

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



UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE
FACULTE DE GENIE CIVIL

THESE

Présentée par
M^{lle} Nadia MEZIANE
Ingénieur d'Etat en Génie Civil de l'U.S.T.H.B

Pour l'obtention du grade de :

MAGISTER EN GENIE CIVIL
SPECIALITE : CONSTRUCTION

THEME :

SUR LA
CARACTERISATION MECANIQUE DE LA
ROCHE RESERVOIR DE HASSI MESSAOUD

Soutenue le : 29 / 09 / 2002

Devant le jury composé de :

Mr	A. CHELGHOU	Professeur à l'U.S.T.H.B.	Président
Mme	F. KHARCHI	Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.	Directrice de thèse
Mr	H. DJELOUAH	Professeur à l'U.S.T.H.B.	Examineur
Mr	N. LARADI	Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.	Examineur
Mr	B. TILIOUINE	Professeur à l'E.N.P.	Examineur
Mr	N. NAILI	Docteur d'Etat - CRD / SONATRACH	Invité
Mr	K. KARTOBI	Chercheur - CRD / SONATRACH	Invité

REMERCIEMENTS

Le contenu de cette thèse est le fruit d'un travail effectué à la faculté de Génie Civil de l'U.S.T.H.B., et au Centre de Recherche et de Développement de la SONATRACH.

Je voudrai en premier lieu remercier Mr A. CHELGHOUM qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Je tiens également à exprimer ma profonde et respectueuse gratitude à Mr H. DJELOUAH pour son accueil, sa gentillesse, ses précieux conseils scientifiques, et son aide inestimable. Il me fait un grand honneur en acceptant d'examiner ma thèse, je lui suis très reconnaissante.

Mes sincères remerciements vont aussi à Mr B. TILIOUINE qui a toujours marqué un grand intérêt pour cette recherche et qui m'a fait l'honneur d'examiner ce travail. Je le remercie pour les entretiens fructueux et les précieux conseils.

Qu'il me soit également permis de présenter mes remerciements les plus sincères à Mr N. LARADI qui n'a pas hésité à me faciliter toute procédure administrative, et qui m'a honoré en acceptant d'examiner le mémoire.

Je mesure tout l'honneur qu'a bien voulu me faire Mr N. NAILI, ex Directeur Gisement du C.R.D., en acceptant de faire partie du jury. Je tiens à lui exprimer ma vive reconnaissance de m'avoir accueilli au sein de sa direction en qualité de stagiaire pendant deux années, et d'avoir permis mon déplacement à Hassi Messaoud dans le cadre de cette recherche. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect.

Mais ce travail a avant tout été possible grâce à deux personnes qui en ont assuré l'orientation par une collaboration qui s'est déroulé en toute confiance.

Il s'agit de Mme F. KHARCHI qui a bien voulu diriger les travaux de cette thèse. Son concours éclairé et cordial, son accueil chaleureux, sa patience et sa compréhension dans les moments difficiles sont inestimables. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde admiration.

Mr K. KARTOBI en tant que responsable du projet de recherche au sein du C.R.D., a suivi les travaux de bout en bout. Je lui voue une énorme reconnaissance pour m'avoir guidé tout au long du travail, avec un dévouement permanent qu'il m'a toujours réservé, des conseils précieux, une grande souplesse et beaucoup de patience, qu'il me soit permis de lui présenter mes sincères remerciements.

Ma gratitude va également à tout le personnel du C.R.D., en particulier Mr YEBKA pour l'accueil qu'il m'a réservé au laboratoire des analyses pétrophysiques dont il assure la direction. Ma vive reconnaissance va à Messieurs BOUKHELIF, HADJI, BELKADI et HAMMOUCHE qui ont participé à la réalisation des essais, et à A. GANA et Aida qui n'ont pas hésité à m'apporter aide et soutien.

Un amical remerciement est également adressé à Mr CHARA, responsable du laboratoire d'analyse par granulométrie laser au C.R.D., pour sa gentillesse, son soutien moral et scientifique, et sa précieuse contribution à l'analyse des résultats. J'admire sa conscience professionnelle exemplaire et sa sincérité, qu'il trouve ici l'expression de mon respect.

Je tiens à exprimer une reconnaissance particulière à Mr F. FERFERA, responsable du laboratoire mécanique des roches de Hassi Messaoud, pour son amabilité, sa gentillesse et ses encouragements, pour les précieux conseils scientifiques qu'il m'a prodigué sans aucune

hésitation, et la précieuse documentation dont il m'a fait bénéficier. Je le remercie pour le temps qu'il a consacré à la lecture de ma thèse, et les précieuses remarques qu'il m'a donné. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Enfin, je ne remercierai jamais assez mes parents, mes frères et mes sœurs, chez lesquels j'ai trouvé amour, réconfort et soutien dans les moments les plus pénibles. Leur présence à mes côtés et leurs encouragements m'ont aidé à surmonter toutes les difficultés, qu'il me soit permis de leur exprimer mon éternelle reconnaissance.

Je remercie tout ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : GENERALITES	4
I.1. DEFINITIONS GENERALES ET ROLE DE LA CARACTERISATION MECANIQUE DES RESERVOIRS	5
I.2. METHODES DE CARACTERISATION DE LA ROCHE RESERVOIR	7
I.2.1. Caractérisation au laboratoire	7
I.2.2. Caractérisation in situ	7
I.3. CARACTERISATION MECANIQUE DE LA ROCHE RESERVOIR	8
I.4. CARACTERISATION MECANIQUE DYNAMIQUE DE LA ROCHE RESERVOIR	9
I.4.1. Notion de propagation d'ondes	9
a. <i>Propagation des ondes dans un milieu élastique linéaire isotrope</i>	9
b. <i>Expression du module de Young dynamique en fonction des vitesses des ondes acoustiques</i>	9
I.4.2. Méthodes de transmission des ondes	11
a. <i>La méthode par transparence</i>	12
b. <i>La méthode par échos</i>	12
CHAPITRE II : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	13
II.1. INFLUENCE DE QUELQUES CARACTERISTIQUES SUR LES PROPRIETES ACOUSTIQUES DU MILIEU POREUX	14
II.1.1. Influence de la pression sur la vitesse des ondes acoustiques	14
a. <i>La pression effective</i>	14
b. <i>Pression de pore et pression de confinement</i>	16
II.1.2. Influence de la saturation sur la vitesse	18
II.1.3. Influence de la température sur la vitesse	20
II.1.4. Influence de la fréquence sur la vitesse	20
II.1.5. Influence de la porosité sur les vitesses	21
II.1.6. Influence du contenu en argile sur les vitesses	22

II.2. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS ACOUSTIQUES DE LABORATOIRE ET DE DIAGRAPHIE	24
II.3. FORMULES EMPIRIQUES UTILISEES DANS LE DOMAINE PETROLIER	26
II.3.1. Corrélations établies pour la roche réservoir de Hassi Messaoud	28
CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE	30
III.1. CHOIX DU Puits ET DESCRIPTION GEOLOGIQUE	31
III.1.1. Choix du puits	31
III.1.2. Description et coupe géologique du puits MD#507	31
III.2. ESSAIS REALISES IN SITU	34
III.2.1. Généralités	34
III.2.2. Essais effectués sur le puits MD#507	34
a. <i>Détermination de la porosité</i>	35
b. <i>Mesure de la densité de la formation</i>	36
c. <i>Détermination du pourcentage d'argile dans la formation</i>	36
d. <i>Détermination des paramètres mécaniques dynamiques de la formation</i>	37
III.3. ESSAIS REALISES AU LABORATOIRE	39
III.3.1. Préparation des échantillons	39
III.3.1. 1. Choix des cotes d'échantillonnage et recalage	39
a. <i>Choix des cotes d'échantillonnage</i>	39
b. <i>Recalage des cotes</i>	40
b.1) Essai Gamma Ray de surface	40
b.2) Essai acoustique	41
III.3.1.2. Carottage	42
III.3.1.3. Lavage des échantillons	42
III.3.1.4. Choix du type de chargement à adopter pour les essais	42
III.3.1.5. Choix de l'état de saturation des échantillons	45
III.3.1.6. Conclusion	46
III.3. 2. Analyses pétrophysiques	47
III.3.2.1. Analyses conventionnelles	47
a. <i>Mesure de la porosité</i>	47
b. <i>Mesure de la perméabilité</i>	49
c. <i>Mesure de la densité</i>	50
III.3.2.2. Analyses spéciales	50

a. <i>Mesure de la porosité</i>	51
b. <i>Mesure de la perméabilité</i>	51
III.3.3. Détermination de la texture des échantillons et du volume d'argile contenu dans leur matrice	52
III.3.3.1. Analyse granulométrique laser	52
III.3.3.2. Analyse par diffractométrie des rayons x	54
III.3.3.3. Analyse pétrographique sur lames minces	57
III.3.4. Détermination des caractéristiques mécaniques dynamiques des échantillons	58
CHAPITRE IV : RESULTATS DES ESSAIS	65
IV.1. RESULTATS DES ESSAIS REALISES IN SITU	66
IV.1.1. La porosité Φ (%)	66
IV.1.2. Le pourcentage d'argile	66
IV.1.3. La densité	67
IV.1.4. Les propriétés acoustiques	67
IV.2. RESULTATS DES ESSAIS REALISES AU LABORATOIRE	69
IV.2.1. Résultats des analyses pétrophysiques	69
a. <i>Les analyses conventionnelles</i>	69
b. <i>Les analyses spéciales</i>	69
IV.2.2. Résultats des tests destinés à la détermination du volume d'argile	73
a. <i>L'analyse pétrographique sur des lames minces</i>	73
b. <i>Diffractométrie de Rayons X</i>	75
c. <i>L'analyse granulométrique laser</i>	75
IV.2.3. Résultats des essais mécaniques dynamiques	76
CHAPITRE V : EXPLOITATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	79
V.1. INFLUENCE DE LA POROSITE ET DU CONTENU EN ARGILE SUR LES VITESSES DES ONDES ACOUSTIQUES	80
V.1.1. Variation des vitesses des ondes P et S en fonction de la porosité	80
V.1.2. Variation des vitesses des ondes P et S en fonction du contenu en argile	81
a. <i>Détermination du pourcentage d'argile contenu dans les échantillons - Choix de la méthode</i>	81
b. <i>Influence du contenu en argile sur les vitesses des ondes acoustiques</i>	82

V.2. CALCUL DES PARAMETRES MECANIQUES DYNAMIQUES	85
V.2.1. Le module de Young dynamique	85
V.2.1.1. Variation du module de Young dynamique en fonction de la pression hydrostatique	85
V.2.1.2. Variation du module de Young dynamique en fonction de la porosité	87
V.2.1.3. Variation du module de Young dynamique en fonction du contenu en argile	87
V.2.2. Le module de cisaillement dynamique	88
V.2.2.1. Variation du module de cisaillement dynamique en fonction de la pression hydrostatique	88
V.3. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS DES MESURES ACOUSTIQUES REALISEES IN SITU ET AU LABORATOIRE	89
V.4. CORRELATIONS	92
V.4.1. Corrélation N°1	93
V.4.2. Corrélation N°2	94
V.4.3. Calcul des paramètres mécaniques dynamiques	95
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	101
ANNEXES	

NOMENCLATURE

Lettres Latines :

A	Facteur de proportionnalité correspondant à l'activité gamma du minéral ou de l'élément radioactif
a	Coefficient dépendant de la lithologie
D	Diamètre de l'échantillon
d	Distance entre l'émetteur et la récepteur
d _r	Distance réticulaire
E	Module de Young
E _{dy}	Module de Young dynamique
F	Facteur de formation dépendant de la texture de la roche
G	Module de cisaillement
G _{dy}	Module de cisaillement dynamique
GR	Radioactivité globale mesurée
GR _{maximum}	Radioactivité globale maximale
GR _{minimum}	Radioactivité globale minimale
GR _{niveau}	Radioactivité globale mesurée à la profondeur z
g	Accélération de la pesanteur
k	Perméabilité
L	Longueur de l'échantillon
m	Facteur dépendant du type de sédiment, de la forme des pores et des liaisons entre pores
m _s	Masse de l'échantillon sec
n	Nombre d'échantillons
n _r	Ordre de réflexion
P	Onde de compression
P _C	Pression de confinement
P _P	Pression de pore
P _{atm}	Pression atmosphérique
P _{eff}	Pression différentielle ou pression effective
P _{eq}	Pression d'équilibre
P _f	Pression de fermeture des microfissures
P _{fl}	Pression du fluide
P _g	Pression d'injection
P _{pf}	Pression finale commune
P _s	Pression en sortie
P ₁	Pression dans la chambre de référence 1

P_2	Pression dans la chambre de référence 2
Q	Débit
R_0	Résistivité de la formation
R_w	Résistivité de l'eau interstitielle
S	Onde de cisaillement
S	Surface d'injection
S_o	Saturation en huile
S_w	Saturation en eau
T	Température
t_P	Temps de parcours des ondes P
t_S	Temps de parcours des ondes S
u	Déplacement
V	Vitesse
V_E	Vitesse des ondes d'extension
V_P	Vitesse des ondes de compression
V_S	Vitesse des ondes de cisaillement
V_P^{atm}	Vitesse des ondes P sous pression atmosphérique
V_S^{atm}	Vitesse des ondes S sous pression atmosphérique
V_P^{diag}	Vitesse des ondes P dans la formation mesurée par diagraphie sonique
V_S^{diag}	Vitesse des ondes S dans la formation mesurée par diagraphie sonique
V_P^{45MPa}	Vitesse des ondes P sous une pression de 45MPa
V_S^{45MPa}	Vitesse des ondes S sous une pression de 45MPa
V_f	Vitesse dans le fluide
V_m	Pourcentage volumique du minéral ou de l'élément radioactif dans la formation
V_{sat}	Vitesse dans la roche saturée
V_{sh}	Volume d'argile
$V_{sh\ niveau}$	Pourcentage volumique de l'argile à une profondeur z
V_r	Vitesse dans la matrice de la roche
V_S	Volume réel des grains
V_T	Volume total de l'échantillon
V_V	Volume des vides entre les grains
V_{am}	Volume amont
V_{av}	Volume aval
V_{fl}	Volume du fluide
V_1	Volume de la chambre de référence 1
V_2	Volume de la chambre de référence 2
z	Epaisseur de la couche

Lettres Grecques :

δ_{ij}	Symbole de Kronecker
ε	Déformation
ε_{ij}	Tenseur des déformations
Φ	Porosité
$\Phi_{45\text{MPa}}$	Porosité mesurée à 45MPa
ϕ	Potentiel scalaire
λ	Paramètre de Lamé
λ_d	Longueur d'onde
μ	Viscosité du fluide
ν	Coefficient de Poisson
θ	Dilatation volumique
θ_d	Angle de diffraction
ρ	Masse volumique
ρ_b	Densité globale de la formation
ρ_f	Masse volumique du fluide
ρ_m	Densité du minéral ou de l'élément radioactif
ρ_s	Masse volumique de la matrice
σ_{ij}	Tenseur des contraintes
σ_H	Contrainte maximale horizontale
σ_h	Contrainte minimale horizontale
σ_v	Contrainte verticale
ψ	Potentiel vecteur

RESUME :

La recherche comme la production des hydrocarbures nécessitent des opérations très coûteuses qu'il est nécessaire de maîtriser. La maîtrise de ces opérations dépend essentiellement de la bonne estimation des différentes caractéristiques du réservoir.

En Algérie, et plus particulièrement sur le champ de Hassi Messaoud, ces caractéristiques sont encore aujourd'hui difficilement prévisibles et ce malgré les connaissances géologiques accumulées sur plusieurs centaines de puits carottés en continu les quarante dernières années, et malgré les larges développements réalisés dans le domaine de la caractérisation des réservoirs.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux caractéristiques mécaniques dynamiques de la roche réservoir de Hassi Messaoud, et particulièrement à la mesures de son module de Young dynamique par le biais de deux types d'essais : des mesures effectuées au laboratoire en utilisant une cellule triaxiale munie d'un sonique, et des tests réalisés in situ basés sur une propagation d'ondes acoustiques.

Les résultats obtenus au laboratoire serviront à l'établissement d'une corrélation s'appliquant à la roche réservoir de Hassi Messaoud dans le but de faire une prédiction de la valeur de ses propriétés dans le cas de l'absence de mesures effectuées dessus.

SUMMARIZED:

Research as the production of hydrocarbons require very expensive operations which it is necessary to control. The control of these operations depends primarily on the good estimate of the various characteristics of the tank.

