalisation du tunnel de St Béat, 2010.

[16] Bérest, et all, Comportement mécanique des discontinuités. Manuel de mécanique des roches, 2000.

[17] BENDJABALLAH, CALCUL NUMERIQUE DU MODULE D'YOUNG D'UN MATERIAU HOMOGENE ET ISOTROPE BASE SUR LA THEORIE DES POUTRES, 2010.

[18] ZHAO Jian, mécanique et propriétés des massifs rocheux–2 ème partie, 2008.

[19] MALAOUI Fazia, KRARRAZ Amina, Etude de stabilité des parois d'un puits pétrolier, 2019/2020.

[20] Bensaada, RESISTANCE DES MATERIAUX.

[21] Chapellier, diagraphies aquifères, institut français du pétrole .

[22] Kamel Belkheir, stabilité des parois des puits : application de forage dirigé, Décembre 2002.