In Algeria, and more particularly on the field of Hassi Messaoud, these characteristics are not easily foreseeable still today and this in spite of the geological knowledge accumulated on several hundreds of wells cored uninterrupted the forty last years, and in spite of the broad developments carried out in the field of the characterization of the tanks.

In this study, we are interested in the dynamic mechanical characteristics of the rock tank of Hassi Messaoud, and particularly in measurements of its dynamic Young modulus by the means of two types of tests: the measurements taken at the laboratory by using a triaxial cell provided with sonic, and tests carried out in situ based on a propagation of acoustic waves.

The results obtained at the laboratory will be used for the establishment of a correlation applying to the rock tank of Hassi Messaoud with an aim of making a prediction of the value of its properties in the case of the absence of measurements taken above.

Introduction

*D*ès la découverte du gisement, les ingénieurs pétroliers tentent de caractériser au mieux le réservoir afin de maîtriser, contrôler et optimiser son exploitation. Pour cela, plusieurs tests sont entrepris : des mesures diagaphiques réalisées in situ, et des essais de laboratoire effectués sur des échantillons extraits du fond des puits. Différentes propriétés du réservoir sont ainsi déterminées, puis introduites comme données dans des modélisations numériques destinées à simuler sa mise en production, permettant ainsi d'estimer sa productivité et de prévoir son comportement lors des différentes opérations d'exploitation.

Malheureusement, malgré les larges développements réalisés dans le domaine de la caractérisation des réservoirs, certaines propriétés restent parfois mal connues et sont traitées de ce fait d'une manière très approximative.

Les propriétés mécaniques du réservoir font encore partie de ces paramètres mal connus, bien que la mécanique des roches appliquée au domaine pétrolier ait réalisé un remarquable développement durant les deux dernières décennies. Les difficultés rencontrées sont dues à la complexité des structures géologiques du réservoir, la présence de différents fluides interstitiels à différentes proportions, l'effet des contraintes imposées par le milieu environnant (pressions effectives, pressions interstitielles, température, ...etc.), l'absence d'observations directes sur le site et la mauvaise connaissance des contraintes réelles qui règnent in situ. Ces propriétés mécaniques sont déterminées par deux types de mesures : des essais dynamiques (non destructifs) basés sur une propagation d'ondes acoustiques, et des essais statiques (destructifs) qui consistent à soumettre la roche à un état de contrainte donné et de la solliciter jusqu'à la rupture.

Les paramètres mécaniques dynamiques qui ont fait l'objet principal de notre étude sont déterminés soit in situ par le biais d'un essai sonique, soit au laboratoire en utilisant une cellule triaxiale munie d'un sonique.

In situ, les conditions sont bien connues (pression et température) et la mesure s'attache à estimer les caractéristiques mécaniques dynamiques des terrains traversés à partir du temps de parcours des ondes à travers la formation. Cette technique permet d'avoir des informations rapides et continues le long du réservoir. Cependant, les résultats sont généralement entachés d'erreurs dues à l'utilisation de plusieurs facteurs de correction et à l'influence inévitable de quelques phénomènes sur les mesures (la présence du fluide de forage qui entoure l'outil de mesure, les phénomènes d'invasion qui apparaissent généralement au droit des zones poreuses et perméables et qui modifient les conditions originelles...etc.). De ce fait, il est utile de compléter ces informations par des tests réalisés au laboratoire.

Dans ce cas, l'échantillon est bien connu, tout du moins en ce qui concerne ses principales caractéristiques pétrophysiques, et il est possible dans ce cas d'observer la variation des paramètres mécaniques dynamiques en fonction de certains facteurs comme : la pression, la porosité, le contenu en argile, la fréquence, etc. Ces mesures sont effectuées avec une assez bonne précision, et leur intérêt est évident puisqu'elles permettent de comprendre l'effet de chaque facteur sur les mesures et d'appliquer les résultats au terrain. Malheureusement, les échantillons ne sont pas toujours disponibles

particulièrement dans certaines zones friables où la récupération est difficile voire impossible, d'où la non disponibilité des données le long de réservoir.

En examinant les avantages et inconvénients des deux types d'essai, il apparaît clairement que ceux-ci se complètent, et qu'il est difficile de favoriser l'un par rapport à l'autre. Ainsi, veillant à assurer la fiabilité des résultats, la rapidité de leur obtention et leur continuité le long du réservoir, les pétroliers ont cherché des méthodes complémentaires. Ils ont développé des formules empiriques en combinant des résultats obtenus au laboratoire dans le but de les appliquer sur le terrain. Ces formules permettent de fixer les limites entre lesquelles doit se situer la véritable réponse d'une part, et d'autre part, d'évaluer un paramètre en connaissant les autres. Néanmoins, les chercheurs précisent qu'il faut toujours garder à l'esprit que les modèles présentés concernent des échantillons bien déterminés et que l'extrapolation de ces résultats à d'autres échantillons ne peut être faite qu'avec une grande précaution.

A partir de là, l'idée de développer des formules s'appliquant à la roche réservoir de Hassi Messaoud est née, celui-ci étant considéré comme l'un des plus grands gisements au niveau mondial. En effet, la caractérisation mécanique des réservoirs sur le champ de Hassi Messaoud se fait depuis plusieurs années par le biais de la diagraphie sonique. Mais les ingénieurs pétroliers ont constaté que les valeurs obtenues par ce procédé sont mal estimées, ce qui a conduit à l'échec de plusieurs opérations, notamment les opérations de fracturation hydraulique. De plus, l'apparition de nouvelles techniques comme le forage horizontal et le multi-latéral a fait ressentir le besoin d'une connaissance plus précise des caractéristiques mécaniques de la roche réservoir, et ainsi l'intérêt porté aux essais de laboratoire a augmenté dans l'espoir de se rapprocher le mieux possible des valeurs réelles. La SONATRACH a alors investi des moyens humains et matériels considérables dans la recherche, et les travaux ont débuté suite à l'acquisition d'un matériel très sophistiqué et le lancement d'un laboratoire de mécanique des roches en 1996.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire et qui rentre dans le cadre de cette recherche, a trois objectifs principaux :

- la caractérisation mécanique de la roche réservoir de Hassi Messaoud par le biais d'essais dynamiques effectués au laboratoire, en utilisant une cellule triaxiale munie d'un sonique.
- la comparaison entre les résultats obtenus au laboratoire et ceux déterminés in situ.
- le développement d'une corrélation s'appliquant à la roche réservoir de Hassi Messaoud.

Ceci constituera un pas vers une meilleure compréhension du comportement mécanique de cette roche réservoir.

Le mémoire se compose de cinq chapitres présentés comme suit :

Afin d'initier le lecteur à mieux comprendre certains termes relatifs au domaine pétrolier, nous avons jugé nécessaire d'entamer notre travail par des généralités. Ce premier chapitre présente également les diverses applications de la mécanique des roches dans le domaine de la production d'hydrocarbures, ainsi que quelques notions fondamentales relatives aux méthodes de mesure des paramètres mécaniques dynamiques de la roche réservoir.

Le second chapitre présente les résultats donnés dans la littérature, qui sont relatifs aux diverses expériences de laboratoire sur les milieux poreux. La variation des vitesses des ondes acoustiques en fonction de divers paramètres comme la pression, la température, la fréquence, ...etc. est examinée en

détail, en donnant à chaque fois l'interprétation théorique la plus probable. Cette analyse nous a permis de définir les paramètres qui affectent le plus le comportement mécanique de la roche.

Nous présentons au troisième chapitre l'ensemble des mesures réalisées in situ et au laboratoire, en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire. Les tests de laboratoire ont été effectués sur des échantillons extraits du fond d'un puits situé sur le champs de Hassi Messaoud. Le recalage des cotes s'est fait par le biais de deux essais : un essai gamma ray de surface et un essai acoustique. Les caractéristiques pétrophysiques et mécaniques dynamiques des échantillons ont été déterminées dans des conditions normales de pression, puis sous l'effet d'une pression hydrostatique, afin de reproduire au mieux les conditions auxquelles était soumise la roche initialement. Le choix du type de chargement appliqué s'est fait suite à une analyse de quelques travaux réalisés dans ce sens.

Une analyse pétrographique sur des lames minces, une analyse aux rayons X et une analyse granulométrique laser ont également été réalisées dans le but de déterminer le taux d'argile contenu dans chaque échantillon..

Les résultats bruts de l'ensemble des essais réalisés au laboratoire et in situ sont regroupés au quatrième chapitre, puis traités et interprétés au chapitre V. Le traitement de ces résultats a été fait de telle sorte à montrer la variation des paramètres acoustiques des échantillons en fonction de la pression appliquée, de leur porosité et leur contenu en argile. La variation des caractéristiques mécaniques dynamiques en fonction de ces mêmes paramètres a ensuite été déduite et représentée sous forme de courbes.

L'un des objectifs de notre travail étant de développer un modèle s'appliquant à la roche réservoir de Hassi Messaoud, nous avons tenté d'établir une corrélation en combinant certains résultats que nous avons déterminés. Les résultats obtenus suite à l'application de cette formule ont été comparés à ceux obtenus par diagraphie. Les principaux résultats et conclusions tirés à partir de ce travail sont regroupés dans une conclusion générale. Quelques recommandations sont proposées ainsi que d'éventuels travaux de recherche futurs.

CHAPITRE I

GENERALITES

Afin de montrer l'importance de la bonne caractérisation mécanique de la roche réservoir dans l'exploration et l'exploitation des gisements pétroliers, nous avons introduit notre travail par quelques définitions fondamentales, ainsi qu'un aperçu général sur les diverses applications de la mécanique des roches dans le domaine pétrolier.

Puis, plus particulièrement intéressée par les essais mécaniques dynamiques, nous avons jugé nécessaire de donner quelques notions fondamentales relatives à la propagation des ondes acoustiques dans les milieux poreux.

I.1. DEFINITIONS GENERALES ET ROLE DE LA CARACTERISATION MECANIQUE DES RESERVOIRS

Le pétrole et le gaz naturel appelés fréquemment hydrocarbures ont pour origine les matières organiques contenues dans les sédiments. Ces matières organiques sont généralement constituées de micro algues et de micro organismes qui se déposent en milieu aquatique, notamment au fond des mers.

Lors du dépôt, et au début de l'enfouissement de ces sédiments, une grande partie des matières les constituant est détruite principalement par oxydation. La partie qui subsiste contient du kérogène, qui se transforme en hydrocarbures par craquage thermique, et ceci suite à l'enfouissement progressif des sédiments qui provoque une importante compression et une forte montée en température.

Les roches qui contiennent ces matières organiques et qui sont le siège de toutes ces transformations sont appelées roches mères. Elles sont imperméables, compactes et généralement constituées par des argiles, et quelquefois par des carbonates. Ces fluides sont ensuite soumis à un processus continu d'expulsion progressive, et migrent ainsi vers des formations poreuses et perméables appelées roches réservoirs [1].

Un réservoir est une formation du sous-sol où s'accumulent des hydrocarbures (huile et/ou gaz), confinés dans un piège géologique (barrière imperméable, barrière aquifère, couverture argileuse.....) et soumis à un système de pression et de température. Les principales roches réservoirs sont constituées de grès et/ ou de carbonates. Ce sont des roches sédimentaires formées de débris (minéraux, animaux ou végétaux) ou de précipitations chimiques, stratifiées en lits successifs.

La bonne caractérisation du réservoir est indispensable au bon déroulement de l'ensemble des opérations de mise en exploitation des gisements d'hydrocarbures.

La première étape de la prospection consiste à localiser les gisements, puis à définir les implantations des forages d'exploration. Un contrôle accompagné d'une étude géophysique et géologique de ces sondages est ensuite effectué afin de déterminer les différentes caractéristiques du réservoir. Ces caractéristiques sont intégrées comme données dans des modèles numériques qui permettent l'évaluation des volumes d'hydrocarbures en place, ainsi que les quantités à extraire.

Une fois la découverte confirmée et le taux d'extraction fixé, l'exploitation du gisement est entamée avec le forage des puits de production. A ce niveau, le comportement de la roche réservoir est un élément fondamental qui permet de choisir le type et la forme des outils à utiliser, les paramètres du forage à considérer (poids sur l'outil, vitesse de rotation), et qui permet surtout de vérifier la stabilité ultérieure du puits [2]. Notons que les forages réalisés actuellement sont de plus en plus profonds, et ont des trajectoires de plus en plus complexes (le forage horizontal a été introduit sur le champ de Hassi Messaoud en 1994, et le multi-latéral en 2000), ce qui nécessite une connaissance de plus en plus précise des caractéristiques mécaniques de la roche réservoir.

La dernière étape de l'exploitation est la mise en production du puits, et une fois encore la connaissance des propriétés de la roche est indispensable pour le choix du mécanisme de drainage à adopter et les équipements à utiliser.

Au cours de cette opération, plusieurs phénomènes peuvent se produire, citons par exemple la venue des sables qui apparaît lorsque les puits sont forés dans des roches réservoir faiblement cohérentes. Dans ce cas, une partie de la phase solide est entraînée par l'écoulement des fluides ce qui induit à un engorgement des conduites de production, d'où la nécessité de poser des équipements spéciaux. La connaissance des caractéristiques mécaniques des couches responsables de l'apparition de ce phénomène est donc indispensable afin de prévoir et d'optimiser la pose de ces équipements [3].

Un autre phénomène lié à l'extraction des hydrocarbures peut également avoir des répercussions néfastes sur les installations de la production et sur la production elle-même : c'est le phénomène de compaction et subsidence qui résulte de la réduction du volume poreux des couches souterraines suite à l'extraction des fluides contenus à l'intérieur. La connaissance des caractéristiques mécaniques du réservoir permet d'estimer l'importance de ce phénomène, et par conséquent de prendre les mesures nécessaires [3].

En plus de son rôle dans la résolution des problèmes rencontrés, la bonne connaissance des propriétés mécaniques du réservoir est nécessaire pour la réussite de plusieurs opérations spéciales comme la fracturation hydraulique.

Cette opération s'applique aux puits ayant une faible ou moyenne perméabilité dans le but d'augmenter leur production. Elle consiste à fissurer la roche réservoir par injection d'un fluide sous très forte pression, et à maintenir la fracture ainsi créée ouverte par l'introduction d'un agent de soutènement (par exemple des microbilles de bauxite). Lorsque la pression est relâchée, ces corps qui se sont introduits dans les fissures empêchent ces dernières de se refermer complètement améliorant ainsi le débit recueilli en surface. Avant d'entamer ces opérations, celles-ci sont simulées par un design de simulation qui nécessite la connaissance des propriétés mécaniques de la roche réservoir ainsi que les contraintes qui règnent en place.

En Algérie, les premiers essais de fracturation ont débuté dans les années 60 sur le champ de Hassi Messaoud, puis développés une décennie plus tard par application du programme HMF (Hydraulic Massif Fracturation). Basées essentiellement sur l'expérience de terrain acquise, ces opérations n'ont pas été d'un franc succès et ont vite été abandonnées. Il fallait attendre les années 90 où la fracturation est réapparue sur le champ de Hassi Messaoud, avec cette fois-ci une prise de conscience de l'intérêt de la bonne caractérisation mécanique du réservoir, et de sa relation directe avec le succès ou l'échec de ces opérations.

I.2. METHODES DE CARACTERISATION DE LA ROCHE RESERVOIR

Les caractéristiques de la roche réservoir sont déterminées par deux types d'analyses : des mesures effectuées au laboratoire, et des essais réalisés sur puits.

I.2.1. CARACTERISATION AU LABORATOIRE :

Le comportement de la roche réservoir est influencé par un grand nombre de facteurs : sa composition, son degré de cimentation et d'altération, la quantité et le type des fluides contenus dans ses pores, sa porosité, sa perméabilité, la compressibilité de la matrice et des fluides, la pression et la température dans le réservoir,.....etc. Plusieurs de ces facteurs sont interdépendants, et l'étude de leurs effets séparés et combinés sur le comportement de la roche ne peut être faite qu'au laboratoire, par le biais d'essais contrôlés, effectués sur des échantillons prélevés du fond du réservoir, en simulant au mieux les conditions in situ.

Ces analyses de laboratoire sont effectuées avec une bonne précision et contribuent considérablement à la compréhension du comportement de la roche et à l'application des résultats au terrain. Malheureusement, ces essais nécessitent un temps de préparation, de test et d'interprétation assez long, ce qui dans certains cas, ne peut répondre à des situations critiques où l'urgence d'une prise de décision est primordiale, notamment en cours de forage ou dans des cas particuliers de production. Notons aussi que les échantillons ne sont pas toujours disponibles, particulièrement dans certaines zones friables, où la récupération des carottes est difficile voire impossible.

Afin de suppléer cette carence de données, un autre type de tests est effectué: les mesures enregistrées in situ.

I.2.2. CARACTERISATION IN SITU :

Les mesures sur puits ont été introduites pour la première fois en France (1927) par les frères Schlumberger [4]. Depuis, les moyens mis en œuvre ont nettement progressé, et de nos jours, de nombreux paramètres peuvent être enregistrés.

Ces enregistrements continus en fonction de la profondeur sont connus sous le nom de "diagraphie" ou par le terme américain "log" dans le jargon pétrolier. Ils sont obtenus par des outils appropriés descendus dans le trou de forage au bout d'un câble.

Ces enregistrements permettent de donner aux conditions du trou, un certain nombre de paramètres physiques étroitement reliés aux paramètres géologiques et pétrophysiques utiles à la connaissance des terrains traversés. Ils sont groupés en deux grandes catégories [4] :

- Des paramètres naturels, engendrés spontanément par la formation, qu'il suffit d'enregistrer à l'aide de détecteurs appropriés. A cette catégorie se rattachent la radioactivité naturelle, la température, le diamètre du trou, la déviation,etc.

- Des paramètres naturels qui ne peuvent être mesurés que par l'envoi, par un émetteur approprié, d'un signal dans la formation, et l'enregistrement par récepteur de l'information résultant de l'interaction du signal avec la formation. A cette catégorie appartiennent : la résistivité, la conductivité, la densité de la formation, la vitesse d'ondes acoustiques,...etc.

Une combinaison de ces enregistrements permet de déterminer la saturation en eau et en hydrocarbures, la porosité et le pourcentage d'argile, de faire une approche de la perméabilité et de déterminer la lithologie. Les paramètres mécaniques sont exprimés en fonction des vitesses d'ondes acoustiques (longitudinales et de cisaillement), associées à la valeur de la densité de formation. Dans ce type de tests, les conditions (pression et température) sont bien connues, et ce sont les caractéristiques pétrophysiques et mécaniques des terrains traversés qui sont recherchées.

L'avantage de ce type d'essais réside dans la continuité des enregistrements en fonction de la profondeur, et la rapidité de leur obtention, ce qui constitue l'un des facteurs économiques les plus importants.

Cependant, les résultats sont entachés d'erreurs puisque certaines caractéristiques sont déduites par des méthodes indirectes dans lesquelles d'autres propriétés interviennent, d'où l'utilisation de plusieurs facteurs de correction. Notons aussi qu'il existe d'autres sources d'erreurs liées aux conditions d'enregistrement comme la présence du fluide de forage qui entoure l'outil et les phénomènes d'invasion (pénétration du fluide de forage dans la formation) qui conduisent à la contamination de la roche et par conséquent à la modification de ses propriétés initiales.

Il apparaît clairement en examinant les avantages et inconvénients que présentent les essais effectués au laboratoire et ceux réalisés in situ, qu'ils se complètent, et qu'il est nécessaire d'effectuer les deux mesures pour mieux caractériser le réservoir tout en respectant les deux facteurs : temps et qualité des résultats.

I.3. CARACTERISATION MECANIQUE DE LA ROCHE RESERVOIR

La caractérisation mécanique de la roche réservoir est effectuée par deux types d'essais :

- des essais statiques qui consistent à écraser des échantillons pris dans le cœur de carottes extraites du fond du puits. Il s'agit dans ce cas d'essais dits "destructifs", et les caractéristiques ainsi obtenues sont appelées caractéristiques mécaniques statiques.
- des essais dynamiques qui permettent de mesurer la résistance de la roche sans avoir à l'écraser. Ils portent usuellement le nom d'essais "non destructifs", et l'une des méthodes les plus utilisées dans ce domaine est l'interprétation des tests de propagation d'ondes acoustiques. Ce test est effectué soit au laboratoire soit in situ, et les paramètres obtenus sont des paramètres mécaniques dynamiques.

Pour notre étude, nous avons déterminé les paramètres mécaniques de la roche réservoir de Hassi Messaoud par le biais d'essais dynamiques se basant sur une propagation d'ondes acoustiques. Afin de rappeler certaines définitions importantes, et expliquer l'origine de certaines formules utilisées au cours de notre travail, nous présentons dans ce qui suit quelques notions fondamentales sur la propagation des ondes acoustiques dans les milieux poreux.

I.4. CARACTERISATION MECANIQUE DYNAMIQUE DE LA ROCHE RESERVOIR

I.4.1. Notion de propagation d'ondes :

Localement, nous pouvons supposer que le milieu est élastique, linéaire, homogène et isotrope.

a. Propagation des ondes dans un milieu élastique linéaire isotrope :

La loi de comportement élastique linéaire d'un milieu isotrope est donnée par la loi de Hooke [5]:

$$\sigma_{ij} = \lambda \operatorname{tr} \varepsilon \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (\text{I.1})$$

où λ et G sont les coefficients de Lamé, G étant le module de cisaillement, le symbole δ_{ij} est le

$$\text{symbole de Kronecker : } \begin{cases} \delta_{ij} = 0 & i \neq j \\ \delta_{ij} = 1 & i = j \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

Dans le cadre des petits déplacements, le tenseur des déformations s'écrit :

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} (u_{i,k} + u_{k,i}) \quad (\text{I.3})$$

et la variation relative volumique Θ vaut :

$$\Theta = \operatorname{tr} \varepsilon = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III} \quad (\text{I.4})$$

où $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$ et ε_{III} représentent les allongements relatifs dans les directions principales et sont appelés les dilatations principales [5].

La trace du tenseur des déformations est un invariant tensoriel. En raison de la définition (I.3), nous avons donc :

$$\Theta = \operatorname{div} u \quad (\text{I.5})$$

Les équations d'équilibre sont données par :

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (\text{I.6})$$

où ρ est la masse volumique, et u le déplacement.

Reportant (I.3) dans (I.1), puis le résultat de ce report dans les équations d'équilibre (I.6), nous obtenons les équations du mouvement d'une onde dans un matériau isotrope :

$$(\lambda + 2G)[\text{grad}(\text{div } u)] - G[\text{rot}(\text{rot } u)] = \rho \ddot{u} \quad (\text{I.7})$$

Considérons alors des mouvements irrotationnels ($\text{rot } u = 0$) définis par un potentiel scalaire Φ tel que :

$$u = \text{grad } \Phi \quad (\text{I.8})$$

Cette équation reportée dans (I.7), et en rappelant que :

$$\begin{cases} \text{div}(\text{grad } \Phi) = \nabla^2 \Phi \\ \text{et ainsi} \\ \text{div } u = \Theta = \nabla^2 \Phi \end{cases}$$

nous trouvons :

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{V_p^2} \Phi \quad (\text{I.9})$$

$$\boxed{V_p = \left(\frac{\lambda + 2G}{\rho} \right)^{1/2}} \quad (\text{I.10})$$

L'équation (I.9) définit des ondes se propageant à la vitesse V_p . Ce sont des ondes de dilatation (ou de compression) car elles concernent la propagation de la dilatation volumique [5].

Appliquant l'opérateur Laplacien ∇^2 à l'équation (I.7) pour u vérifiant (I.8), et en raison de la définition (I.5), nous obtenons :

$$\nabla^2 \Theta = \frac{1}{V_p^2} \ddot{\Theta} \quad (\text{I.11})$$

Ces ondes sont aussi appelées **ondes P**, P correspondant à **primaires** car ce sont les ondes les plus rapides pouvant se propager dans un milieu linéaire isotrope. Dans ce type d'ondes, les particules oscillent parallèlement à la direction de propagation.

Considérons maintenant des mouvements définis par un potentiel vecteur Ψ tel que :

$$u = \text{rot } \Psi \quad (\text{I.12})$$

Ces mouvements correspondent à des mouvements sans changement de volume car :

$$\Theta = \text{div}(\text{rot } \Psi) = 0 \quad (\text{I.13})$$

Reportant (I.12) dans (I.7), on obtient :

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{V_s^2} \ddot{\Psi} \quad (\text{I.14})$$

$$\boxed{V_s = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{I.15})$$

L'équation (I.14) définit des ondes se propageant à la vitesse V_s [5]. Ce sont des ondes de cisaillement. Elles sont appelées **ondes S**, S pour **secondaires** car elles sont plus lentes que les ondes P. Ici, les particules oscillent perpendiculairement à la direction de propagation.

Le module de cisaillement G est alors exprimé en fonction de la vitesse de propagation des ondes S par la formule :

$$G = \rho V_s^2 \quad (\text{I.16})$$

b. Expression du module de Young dynamique en fonction des vitesses des ondes acoustiques :

D'après l'équation (I.10), nous avons la relation :

$$\rho V_p^2 = \lambda + 2G \quad (\text{I.17})$$

Rappelons que le coefficient de Lamé λ est relié aux modules de Young et de cisaillement par la formule suivante :

$$\lambda = G \cdot \frac{E - 2G}{3G - E} \quad (\text{I.18})$$

Le report de (I.18) dans (I.17) donne l'expression du module de Young dynamique en fonction des vitesses des ondes acoustiques associées à la densité du matériau :

$$E = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (\text{I.19})$$

I.4.2. Méthodes de transmission des ondes :

Deux méthodes de transmission sont possibles :

a. La méthode par transparence :

Cette méthode nécessite l'utilisation de deux transducteurs : un émetteur et un récepteur. Dans ce cas, deux configurations sont possibles :

- La première consiste à placer les transducteurs sur les deux faces opposées du corps à tester (*fig.I.1 (a)*). Les vitesses de propagation des ondes P et S sont données par les formules :

$$\begin{cases} V_P = d.t_P^{-1} \\ V_S = d.t_S^{-1} \end{cases} \quad (I.20)$$

où :

d : est la distance entre l'émetteur et le récepteur
 t_P , t_S : sont les temps mis respectivement par les ondes P et S pour parcourir la distance d .

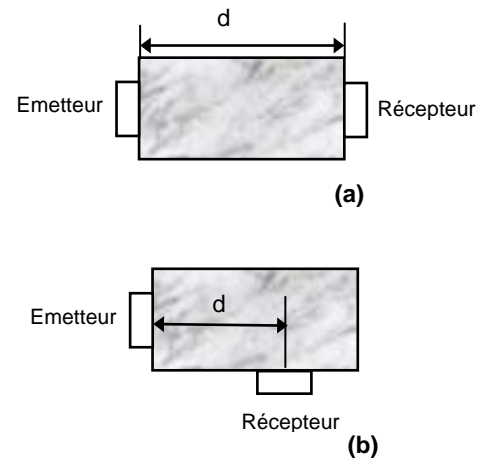


Fig. I.1: Transmission par transparence

- La seconde configuration consiste à placer les transducteurs sur deux faces non opposées du corps à tester (*fig.I.1 (b)*). En faisant varier la distance d entre l'émetteur et le récepteur, il est possible d'obtenir des courbes donnant le temps de parcours en fonction de la distance pour les deux ondes P et S. Les vitesses de propagation de ondes sont alors déduites à partir de la pente de ces courbes.

b. La méthode par échos :

Dans cette méthode, les deux transducteurs sont placés sur une même face, ou peuvent même être confondus puisque certains dispositifs de génération d'ondes sont réversibles (*fig.I.2*).

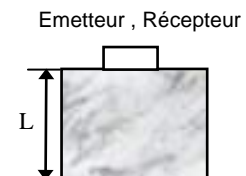


Fig. I.2: Transmission par échos

Dans ce cas, les vitesses de propagation des ondes P et S sont données par les formules :

$$\begin{cases} V_P = 2L.t_P^{-1} \\ V_S = 2L.t_S^{-1} \end{cases} \quad (I.21)$$

où: t_P , t_S sont les temps mis respectivement par les ondes P et S pour parcourir la distance $2L$.

CHAPITRE II

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la mesure du temps de propagation d'une onde acoustique dans une roche permet de remonter à ses propriétés mécaniques dynamiques. De ce fait, l'étude de l'influence de certains paramètres sur les propriétés mécaniques dynamiques de la roche revient à étudier l'influence de ces mêmes paramètres sur les vitesses de propagation des ondes acoustiques.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques travaux expérimentaux qui traitent de l'influence de la pression, la saturation, la température, la fréquence, la porosité et le contenu en argile sur les vitesses des ondes de compression P et de cisaillement S dans différents types de roche. Nous donnerons ensuite quelques corrélations établies à partir des mesures expérimentales et utilisées en pratique par les pétroliers afin d'évaluer certaines propriétés de la roche réservoir.

II.1. INFLUENCE DE QUELQUES CARACTERISTIQUES SUR LES PROPRIETES ACOUSTIQUES DU MILIEU POREUX

Les propriétés acoustiques d'un milieu poreux varient en fonction de plusieurs paramètres, les plus importants étant : la pression à laquelle il est soumis, sa porosité, la nature du fluide contenu dans ses pores et son degré de saturation, sa nature minéralogique et son contenu en argile, en plus de quelques paramètres relatifs aux conditions d'essai comme la fréquence.

Les premières mesures systématiques des variations des propriétés acoustiques des roches datent des années 50-60. A cette époque, de nombreux chercheurs se sont intéressés à la variation des vitesses des ondes acoustiques dans les milieux poreux en fonction de quelques paramètres comme la porosité, la saturation ou la pression. Durant les années 60, l'intérêt pour ce type d'études a baissé, mais un renouveau s'est fait jour dès le début des années 70 avec le développement de l'électronique et de l'informatique qui a permis d'entrevoir de nouvelles perspectives à l'acoustique des milieux poreux.

Nous donnons dans ce qui suit les principaux résultats expérimentaux obtenus dans ce sens, en expliquant les phénomènes responsables de certains comportements. L'intérêt principal de ces essais est la maîtrise de la mesure des caractéristiques acoustiques et par conséquent mécaniques dynamiques, et la compréhension de l'effet de divers paramètres sur les mesures.

II.1.1. INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LA VITESSE DES ONDES ACOUSTIQUES:

Dans la nature, les roches sont soumises à des contraintes importantes : il est donc essentiel de connaître le rôle de la pression sur les paramètres acoustiques pour bien comprendre les phénomènes observés.

Dans cette partie, nous examinerons les effets de différents types de pression sur la vitesse, à savoir : la pression de confinement P_C (pression extérieure à laquelle est soumis l'échantillon), la pression de pore P_P (pression du fluide à l'intérieur des pores) et la pression différentielle ou pression effective P_{eff} (différence entre la pression de confinement et la pression de pore).

a.) La pression effective :

L'influence de la pression effective sur les mesures acoustiques a largement été abordée dans la littérature. *Wyllie, Gregory et Gardner* (1958) [7] qui ont réalisé des essais sur des grès de Béréa saturés, ont montré que la vitesse des ondes compressionnelles (ondes P) augmente avec la pression effective (fig.II.3).

En 1963, *Tuman et Alm* [8] ont testé quatre échantillons de grès, et ils ont constaté qu'une augmentation a effectivement lieu dans le cas des ondes de compression, et aussi dans le cas des ondes de cisaillement.

Plusieurs travaux expérimentaux menés par d'autres auteurs sur plusieurs types de roches viennent confirmer cette observation (King 1966 [9]; Nur et Simmons 1969 [10]; Nur et Murphy 1981 [11]; Han, Nur et Morgan 1986 [12]; Yu, Vusoff et Durney 1991 [13]; Freund 1992 [14]; Jones 1995 [15]; Best 1997 [16]; Khaksar et al 1997 [17]). Certains ont également constaté que le taux d'augmentation de la vitesse dépend énormément de la nature de la roche étudiée.

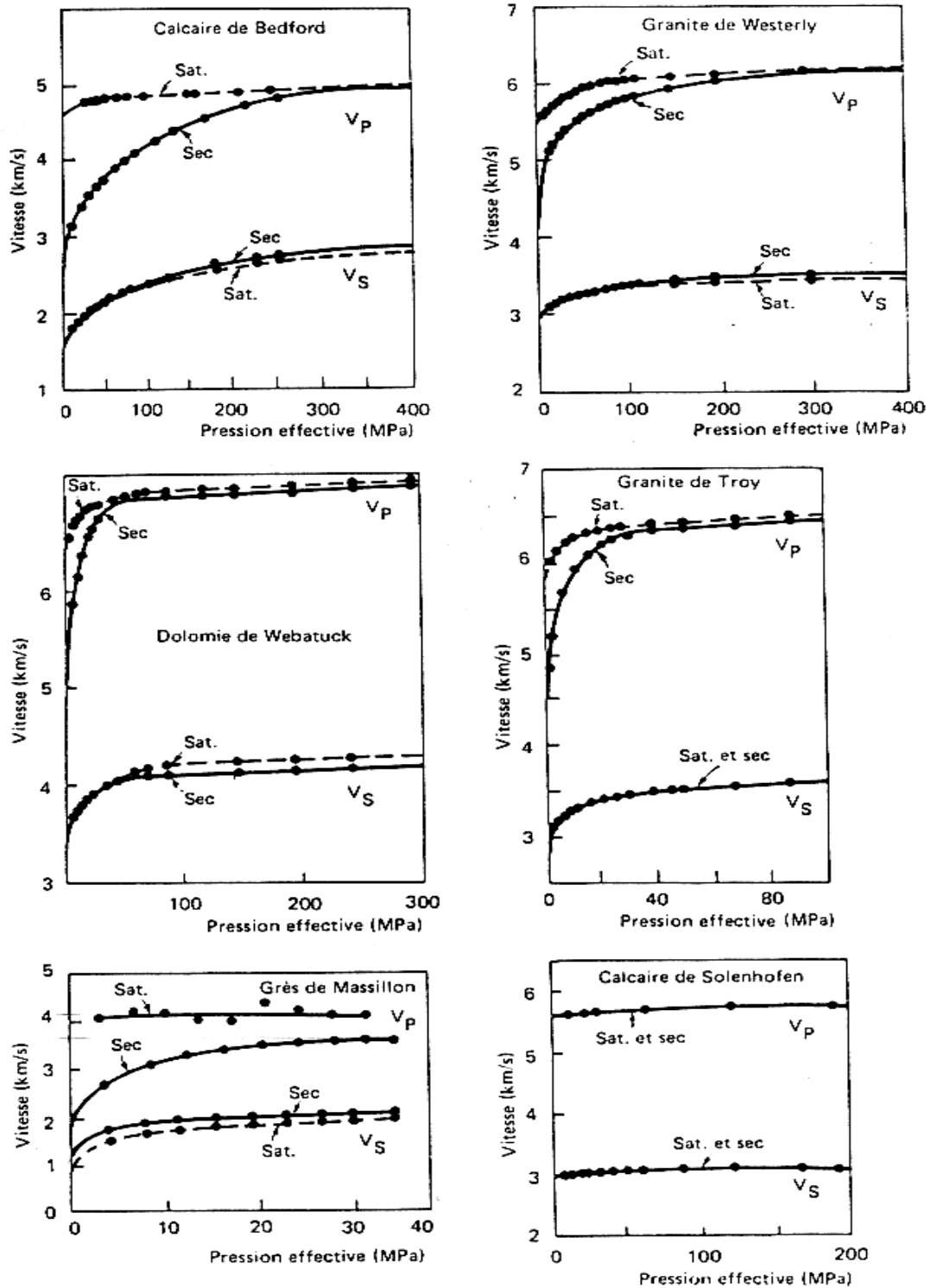


Fig. II.1 : Influence de la pression effective sur les vitesses (d'après Nur et Murphy, 1981)

Nous illustrons cette constatation par les travaux de *Nur* et *Murphy* [11] qui ont testé un calcaire de Bedford, Granite de Westerly, Dolomie de Weabatusck, Granite de Troy, calcaire de Solenhofen et Grès de Massillon (fig.II.1).

Selon leurs résultats, la vitesse n'augmente pratiquement pas dans le cas du calcaire de Solenhofen, mais elle passe de 4Km/s à 6Km/s pour les ondes P dans le cas du Granite de Westerly sec.

D'autre part, ils ont remarqué que cette augmentation dans le cas des ondes P est bien inférieure pour un échantillon saturé par rapport à un échantillon sec, et ceci pour tous les échantillons sauf le Calcaire de Solenhofen. Par contre, la vitesse des ondes S pour les mêmes échantillons est quasi insensible à la présence d'eau dans le milieu. Ils ont également noté l'existence d'une pression limite au delà de laquelle la vitesse reste relativement constante.

Une autre observation a été notée suite à un examen de la forme et la distribution de l'espace poreux et des fissures existants à l'intérieur de la matrice rocheuse. Ils ont conclu que l'effet de la pression effective est directement lié à la quantité de fissures existantes à l'intérieur de l'échantillon. Ainsi, l'augmentation de vitesse avec la pression provient de la fermeture des fissures, cette fermeture se traduisant par une plus grande rigidité du matériau sous pression (c'est à dire une augmentation du module élastique correspondant).

b.) Pression de pore et pression de confinement :

Des travaux effectués dans ce sens montrent qu'en première approximation, le paramètre qui affecte le plus les mesures acoustiques est la pression effective.

D'après les résultats de *Jones* (1983) [18] présentés sur la fig.II.2, à pression effective donnée, plus la pression de pore est forte (c'est à dire plus la pression de confinement est élevée), plus la vitesse est élevée.

Mais la différence entre les courbes vitesse/ pression effective pour le cas où la pression de pore est nulle et celui où la pression de confinement est constante, est très faible et tombe dans de nombreux cas dans les limites de précision de l'expérience .

La fig.II.3 montre l'augmentation de vitesse en fonction de la pression de confinement pour différentes pressions de pore : les conclusions générales sont les mêmes que pour les variation de vitesse en fonction de la pression effective.

On constate aussi qu'à pression de confinement donnée, la vitesse est supérieure pour une faible pression de pore à celle obtenue pour une forte pression de pore : il s'agit simplement de l'augmentation de vitesse avec la pression effective, comme nous l'avons déjà mentionné.

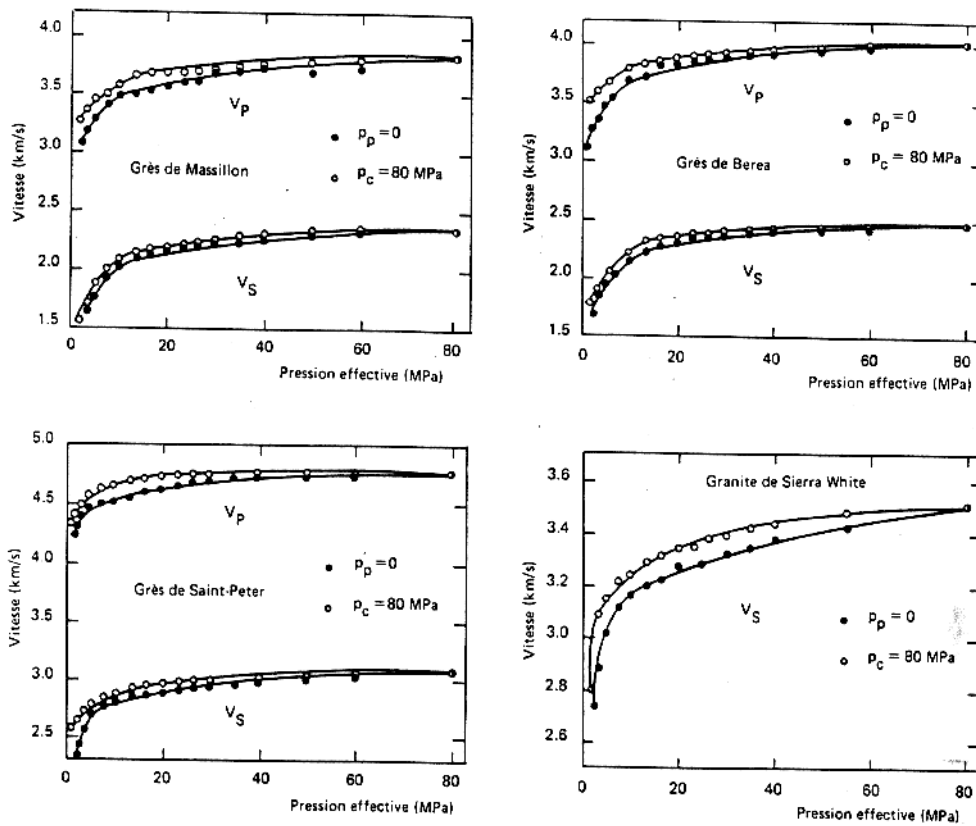


Fig. II.2 : Relations vitesses/ pression effective pour le cas pression de pore nulle ($P_p=0$) et pression de confinement constante ($P_c=80$ MPa) (mesures ultrasoniques- d'après Jones ,1983)

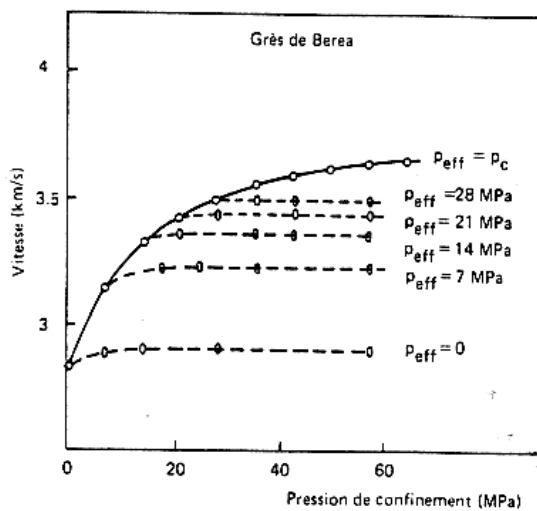


Fig.II.3 : Vitesses des ondes de compression dans un échantillon de grès en fonction de la pression de confinement et de la pression effective (mesures ultrasoniques) (d'après Wyllie et al., 1958)

II.1.2. INFLUENCE DE LA SATURATION SUR LA VITESSE :

Les milieux poreux naturels sont toujours saturés de fluides, il est donc important de connaître l'influence de ces fluides sur les propriétés acoustiques.

En 1980, *Nur et al* [19] ont effectué des mesures de vitesse en fonction de la pression pour le grès de Massillon sec, partiellement et totalement saturé. Ils ont constaté que pour les ondes P, la vitesse à saturation partielle est inférieure à la vitesse à sec, elle même inférieure à la vitesse à saturation totale (fig.II.4).

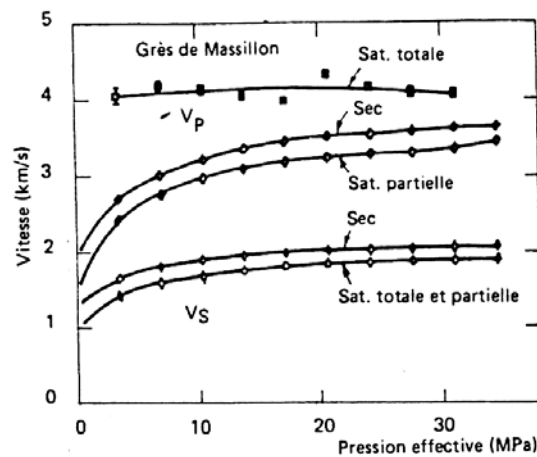


Fig.II.4 : Relation vitesse/ saturation en eau pour du grès de Massillon en fonction de la pression effective (d'après Nur et al., 1980)

Afin d'expliquer ce résultat, rappelons que toute vitesse V peut s'exprimer sous la forme :

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{II.1})$$

où E est le module élastique, et ρ la masse volumique, et que pour un ρ constant, une augmentation du module élastique implique une augmentation de vitesse.

Donc, pour les ondes P et pour des pores sphériques, le seul effet dû à l'introduction d'eau dans l'échantillon initialement sec consiste tout d'abord en une augmentation de densité, d'où une diminution de la vitesse. Par contre, quand la saturation totale est atteinte, les pores deviennent plus difficiles à comprimer, ce qui augmente la rigidité de l'échantillon E et par suite la vitesse [5].

Physiquement, un échantillon sec est beaucoup moins rigide, à pression donnée, qu'un échantillon saturé, car la compressibilité de l'eau s'oppose à la pression et augmente le module élastique [5].

En ce qui concerne les ondes de cisaillement, qui ne se propagent pas dans les liquides, l'addition d'eau à l'intérieur de l'échantillon ne change quasiment rien, et les vitesses pour les échantillons secs ou saturés sont les mêmes aux effets de densité près : les échantillons saturés ont des vitesses légèrement inférieure aux échantillons secs [5].

D'autres travaux menés par *Nur et Murphy* en 1981 [11] (fig.II.5), montrent que dans le cas des roches ayant une faible porosité, la vitesse à sec est inférieure à la vitesse à saturation partielle, elle même inférieure à la vitesse à saturation totale.

Dans ce cas, la porosité est trop faible pour que l'effet de densité soit supérieur à l'effet de rigidification de la matrice.

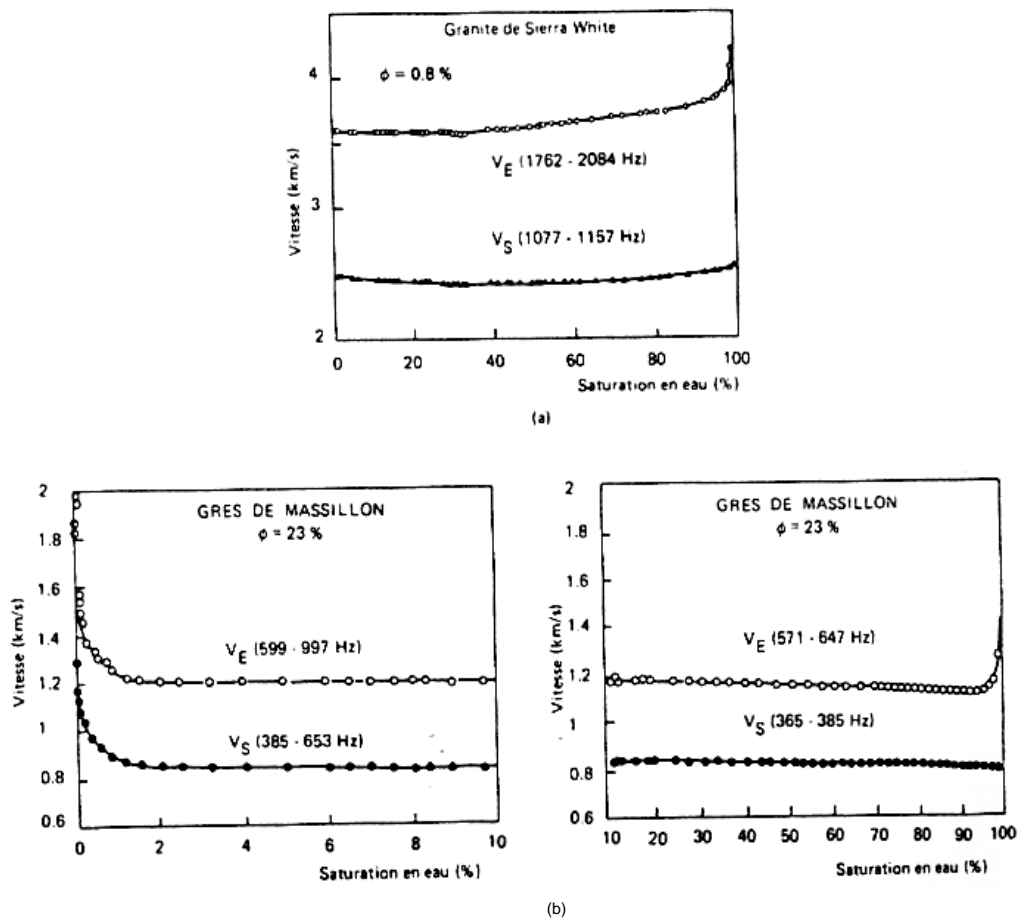


Fig. II.5 : Relation vitesse/ saturation en eau pour divers matériaux
Courbes (a) et (b) d'après Murphy, 1981.

II.1.3. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA VITESSE :

L'enfouissement des roches dans les bassins sédimentaires fait qu'elles sont, non seulement soumises à des effets de pression, mais aussi à des effets de température.

Il a été constaté que la vitesse varie peu avec la température. Par exemple, dans le quartz, elle diminue de 0.4% quand la température varie de 100°C. [5]

Il est donc clair que la température influe peu de façon intrinsèque sur les vitesses, et ce sera un certain nombre de facteurs extrinsèques qui font varier la vitesse avec la température. Par exemple dans le cas des roches sédimentaires, la variation est attribuée à l'effet de la viscosité du fluide se trouvant à l'intérieur des pores. Pour étudier cette influence, des essais sont réalisés en modifiant la viscosité par chauffage de l'échantillon.

Les effets de viscosité sont encore mal connus, mais le peu de travaux qui ont été réalisés dans ce sens ont montré qu'en général, la vitesse augmente quand la viscosité du fluide saturant augmente.

II.1.4. INFLUENCE DE LA FREQUENCE SUR LA VITESSE :

En 1983, *Winkler* [20] a observé en effectuant des tests de laboratoire sur le grès de Massillon sec et saturé qu'il y a des effets dus à la diffraction dans le cas où les hautes fréquences sont utilisées (fig.II.6). Les résultats ont montré que la vitesse diminue avec l'augmentation de la fréquence : ceci a été expliqué par le fait que les ondes à très hautes fréquences sont diffractées et parcourent donc un trajet plus long, et ainsi la vitesse calculée sur la base d'un trajet direct est diminuée artificiellement. Par contre, les fréquences les plus basses ne sont pas (ou peu) diffractées, et leur vitesse est bien la bonne.

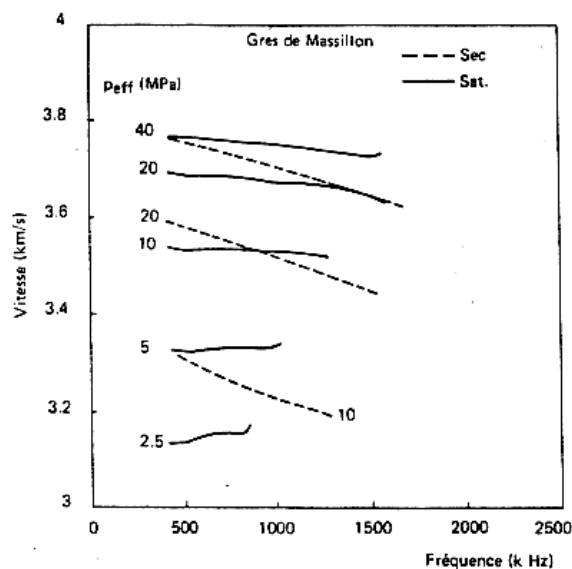


Fig. II.6 : Influence de la fréquence sur la vitesse compressive dans le grès de Massillon sec et saturé (d'après Winkler, 1983)

II.1.5. INFLUENCE DE LA POROSITE SUR LES VITESSES :

La variation de la vitesse des ondes acoustiques en fonction des propriétés pétrophysiques a été abordée par plusieurs chercheurs.

Fourmaintrau (1975) [21] trouve en effectuant des essais sur plusieurs types de roches sèches, que le temps de transit des ondes longitudinales à travers les échantillons augmente quand la porosité augmente, ce qui signifie que la vitesse décroît avec l'augmentation de la porosité. Il note également que la vitesse des ondes longitudinales est une fonction linéaire de la porosité totale.

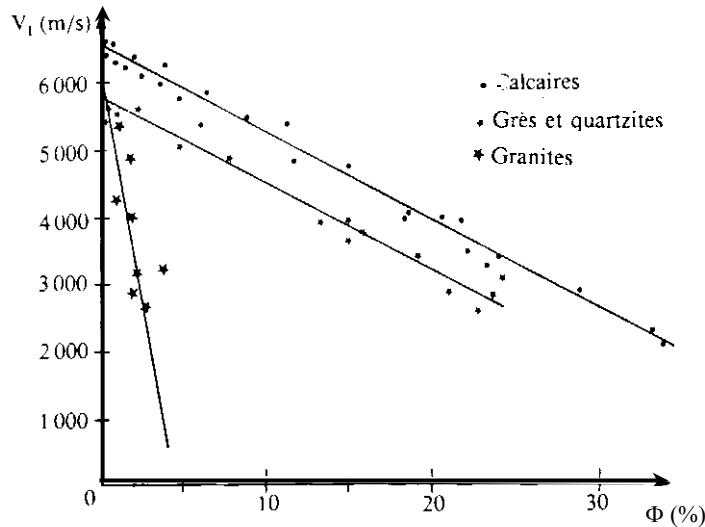


Fig. II.7 : Relation entre la porosité et la vitesse des ondes longitudinales (d'après *Fourmaintrau*, 1975)

En 1985, *Bourbié et Zinszner* [22] effectuent des mesures sur un ensemble d'échantillons de grès de Fontainebleau saturés, ayant des porosités variant entre 2 et 29%. Les résultats des mesures effectuées sous pression atmosphérique puis sous une contrainte uniaxiale de 5MPa montrent que la vitesse des ondes de compression diminue avec l'augmentation de la porosité.

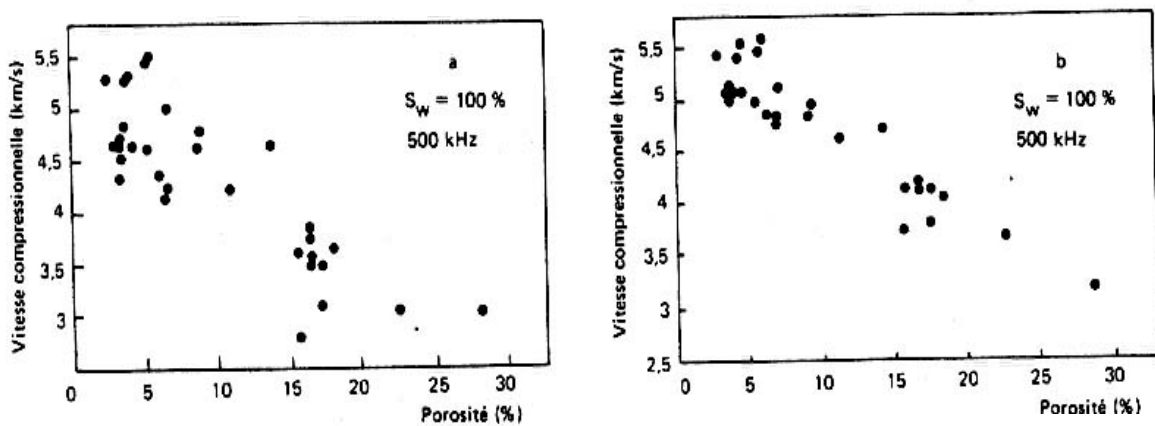


Fig. II.8 : Relation vitesse compressiionnelle - porosité dans les grès de Fontainebleau (d'après *Bourbié et Zinszner*, 1985).

- a. Pression atmosphérique.
- b. Contrainte uniaxiale de 5MPa.

D'autres tests réalisés par un groupe de chercheurs de la compagnie italienne AGIP en 1994 [23], sur une trentaine d'échantillons saturés extraits dans le bassin Adriatique nord, et ayant des porosités comprises entre 15 et 40%, montrent que la diminution de vitesse avec l'augmentation de la porosité a également lieu dans le cas des ondes de cisaillement (fig. II.9).

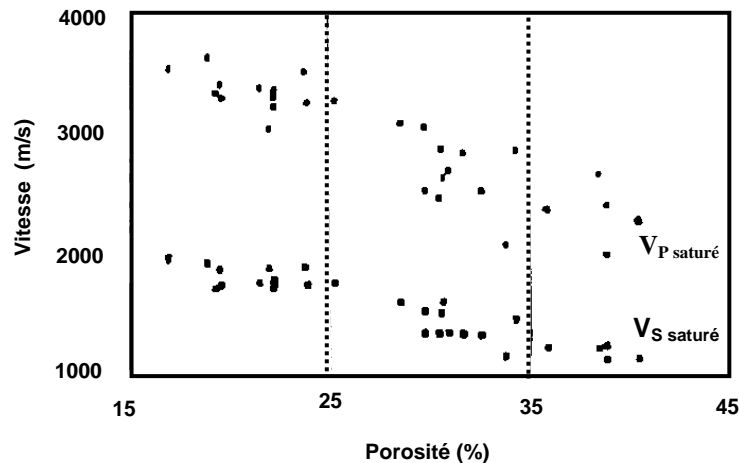


Fig.II.9 : Vitesses des ondes P et S en fonction de la porosité.
Mesures de laboratoire- échantillons saturés.

Cette augmentation de vitesse des ondes acoustiques notée avec la diminution de la porosité s'explique par le fait que le milieu devient de plus en plus rigide quand la porosité décroît, et les vitesses des ondes P et S ont ainsi tendance à se rapprocher des vitesses du solide sans porosité.

II.1.6. INFLUENCE DU CONTENU EN ARGILE SUR LES VITESSES :

Plusieurs recherches ont montré que la présence des minéraux argileux dans la matrice rocheuse, même en petites quantités, affecte considérablement les mesures acoustiques.

De Martini et al en 1976 [24], *Toshaya et Nur* en 1982 [25], *Kowallis et al* en 1983 [26], puis *Climentos et Mc Cann* en 1990 [27], qui ont effectué des mesures acoustiques sur des échantillons de différents types de roches, saturés en eau (entre autres des grès argileux), ont montré que la vitesse des ondes compressionnelles et de cisaillement a tendance à diminuer avec l'augmentation du pourcentage d'argile dans les échantillons.

Toshaya et Nur [25] observent également que la structure des pores ainsi que la distribution des particules argileuses dans la matrice rocheuse jouent un rôle très important dans la réduction de la vitesse des ondes P dans les grès argileux.

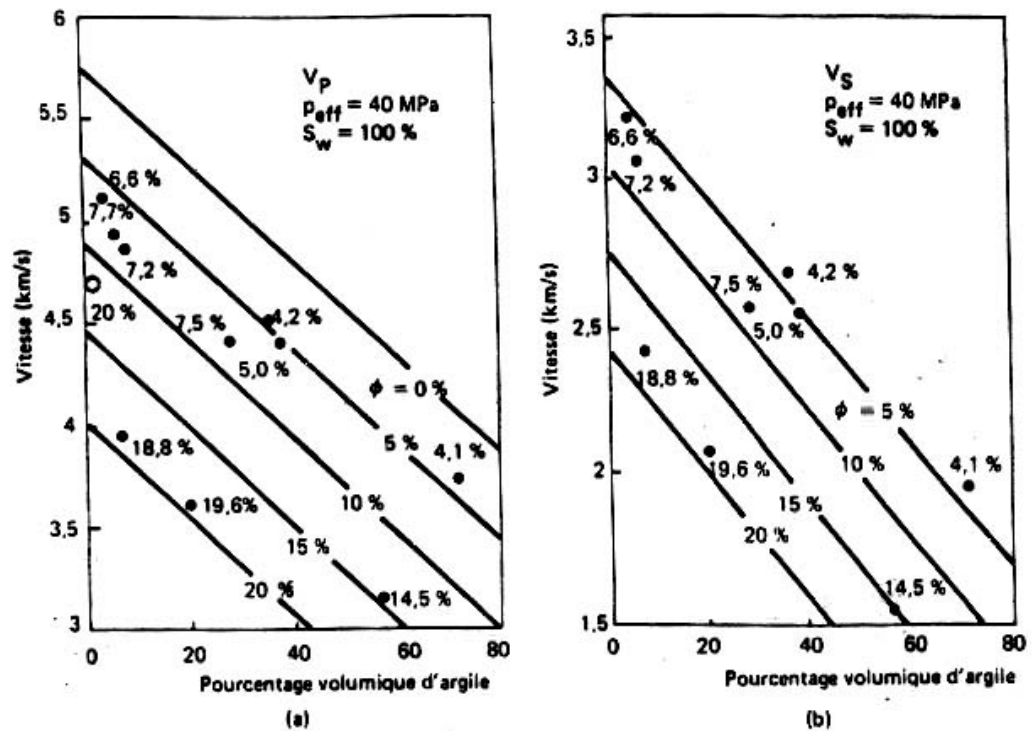


Fig.II.10 : Relation vitesse -teneur en argile en fonction de la porosité pour divers échantillons saturés.
 a. Vitesse compressionnelle (d'après Toshaya et Nur, 1982).
 b. Vitesse de cisaillement (d'après Toshaya, 1982).

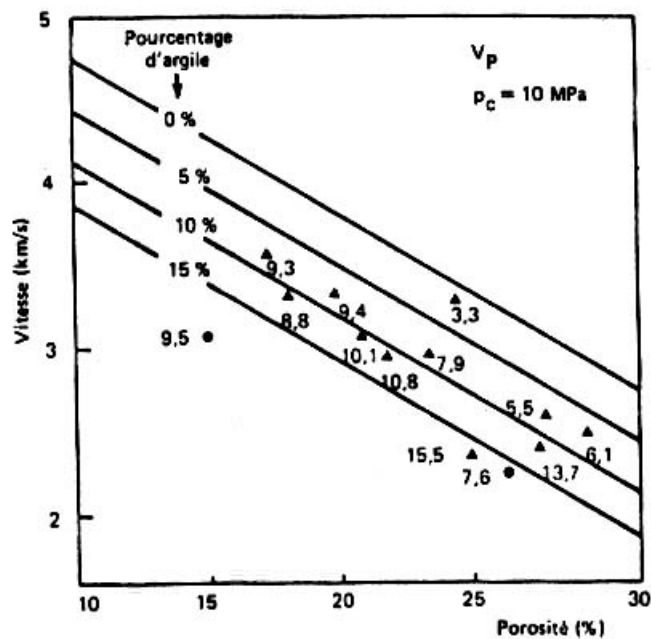


Fig.II.11 : Relation vitesse compressionnelle - teneur en argile en fonction de la porosité pour divers échantillons secs de grès (d'après Kowallis et al, 1983).

Très récemment, *Khaksar et al* (1999) [28] se sont particulièrement intéressés à l'effet de la présence des argiles sur le taux de variation de la vitesse en fonction de la pression effective. Ils ont noté qu'il faut analyser non seulement le pourcentage total des argiles, mais également leur répartition au sein de la matrice rocheuse.

RESUME :

Les travaux présentés dans cet éventail bibliographique mènent aux conclusions suivantes :

- La vitesse croît avec la pression de confinement et la pression effective. Le paramètre fondamental de pression est la pression effective ou différentielle, égale à la différence entre pression de confinement et pression de pore.
- L'effet de la saturation sur les vitesses est fonction de la porosité de la roche.
- Le rôle de la température est faible. Une augmentation de 100°C de la température entraîne une diminution de vitesse de quelques pour cents (notons que la température dans le réservoir de Hassi Messaoud est de l'ordre de 150°C).
- La vitesse diminue avec l'augmentation de la porosité.
- La vitesse diminue avec l'augmentation du pourcentage d'argile dans la matrice rocheuse.
- Les vitesses varient assez peu avec la fréquence si l'atténuation n'est pas trop forte.

II.2. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS ACOUSTIQUES DE LABORATOIRE ET DE DIAGRAPHIE

La comparaison entre les résultats enregistrés in situ par la diagraphie sonore (définie en III.2.2) et ceux obtenus au laboratoire par essais dynamiques ultrasoniques est délicate. Les valeurs obtenues par les deux méthodes sont généralement différentes, et cet écart est dû à plusieurs facteurs [29]:

- Les fréquences utilisées au laboratoire sont souvent très différentes des fréquences utilisées in situ. Au laboratoire, elles sont de l'ordre du MHz, par contre, elles sont beaucoup moins importantes in situ (de l'ordre d'une dizaine de KHz).
- Il est difficile de restaurer l'état de contrainte initial de la roche au laboratoire, puisque les valeurs des contraintes horizontales qui règnent in situ sont inconnues. De ce fait, la roche au laboratoire est souvent soumise à un chargement hydrostatique ou biaxial alors qu'elle était initialement soumise à un état de contrainte triaxial.
- L'effet de l'échelle peu également être considéré comme l'un des facteurs induisant cet écart. La diagraphie sonore est effectuée à l'échelle du mètre, tandis que les mesures de laboratoire sont réalisées à l'échelle de quelques centimètres.

Les travaux réalisés par *Tutuncu* et *Sharma* en 1992 [30] sont parmi les rares recherches effectuées dans ce sens. Ils ont réalisé des essais ultrasoniques au laboratoire sur des échantillons saturés, ayant des porosités comprises entre 3 et 17.5%, contenant un taux d'argile qui varie de

1 à 54.5% et soumis à un chargement biaxial. En comparant les résultats de ces essais aux résultats d'un essai sonique réalisé in situ, ils ont constaté que : dans le cas des grès propres (faible taux d'argile), les vitesses des ondes P et des ondes S mesurées au laboratoire sont supérieures aux valeurs déterminées in situ (fig.II.12).

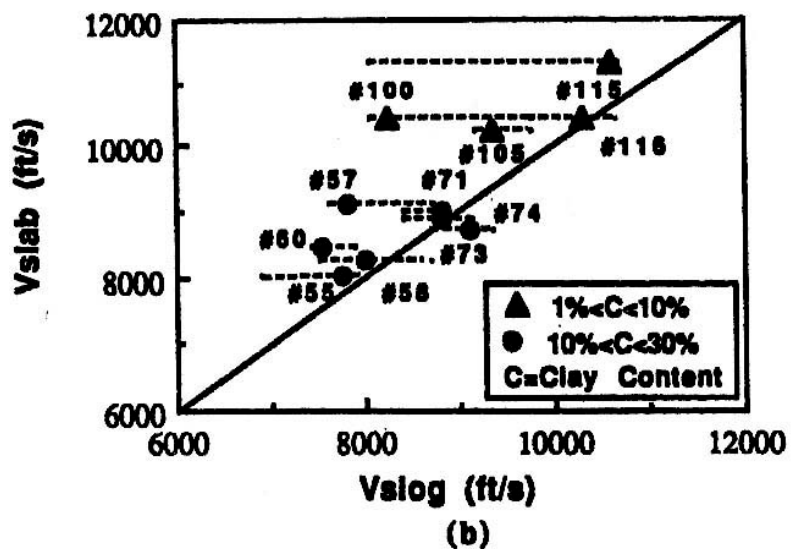
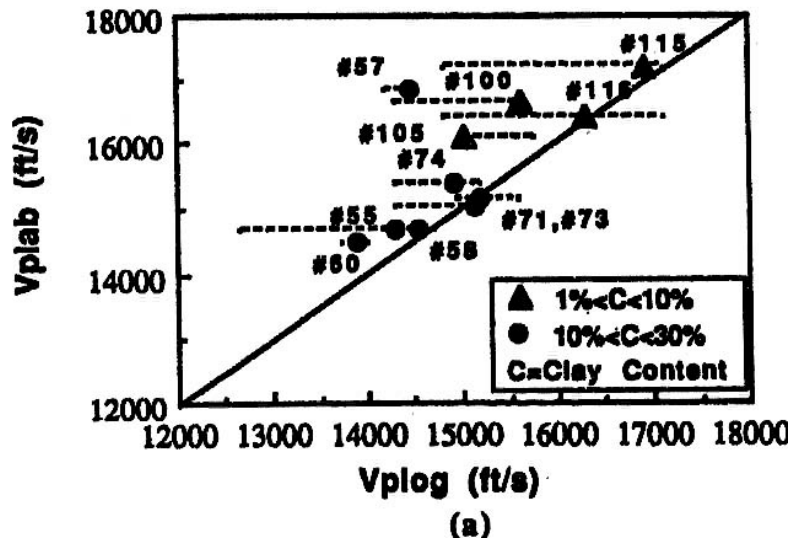


Fig.II.12 Vitesses des ondes ultrasoniques obtenues au laboratoire en fonction des vitesses des ondes acoustiques obtenues in situ (d'après Tutuncu et Sharma, 1992)

II.3. FORMULES EMPIRIQUES UTILISEES DANS LE DOMAINE PETROLIER

L'absence de modèles théoriques reliant les différentes caractéristiques de la roche a poussé les chercheurs à proposer des formules empiriques, qui permettent d'estimer les propriétés de la roche à partir de quelques caractéristiques mesurées.

La porosité est l'un des premiers paramètres qui ont été reliés aux caractéristiques mécaniques de la roche. Son influence sur les vitesses des ondes acoustiques a été analysée depuis plusieurs années avec plusieurs formules.

Wyllie et al. (1956 [31], 1958 [7], 1962 [32]) qui ont effectué des mesures sur des échantillons de composition minéralogique similaire (des grès et des roches sédimentaires), saturés et soumis à une contrainte suffisante montrent qu'il existe une relation simple entre vitesse et porosité. La relation suivante pour les ondes P est appelée *formule de Wyllie* :

$$\frac{1}{V} = \frac{\Phi}{V_f} + \frac{1-\Phi}{V_r} \quad (\text{II.2})$$

où : Φ est la porosité, V la vitesse de la roche saturée, V_f la vitesse dans le fluide et V_r la vitesse dans la matrice de la roche. De ce fait, il est possible d'obtenir la porosité en connaissant la nature de la roche, le fluide saturant et sa vitesse. Les vitesses de matrice sont données ci dessous pour trois grandes familles de roches (d'après Schlumberger, 1977) [33]

	V_r (m/s)
Grès	5480 - 5950
Calcaires	6400 - 7000
Dolomies	7000 - 7925

Tableau II.2 : Vitesses des ondes dans la matrice rocheuses (d'après Schlumberger 1977)

La formule (II.2) est d'une grande simplicité, mais elle nécessite tout de même de nombreuses précautions dans son utilisation. Il a été constaté que pour les très faibles et très fortes porosités, les vitesses mesurées sont très différentes des vitesses données par l'équation (II.2). De nombreux auteurs ont alors proposé pour ces deux cas des formules de Wyllie modifiées. C'est le cas de Nafe et Drake (1963) [34] , ou plus récemment de Raymer et al (1980) [35]. Ces derniers proposent les relations suivantes :

- Roches consolidées :

$$\Phi < 35\% \quad V = (1 - \Phi)^2 V_r + \Phi V_f \quad (\text{II.3})$$

- Sédiments marins non consolidés :

$$\Phi > 45\% \quad \frac{1}{\rho V^2} = \frac{\Phi}{\rho_f V_f^2} + \frac{1 - \Phi}{\rho_s V_r^2} \quad (\text{II.4})$$

Les formules (II.2) , (II.3) et (II.4) permettent de se faire une idée sur la valeur de la porosité à partir des vitesses. Rappelons que ces formules sont expérimentales empiriques et non des lois physiques, et que l'extrapolation de la porosité à partir de la vitesse doit se faire avec précaution.

Plusieurs auteurs ont ensuite montré que la présence des argiles même en petites quantités influe sensiblement sur les vitesses de propagation des ondes acoustiques dans les roches, d'où la nécessité d'introduire dans les formules l'effet de la présence des argiles.

De Martini et al. en 1976 [24], *Toshaya et Nur* en 1982 [25], puis *Kowallis et al.* en 1983 [26] ont montré qu'il existe des relations pour des échantillons saturés entre vitesses compressionnelles ou de cisaillement, porosité et contenu en argile.

Les relations établies par *Toshaya et Nur* en 1982 et qui relient la porosité Φ et le pourcentage d'argile V_{sh} (en fraction) aux vitesses V_p et V_s sont données ci après :

$$V_p \text{ (Km / s)} = -2.4 V_{sh} - 8.6 \Phi + 5.8 \quad (\text{II.5})$$

$$V_s \text{ (Km / s)} = -2.1 V_{sh} - 6.3 \Phi + 3.7 \quad (\text{II.6})$$

pour une pression effective de 40 MPa.

Ces relations permettent une meilleure estimation des porosités connaissant les vitesses et le contenu moyen en argile. Elles dépendent, bien entendu, de la pression effective appliquée. Enfin, comme les relations précédentes, elles permettent simplement une évaluation d'un paramètre connaissant les deux autres.

En 1989, *Han et al.* [36] ont développé des formules empiriques en combinant des résultats obtenus à partir de mesures de laboratoire effectuées sur plusieurs échantillons de grès saturés en eau. Les vitesses de propagation des ondes P et des ondes S ont été reliées à la porosité, au contenu en argile et à la pression effective appliquée par les relations suivantes :

$$V_p \text{ (Km / s)} = 5.77 - 6.94 \Phi - 1.73 \sqrt{V_{sh}} + 0.446 (P_{\text{eff}} - e^{-16.7 P_{\text{eff}}}) \quad (\text{II.7})$$

$$V_s \text{ (Km / s)} = 3.70 - 4.94 \Phi - 1.57 \sqrt{V_{sh}} + 0.361 (P_{\text{eff}} - e^{-16.7 P_{\text{eff}}}) \quad (\text{II.8})$$

où : Φ est la porosité (en fraction) , V_{sh} est le contenu en argile (en fraction), et P_{eff} la pression effective appliquée (en Kbar).

Ils ont constaté que ces formules donnent des résultats assez satisfaisants. Cependant, ils précisent que les vitesses ainsi obtenues ne sont pas exactes, mais qu'elles peuvent quand même servir pour l'estimation des vitesses des ondes P et S dans le cas où les échantillons ne sont pas disponibles.

En 1999, *Abbas Khaksar, C.M. Griffiths et C. Mc.Cann* [28] se sont particulièrement intéressés à l'influence des propriétés pétrophysiques sur le taux de variation des vitesses acoustiques en fonction de la pression appliquée. Ils ont utilisé une formule préalablement établie par plusieurs auteurs et qui est de la forme :

$$V = A + KP - Be^{-DP} \quad (\text{II.9})$$

où :

P : est la pression de confinement dans le cas d'échantillons secs, et la pression effective dans le cas d'échantillons saturés.

V : est la vitesse de propagation des ondes acoustiques.

Ils ont précisé que A, K, B et D sont des constantes qu'il faut déterminer selon le type de roche étudié. Elles sont déduites à partir d'une analyse statistique effectuée sur des échantillons extraits à partir de la roche à analyser.

II.3.1. CORRELATIONS ETABLIES POUR LA ROCHE RESERVOIR DE HASSI MESSAOUD :

Les formules empiriques citées précédemment ont été développées à partir de mesures effectuées sur des roches extraites dans différents réservoirs. Très peu de tests de laboratoire ont été réalisés sur la roche réservoir de Hassi Messaoud, en particulier les mesures de propagation d'ondes acoustiques. Les premières mesures ultrasoniques réalisées dans le laboratoire de mécanique des roches de Hassi Messaoud ont été effectuées en 1998, sur des échantillons extraits dans la roche réservoir de Hassi Guettar [37], et ceci dans le cadre de l'étude du phénomène d'atténuation.

Le manque de données de laboratoire et l'absence de toute modélisation théorique ont poussé les ingénieurs pétroliers de Hassi Messaoud à établir une corrélation en combinant les résultats obtenus par diagraphie. Cette corrélation établie par *R. Belhaouas et al.* en 1995 [38] relie le module de Young dynamique à la porosité et à la teneur en argile. La formule développée à partir de 1727 points de mesures diagraphiques est donnée ci après :

$$E_{dy} \text{ (MPsi)} = 12.62 - 0.4318\Phi - 0.0994V_{sh} \quad (\text{II.10})$$

où :

E_{dy} : est le module de Young dynamique donné en MPsi.

Φ : est la porosité exprimée en pourcentage.

V_{sh} : est le contenu en argile, exprimé en pourcentage.

N.B : $1\text{GPa} = 147.10^{-3} \text{ MPsi}$.

Afin d'évaluer la contrainte horizontale en place, une deuxième corrélation a été établie en combinant les résultats des essais de diaggraphie avec les résultats d'un essai de micro-fracturation hydraulique. La micro- fracturation hydraulique est un test effectué in situ, et destiné à la détermination de la contrainte horizontale mineure à la profondeur choisie. Pour l'établissement de cette corrélation, la contrainte horizontale in situ a été mesurée en sept points différents. Les valeurs ainsi obtenues ont été comparées avec la valeur ponctuelle du module de Young dynamique et la saturation en huile, et la formule suivante a ainsi été établie :

$$\sigma_h = 5783.3 + 1443.8E_{dy} - 90.97S_0 \quad (\text{II.11})$$

où :

σ_h : est la contrainte minimale horizontale exprimée en Psi.

E_{dy} : est le module de Young dynamique exprimé en Psi.

S_0 : est la saturation en huile exprimée en fraction.

Les formules (II.10) et (II.11) sont actuellement appliquées sur le champ de Hassi Messaoud pour l'estimation du module de Young dynamique et de la contrainte horizontale minimale, ces deux paramètres étant indispensables pour le contrôle et la maîtrise de diverses opérations telles que la fracturation hydraulique.

CHAPITRE III

ETUDE EXPERIMENTALE

Après avoir argumenté le choix du puits sur lequel nous avons travaillé, nous présenterons dans une première partie les essais réalisés in situ, en donnant un aperçu général sur leur principe de fonctionnement.

La seconde partie de ce chapitre concernera les mesures de laboratoire. Nous commencerons par la justification du choix des cotes d'échantillonnage et du type de chargement à adopter, puis nous présenterons les essais destinés à la détermination des caractéristiques pétrophysiques, pétrographiques et mécaniques dynamiques des échantillons, en passant par les mesures destinées au recalage des cotes.

Les essais pétrophysiques et mécaniques dynamiques sont effectuées pour plusieurs niveaux de pression hydrostatique, de telle sorte à montrer l'influence de celle ci sur certaines propriétés de la roche réservoir de Hassi Messaoud.

III.1. CHOIX DU Puits ET DESCRIPTION GEOLOGIQUE

III.1.1. CHOIX DU Puits :

La première étape de notre travail consiste à choisir un puits d'étude. Pour cela, plusieurs facteurs sont pris en considération :

- la disponibilité des données diagraphiques (mesurées in situ).
- le bon état des carottes récupérées à partir de l'opération de carottage.

La prise en compte de ces conditions nous a conduit à sélectionner le puits MD#507, foré en juillet 1999 et situé dans la partie sud du champ de Hassi Messaoud.

III.1.2. DESCRIPTION ET COUPE GEOLOGIQUE :

Sur le champ de Hassi Messaoud, la couche productrice du réservoir est le *Cambrien*¹ situé à 3400m de profondeur, avec une hauteur moyenne de 590m. Celui ci est subdivisé en fonction de la nature pétrophysique, pétrographique et morphologique des terrains en quatre niveaux, qui sont de bas en haut : le *Cambrien R3*, le *Cambrien R2*, le *Cambrien RA* et le *Cambrien RI*.

Le réservoir principal est le *Cambrien RA*, qui a une épaisseur moyenne de 145m. Il est subdivisé en drains de 20 à 30 mètres d'épaisseur moyenne, et chaque drain est caractérisé par des paramètres pétrophysiques, une granulométrie et des constituants pétrographiques relativement constants sur toute l'extension du champ. Ce découpage qui permet de suivre la configuration du réservoir sur l'étendue du gisement est fait comme suit :

- Le Drain D1 constitué de grès grossiers à stratifications obliques et souvent micro conglomératiques.
- L'Inter Drain ID constitué de niveaux plus minces avec une plus grande abondance de niveaux silteux.
- Le Drain D2 constitué de grès grossiers bien classés à stratifications obliques et tubulaires dominantes.
- Le Drain D3 qui correspond à la zone fine médiane du RA à granulométrie très faible, de grès fins avec abondance de passées silteuses.
- Le Drain D4 correspondant à la zone grossière supérieure du RA, il est composé de grès à stratifications obliques et tubulaires.
- Le Drain D5 il correspond au RI , et il est constitué de matériaux plus fins et mieux classés que le RA. Les stratifications horizontales y sont fréquentes.

¹ Cambrien : système de roches formé il y a entre 500 et 600 millions d'années, au début de l'ère paléozoïque dans l'échelle des temps géologiques.

Dans le cas du puits MD#507, le réservoir principal RA est subdivisé comme suit (fig. III.1):

- *Le Drain D5* : situé entre les cotes 3390m et 3420m.
- *Le Drain D3* : situé entre les cotes 3420m et 3444m.
- *Le Drain D2* : situé entre les cotes 3444m et 3468m.
- *L'Inter Drain ID* : situé à 3468m de profondeur.

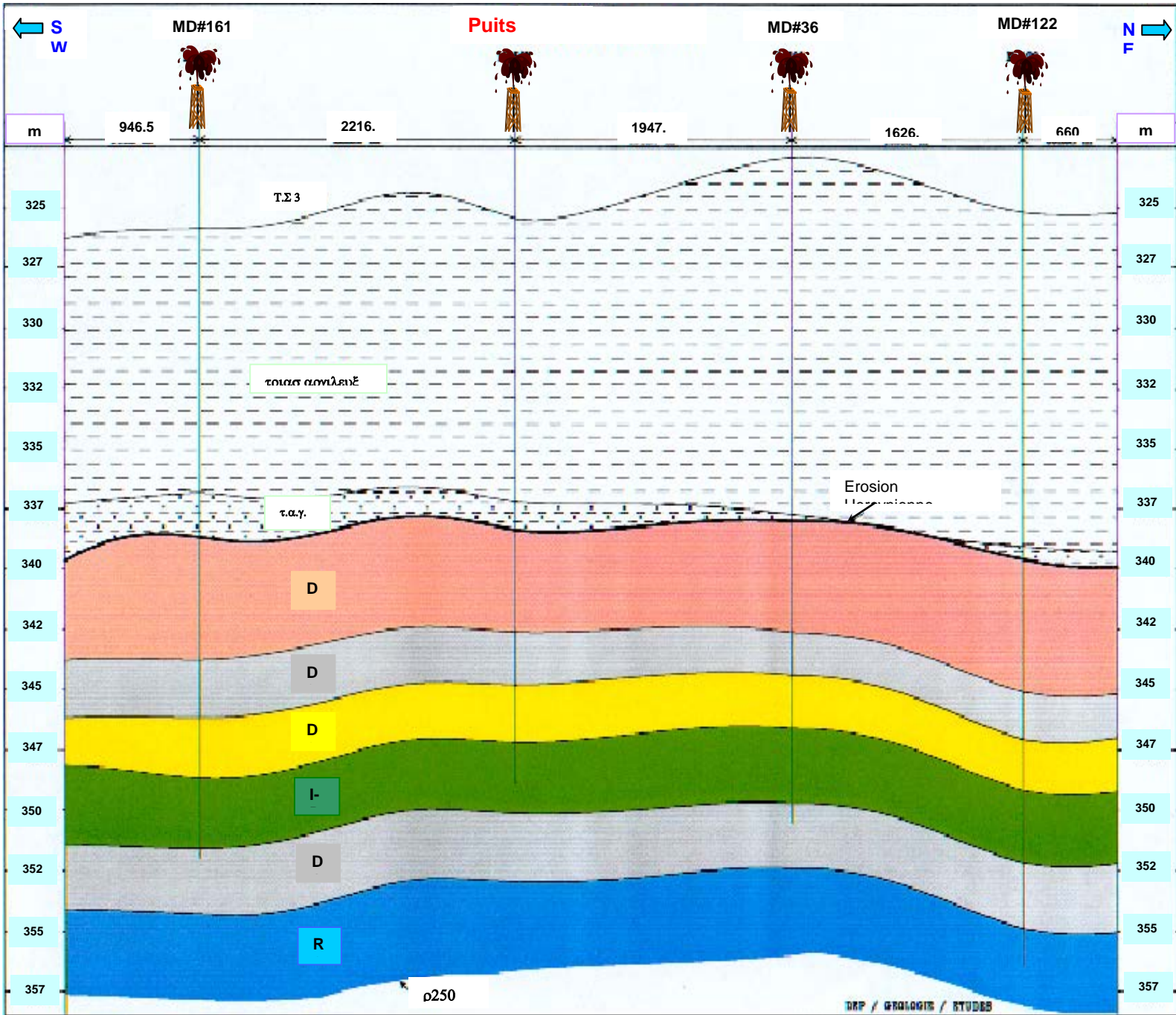
Légende (fig. III.1)

TS 3 : Trias Salifère 3.

TAG : Trias Argilo- Gréseux.

R250 : repère diagraphique qui correspond généralement au plan d'eau.

Fig.III.1 : Coupe géologique



III.2. ESSAIS REALISES IN SITU

III.2.1. GENERALITES:

Les mesures diagaphiques sont obtenues à l'aide de sondes constituées de détecteurs, récepteurs ou électrodes, chargés de recueillir soit des signaux naturels, soit des signaux provoqués par des émetteurs après transit dans la formation.

La transmission de l'information s'effectue par un câble composé classiquement d'un ou plusieurs éléments conducteurs, qui assure ainsi à la fois le lien physique et électrique entre le train de sondes et la surface [39].

Une cartouche électronique gère le transfert des informations entre le fond et la surface. Les signaux issus de la formation sont alors décodés puis convertis en grandeurs physiques à partir des calibrations effectuées au préalable et d'un contrôle périodique du bon fonctionnement de la sonde dans des conditions bien définies. Ils sont stockés sur film photographique et bande magnétique, et généralement représentés sur un écran de contrôle et/ ou sur papier.

La mesure de la profondeur est classiquement obtenue à partir du suivi du défilement du câble (système de roues calibrées et/ ou de marques magnétiques) lors de son enroulement sur le treuil de l'unité de logging durant la remontée du train de sondes, au cours de laquelle se fait le plus généralement l'enregistrement.

Les vitesses de remontée des sondes sont de l'ordre de 600m/h (10m/mn), associées à un pas d'échantillonnage en profondeur classiquement de 1/2 pied (15.24cm) ou de 20cm. Le rayon d'investigation est généralement de l'ordre du mètre. Les sondes pétrolières sont généralement construites pour supporter des températures supérieures à 175°C et des pressions de plus de 20000Psi (\cong 135MPa) susceptibles d'être rencontrées à grandes profondeurs [39].

III.2.2. ESSAIS EFFECTUES SUR LE PUIT MD#507:

Les essais de diagaphie qui ont été effectués sur le puits que nous avons choisis (MD#507) sont :

- Le Gamma ray de fond : qui donne le pourcentage d'argile contenu dans la formation.
- L'essai sonique : qui donne le temps de parcours des ondes longitudinales P et transversales S à travers la formation.
- L'essai Gamma- Gamma : qui donne la densité .
- L'essai de résistivité : qui donne la porosité.
- L'essai qui donne le diamètre du trou sur la hauteur du réservoir.
- Une Imagerie du fond du puits.

Nous présentons dans ce qui suit les essais auxquels nous nous sommes particulièrement intéressée, à savoir : les essais destinés à la détermination de la porosité, le contenu en argile, la densité et les caractéristiques mécaniques dynamiques de la roche réservoir.

A . Détermination de la porosité :

La porosité de la formation n'est pas directement mesurée par les outils de diagrapie. Elle est déterminée à partir de la résistivité, caractéristique physique qui lui est directement liée, et qui peut par contre être directement mesurée par les outils.

La résistivité mesure la plus ou moins grande facilité pour une formation géologique à laisser circuler le courant électrique. Son symbole est R et son unité est l'Ohm.m .

L'inverse de la résistivité est la conductivité électrique, qui caractérise la propriété d'un corps à accepter de laisser passer le courant. Dans le cas des roches sédimentaires, la conductivité est électrolytique, c'est à dire qu'elle est liée à la présence d'eau contenant un sel dissous. Dans notre cas, il s'agit plus particulièrement de l'eau ou des mélanges eau- hydrocarbures qui n'auront une conductivité que si la phase eau est continue.

In situ, les roches renferment généralement des proportions plus ou moins importantes d'eau, contenant elles mêmes des sels en solution en quantités variables, ce qui a pour conséquence de leur conférer une certaine conductivité.

Ainsi, la résistivité d'une roche dépend :

- de la résistivité propre de l'eau envahissant les pores, laquelle est liée au contenu en sels dissous et à la température;
- de la quantité de cette eau dans la roche, donc de la porosité d'une part et de la saturation d'autre part;
- de la lithologie, c'est à dire de la nature et du pourcentage d'argile dans la roche (les argiles sont conductrices parce qu'elles contiennent de l'eau de formation et en raison de leur structure ionique particulière), et exceptionnellement de la nature et du pourcentage des minéraux mineurs conducteurs;
- de la texture de la roche, c'est à dire du mode de répartition des pores, des argiles et des minéraux conducteurs.

▪ Principe de mesure de la résistivité :

La résistivité peut être mesurée par différents types d'outils, mais le principe fondamental reste le même dans tous les cas : une source émettrice envoie un signal dans la formation (courant électrique, champ électromagnétique), et un dispositif de mesure (récepteur) situé à une certaine distance de la source appelée espacement, enregistre les réactions du terrain à ce signal.

▪ Calcul de la porosité :

La porosité de la formation est calculée en utilisant la formule [4]:

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\Phi^m} \quad (\text{III.1})$$

avec : R_0 : résistivité de la formation (roche poreuse)

R_w : résistivité de l'eau interstitielle.

a : coefficient dépendant de la lithologie et variant entre 0.6 et 2.

m : facteur dépendant du type de sédiments, de la forme des pores, des liaisons entre pores, donc du type de porosité et de son mode de répartition.

F : facteur de formation dépendant de la texture de la roche.

Φ : porosité de la formation.

B . Mesure de la densité de la formation :

La densité de la formation est mesurée par le biais d'une diagraphie Gamma- Gamma, appelée aussi diagraphie de densité.

▪ Principe de la mesure :

La formation est soumise à un rayonnement γ émis par une source spéciale. Les rayons γ sont des particules sans masse, se propageant à la vitesse de la lumière. Ces photons γ incidents entrent en collision avec la matière, pour donner naissance à différents types d'interaction, et ceci en fonction de l'énergie du photon incident [4].

La densité globale de la formation est rigoureusement égale à la somme des produits des densités respectives de chacun de ses constituants par leur pourcentage volumique dans la formation poreuse.

C . Détermination du pourcentage d'argile dans la formation :

La détermination de la nature et du volume d'argile dans le réservoir se fait par le biais d'une diagraphie gamma ray, destinée à la mesure de la radioactivité naturelle de la formation.

On appelle radioactivité naturelle la transformation spontanée d'un noyau atomique au cours de laquelle ce dernier émet un rayonnement. C'est une caractéristique d'un certain nombre de noyaux qui ont la propriété d'émettre spontanément des rayons particuliers décelables quelle que soit la combinaison chimique dans laquelle l'élément est engagé. [4]

La radiation Gamma des roches sédimentaires est généralement attribuée à la présence simultanée de l'Uranium, du Thorium et du Potassium.

▪ Principe de la mesure :

Le rayonnement Gamma est mesuré à l'aide de détecteurs appropriés. La réponse de l'outil est fonction de la concentration en poids du minéral radioactif dans la formation, mais aussi de la densité de cette formation.

L'équation suivante traduit cette relation [4] :

$$GR = \frac{\rho_m \cdot V_m}{\rho_b} \cdot A \quad (III.2)$$

dans laquelle nous avons :

GR : radioactivité globale mesurée,

ρ_m : densité du minéral ou de l'élément radioactif;

V_m : pourcentage volumique du minéral ou de l'élément radioactif dans la formation,

ρ_b : densité globale de la formation,

A : facteur de proportionnalité correspondant à l'activité gamma du minéral ou de l'élément radioactif.

▪ Calcul du pourcentage d'argile :

Mis à part les sels de potasse, les argiles constituent les roches radioactives les plus fréquentes, c'est pour cela qu'il est généralement admis que la radioactivité d'une formation traduit son argilosité, et que la relation suivante permet de calculer le pourcentage d'argile:

$$V_{sh \text{ niveau}} \leq \frac{GR_{\text{niveau}} - GR_{\text{minimum}}}{GR_{\text{maximum}} - GR_{\text{minimum}}} \quad (\text{III.3})$$

avec :

$V_{sh \text{ niveau}}$: pourcentage volumique de l'argile à une profondeur z.

GR_{niveau} : radioactivité globale mesurée à la profondeur z.

GR_{minimum} : radioactivité globale minimale.

GR_{maximum} : radioactivité globale maximale.

D. Détermination des paramètres mécaniques dynamiques de la formation :

Le procédé utilisé pour la détermination des caractéristiques mécaniques dynamiques de la roche réservoir est la diagraphie sonique, qui se base sur une propagation d'ondes acoustiques émises au moyen d'un émetteur. Le temps de parcours des ondes est recueilli par des récepteurs, et les caractéristiques mécaniques de la formation sont calculées en utilisant des formules adéquates.

▪ Description de l'outil de mesure :

Une sonde acoustique (sonique) est composée au minimum d'un émetteur, de deux récepteurs et d'une cartouche électronique pour gérer et remonter l'information en surface. L'énergie émise est générée par un métal magnétostrictif excité par une impulsion électrique, la fréquence dominante se situe entre 20 et 30 kHz selon le diamètre de l'émetteur. Les récepteurs sont des anneaux de céramiques piézoélectriques.

En surface, l'information est recueillie, numérisée et stockée par un système électronique piloté par ordinateur. Le pas d'échantillonnage est le plus souvent de 5 ou 10 microsecondes.

La figure (III.2.) montre le schéma de l'un des outils utilisés. C'est le DSI (Dipole Shear Sonic Imager) souvent utilisé sur le champ de Hassi Messaoud.

▪ Calcul des paramètres mécaniques dynamiques :

Les ondes détectées par l'outil sonique sont les ondes de compression P et de cisaillement S. La propagation de ces ondes est fonction des caractéristiques mécaniques des formations traversées, et peut être représentée par les formules suivantes :

PARAMETRES MECANIQUES	
<u>Données :</u>	
Vitesse onde P = V_p	Densité = ρ
Vitesse onde S = V_s	
<u>Paramètres calculés :</u>	
Module de cisaillement	$G = \rho \cdot V_s^2$
Coefficient de Lamé	$\lambda = \rho \cdot (V_p^2 - V_s^2)$
Module de Young	$E = G \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G}$
Coefficient de Poisson	$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)}$

Tableau III.1 : Paramètres mécaniques dynamiques en fonction des vitesses des ondes P et S

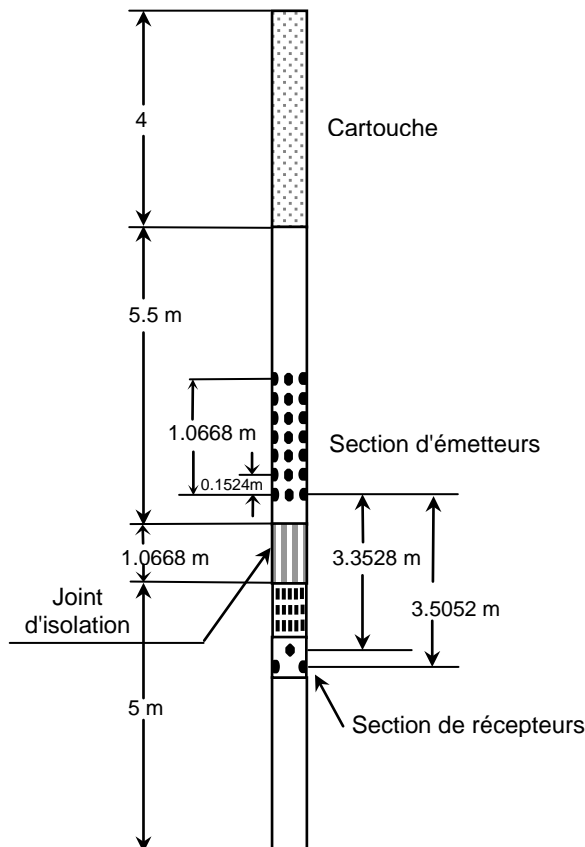


Fig. III.2 : Schéma de l'outil utilisé pour la diagraphe sonique Dipole Shear Sonic Imager -DSI Outil Schlumberger

III.3. ESSAIS REALISES AU LABORATOIRE

III.3.1. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Avant d'entamer les essais de laboratoire, il est nécessaire de choisir des échantillons extraits dans des zones intéressantes, et de les préparer ensuite à l'essai.

III.3.1. 1. CHOIX DES COTES D'ECHANTILLONNAGE ET RECALAGE:

A.) Choix des cotes d'échantillonnage:

Le choix des cotes d'échantillonnage s'est fait de telle sorte à avoir une diversification des caractéristiques pétrophysiques et mécaniques des échantillons, tout en tenant compte de l'état de récupération et de préservation des carottes.

Pour cela, les résultats des tests de diagraphie sont pris en considération (points singuliers sur le log sonique et le Gamma Ray de fond), et les cotes d'échantillonnage sont ainsi choisies dans les différents drains comme suit:

- cinq points sont choisis dans le drains D5 situé entre 3390m et 3420m de profondeur.
- trois points sont choisis dans le drains D3 situé entre 3420m et 3444m de profondeur.
- deux points sont choisis dans le drains D2 situé entre 3444m et 3468m de profondeur.
- deux points sont choisis dans l'inter drains ID se trouvant à 3468m de profondeur.

B.) Recalage des cotes :

Avant de procéder au prélèvement des échantillons, il est nécessaire de résoudre un problème souvent rencontré dans le domaine pétrolier, et qui consiste à situer les carottes extraites du fond du réservoir dans leur position initiales sur la hauteur du puits.

En effet, les enregistrements effectués in situ concernent toute la hauteur du réservoir, tandis que les tests de laboratoire ne concernent que quelques parties, à cause des difficultés techniques rencontrées lors de l'extraction des carottes dans certains passages traversés, tels que les couches friables ou fortement fracturées, d'où la nécessité de vérifier l'emplacement des carottes par rapports aux logs de diagraphie.

Le terme "cote" utilisé dans le jargon pétrolier désigne la profondeur qui correspond à chaque point du réservoir. Durant un sondage, deux types de cote sont enregistrés :

- des cotes sondeur ou cotes carottes: relevées suite à l'opération de carottage, et notées sur les caisses contenant les carottes.
- des cotes électriques ou cotes diagraphie: données par les outils de mesure lors des essais de diagraphie, et notées sur les logs.

L'écart entre les cotes sondeur et les cotes électriques est généralement important, et peut atteindre dans certains cas plusieurs mètres. De ce fait, il est indispensable de corriger l'une des

cotes par rapport à l'autre, surtout dans le cas d'une comparaison entre les résultats de laboratoire et ceux de la diagraphie. Cette opération est appelée "recalage des cotes".

Notons que la valeur du recalage est estimée au cours du carottage et des mesures diagraphiques, mais il est cependant nécessaire de la vérifier afin d'éviter d'éventuelles erreurs d'estimation. Le moyen généralement utilisé pour cette vérification est le Gamma Ray de surface. Cette opération consiste à mesurer la radioactivité des carottes récupérées et à comparer les résultats obtenus avec les résultats de la diagraphie Gamma Ray. Certains points singuliers sont alors repérés, puis calées sur les logs de diagraphie avec le plus de précision possible, ce qui permet une meilleure interprétation des résultats.

Afin de confirmer la valeur du recalage déduit à partir de l'essai Gamma Ray, nous avons réalisé des mesures acoustiques sur l'ensemble des carottes récupérées. Les logs donnant les vitesses de propagation des ondes P et des ondes S mesurées sur les carottes récupérées sont tracés puis comparés aux résultats enregistrés in situ.

B. 1). Essai Gamma Ray de surface (Core Gamma Ray) :

Description de l'essai :

Comme pour la diagraphie Gamma Ray, l'essai Gamma Ray de surface effectué au laboratoire est destiné à la mesure de la radioactivité de la roche. Rappelons que la radioactivité d'une roche renseigne sur le taux d'argile contenu dans sa matrice (*voir III.2.2.C.*)

Au laboratoire, deux types d'essai sont effectués :

- ▷ **Le Total Core Gamma Ray (Gamma Ray Total de surface) :** qui permet de mesurer la radioactivité totale des carottes et ainsi estimer le pourcentage d'argile qu'elles contiennent. Les bancs argileux traduits par des pics importants sur le log serviront de repères.
- ▷ **Le Spectral Core Gamma Ray (Gamma Ray Spectral de surface) :** qui enregistre le pourcentage des trois éléments radioactifs dans les carottes : le Potassium ^{40}K , le Thorium ^{232}Th et l'Uranium ^{238}U .

Description du dispositif expérimental :

Le matériel utilisé est le Spectral Core Gamma Logger composé de :

- ▷ **Un ensemble convoyeur :** constitué d'un *moteur* et d'un *tapis roulant* permettant à la carotte de passer à travers le détecteur avec une vitesse contrôlée. Localisé à gauche de l'appareil, le *photo sensor* a pour rôle de stopper le convoyeur dès que la carotte arrive en bout de course finale.
 - ▷ **Un détecteur :** l'élément essentiel de l'outil d'enregistrement est un détecteur à scintillation, constitué d'un cristal de Iodure de Sodium (NaI) couplé optiquement avec un
-

photomultiplicateur. Le détecteur est orienté parallèlement au dessus de la courroie du convoyeur. Il est protégé des particules α par un système Béryllium/ Cuivre. Par rapport à l'extérieur, une protection des rayons Gamma est assurée par une couche de Plomb.

- ▷ **Source de Césium** : la source de Césium 137 se trouve dans le tunnel de Cuivre au dessus du détecteur. Une partie des radiations (photons) émises par la source sont fonction de la masse de la carotte qui passe entre la source et le détecteur.
- ▷ **Système de contrôle** : le système de contrôle est assuré par un ordinateur compatible.

- Principe de la mesure :

Quand les rayons Gamma pénètrent dans le cristal, le détecteur d'Iodure de Sodium émet alors des photons de lumière visible. Ces photons sont détectés par le photomultiplicateur.

- Mode opératoire :

Avant toute mesure, les zones manquantes (non carottées ou non récupérées) sont repérées puis notées. La mesure est ensuite effectuée en plaçant les carottes une par une dans le tapis. Il est important de mesurer la radioactivité sur toutes les carottes récupérées afin de reproduire un log semblable à celui obtenu à partir du fond du puits. Les résultats de la mesure sont donnés par un logiciel d'acquisition, sous forme d'un log donnant la radioactivité en fonction des cotes. Les résultats ainsi obtenus sont destinés à être comparés aux résultats de la diagraphie Gamma Ray. Suite à cette comparaison, la valeur du recalage déterminée. Les points d'échantillonnage préalablement choisis sont repérés sur les carottes, et les échantillons sont ainsi prélevés.

B. 2). Essai acoustique :

L'essai consiste à soumettre la roche à une propagation d'ondes acoustiques (ultrasoniques) produite au moyen d'un transducteur piézoélectrique. Après avoir traversé l'échantillon, l'impulsion vibratoire est convertie en un signal électrique à l'aide d'un second transducteur qui permet de mesurer le temps de propagation de l'onde ultrasonique à travers l'échantillon. La vitesse de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S est alors donnée par le rapport entre la longueur de l'échantillon et le temps de parcours de chaque onde. L'essai est décrit d'une manière plus précise en III.3.4.

La mesure du temps de parcours des ondes est effectuée pour 135 échantillons de roche choisis sur les 57 mètres de carottes récupérées. Le log acoustique donnant la vitesse de propagation des ondes P et des ondes S sous pression atmosphérique en fonction de la profondeur est alors tracé, puis comparé au log sonique obtenu par diagraphie.

III.3.1.2. CAROTTAGE :

Douze (12) échantillons cylindriques de 1^{1/2} (38.1mm) de diamètre sont prélevés dans le cœur des carottes en respectant le choix des cotes d'échantillonnage préalablement effectué. Ils sont prélevés parallèlement au sens du carottage du puits (verticalement), puis sont découpés à une longueur légèrement supérieure à 3" (76mm).

Les deux bases de chaque échantillon sont ensuite polies au moyen d'un papier abrasif, dans le but d'éliminer toutes les ébréchures susceptibles d'apparaître à leurs extrémités lors de l'opération de sciage.

III.3.1.3. LAVAGE DES ECHANTILLONS:

Avant de procéder à la caractérisation pétrophysique, les échantillons sont lavés en utilisant un solvant adéquat : "le toluène". Cette opération a pour but l'élimination des matières organiques et impuretés contenues dans les pores de la roche.

Les échantillons sont ensuite placés dans une étuve, puis séchés à une température avoisinant 70°C jusqu'à stabilisation de leur poids.

III.3.1.4. CHOIX DU TYPE DE CHARGEMENT A ADOPTER POUR LES ESSAIS :

La difficulté principale que nous avons rencontré pour établir un rapprochement entre le milieu naturel et le laboratoire, est celle de reproduire de la meilleure façon possible les conditions du contexte naturel au laboratoire, c'est à dire, soumettre la roche étudiée à des conditions semblables à celles du fond, au moins du point de vue contraintes.

Certaines particularités propres au domaine pétrolier compliquent le problème : la roche étudiée est enfouie à des milliers de mètres en sub-surface, ce qui fait qu'elle est non seulement soumise à des contraintes importantes, mais aussi à l'effet du fluide sous pression contenu dans ses pores et à des effets de température. Comme il est difficile de reproduire l'ensemble des conditions originales, seuls quelques facteurs sont pris en considération.

Rappelons que la roche in situ est soumise à une contrainte verticale σ_v due au poids des terres, et deux contraintes horizontales σ_h et σ_H (contrainte horizontale minimale et contrainte horizontale maximale respectivement) . La contrainte verticale est aisément calculée en utilisant la formule :

$$\sigma_v = g \int_0^z \rho(z) dz \quad (\text{III.4})$$

où :

ρ est la masse volumique, fluides compris [Kg/m^3].

g est l'accélération de la pesanteur [m/s^2].

z est l'épaisseur de la couche [m].

σ_v est la contrainte verticale [Pa].

Une formule plus simple peut également être utilisée :

$$\sigma_v = \rho g z \quad (\text{III.5})$$

en considérant que le poids volumique des terrains ρg est constant, compris entre 20 et 22KPa/m (dans le domaine pétrolier) [40].

Cependant, il est très difficile d'estimer les contraintes horizontales, surtout à des profondeurs aussi importantes. Une autre difficulté préoccupe beaucoup de chercheurs actuellement : le chemin de chargement, en d'autres termes le mode de déformation de la roche et la redistribution des contraintes au cours de la production.

Ainsi, une première question se pose : "*comment restaurer l'état des échantillons, puisque les contraintes horizontales en place sont inconnues ?*". Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'étudier les changements apparus au niveau de la matrice rocheuse suite à son extraction du fond du puits.

Il a été constaté que toute carotte remontée en surface subit une expansion due à l'annulation des contraintes auxquelles elle était soumise. Cette expansion engendre un réseau de microfissuration.

Cette constatation nous mène à la conclusion suivante : "*la restauration de l'état initial des échantillons revient à refermer les microfissures apparues suite à leur extraction du fond du puits*".

Une deuxième question s'impose à ce niveau : "*Dans ce cas, quel est le type de chargement le plus adéquat ? et quelle est sa valeur numérique ?*".

Plusieurs études ont montré que les microfissures induites par le relâchement des carottes sont refermées sous l'effet d'un chargement isotrope (hydrostatique), qui revient à appliquer la même valeur de contrainte sur toutes les faces de l'échantillon.

Nous citons à titre d'exemple les travaux de J.B. Walsh en 1965 [41] et J. Gustkiewicz en 1989 [42] qui ont effectué des tests hydrostatiques sur plusieurs types de roches. Ils ont constaté en traçant les courbes donnant la déformation volumique en fonction de la pression hydrostatique appliquée, que le comportement de la roche au cours d'un essai isotrope présente en général deux principales phases :

- une première phase à concavité vers le bas, qui correspond à la fermeture progressive des microfissures.

- une deuxième partie plus ou moins linéaire qui correspond au comportement élastique de la roche.

La courbe théorique représentée sur la figure (III.3) traduit le comportement d'une roche sous l'effet d'un chargement isotrope [40].

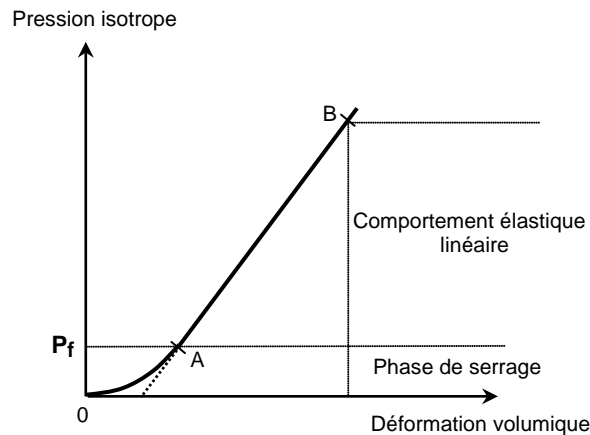


Fig. III.3 : Comportement d'une roche isotrope microfissurée sous chargement hydrostatique

La partie (OA) correspond à la fermeture graduelle des microfissures jusqu'à un seuil de pression " P_f ". Ce seuil de pression correspond à la fin de la phase de serrage et au début de la phase des déformations élastiques linéaires (AB).

Ceci répond à la question posée précédemment : les microfissures induites par le relâchement des carottes sont refermées sous l'effet d'un chargement isotrope de valeur numérique supérieure ou égale au seuil de pression P_f . Ce seuil de pression dépend de la nature de la roche, d'où la nécessité de déterminer sa valeur dans le cas des grès de Hassi Messaoud.

Très récemment, au sein du laboratoire mécanique des roches du centre de recherche et développement de la SONATRACH, des mesures intéressantes ont été effectuées sur la roche réservoir de Hassi Messaoud afin de déterminer la valeur de cette pression de fermeture des microfissures [43]. L'essai effectué dans ce sens est connu sous le nom de D.S.C.A. (Differential Strain Curve Analysis). La méthode consiste à prélever un échantillon cubique d'arêtes légèrement supérieures à 40mm dans le cœur d'une carotte orientée. L'échantillon équipé de jauges extensiométriques, puis doté de son système d'étanchéité (silastène), est mis dans une chambre de confinement dans laquelle un cycle de chargement/ déchargement est appliqué jusqu'à un niveau de 60MPa. Les déformations engendrées sont ainsi enregistrées.

Les courbes contrainte hydrostatique/ déformation volumique ainsi obtenues ont montré que la pression de fermeture des microfissures dans le cas des grès de Hassi Messaoud avoisine généralement les 40MPa.

Une autre question inévitable s'impose : " comment être certains que les microfissures ouvertes présentes dans un échantillon ont pour origine unique le phénomène de décompression? Notamment, n'existaient-elles pas in situ avant le carottage ? "

Simmons et Richter se sont posés cette question en 1974 [44], et ils ont pu constater par une analyse microscopique qu'il existe dans les roches deux types distincts de microfissures :

- D'une part, les microfissures dont l'aspect altéré est caractéristique de microfissures "vieilles" au sens géologique du terme. Etant donné la détérioration de leurs lèvres, celles-ci ne se referment généralement que sous des pressions hydrostatiques très élevées (plusieurs centaines de MPa).
- D'autre part, des microfissures récentes caractérisées par des lèvres concordantes, se refermant par voie de conséquence à des pressions beaucoup plus faibles (quelques MPa) [45].

Nous en déduisons alors qu'en soumettant les échantillons à des pressions de l'ordre de quelques dizaines de MPa, seules les microfissures récentes (jeunes) , engendrées par le relâchement de la matrice rocheuse seront refermées.

Pouvons nous être certains, par ailleurs, que ces microfissures "jeunes" n'ont pas été engendrées par d'autres phénomènes que la décompression ?

En effet, les contraintes mécaniques produites lors du carottage ou du façonnage de l'échantillon, et l'existence d'un gradient thermique (refroidissement de la carotte après prélèvement) sont également susceptibles de provoquer une microfissuration.

Or, il a été montré par *Batzl, Simmons et Siegfried* en 1980 [46] que pour des variations de température d'environ 150°C (ordre de grandeur du refroidissement lorsque l'on remonte une carotte rocheuse d'un réservoir pétrolier), peu de microfissures apparaissent. Des variations de température beaucoup plus importantes pourraient par contre engendrer une microfissuration.

Pour étudier l'effet du carottage et du façonnage lors de la préparation des échantillons au laboratoire, des essais de compressibilité sur trois types d'échantillons de ciment (cube de ciment moulé, cube de ciment scié et échantillon cylindrique de ciment carotté dans un cube de ciment moulé) ont été effectués (*Ghiassi, 1985*) [47]. De ces essais, il est ressorti qu'aucune microfissuration n'avait été induite ni par le carottage, ni par le façonnage.

Nous supposerons donc, que seul le relâchement est responsable de la microfissuration de l'échantillon.

III.3.1.5. CHOIX DE L'ETAT DE SATURATION DES ECHANTILLONS :

La roche in situ est saturée de fluides, de différentes natures et à différentes proportions, et l'influence de ces fluides sur ses propriétés acoustiques, et par conséquent sur ses propriétés mécaniques dynamiques doit être prise en considération.

Au cours de quelques recherches effectuées dans ce sens, il a été observé que le module de Young dynamique varie non seulement en fonction de la saturation, mais aussi en fonction de la nature du fluide saturant. Ainsi, plusieurs valeurs du module de Young dynamique peuvent être obtenues selon les différents cas (échantillon saturé en eau, saturé en hydrocarbures, sec,.....). Toutes les valeurs ainsi obtenues sont correctes et représentent le comportement mécanique de la roche, cependant, beaucoup de chercheurs admettent que le module de Young dynamique de la roche à l'état sec est le plus représentatif de son comportement mécanique [48].

Il a aussi été observé que l'écart entre le module de Young dynamique d'une roche à l'état sec et celui de la même roche à l'état saturé est important dans le cas des fortes porosités, mais qu'il est insignifiant dans le cas des faibles porosités. Il est à noter que la différence est significative pour les roches ayant une porosité supérieure à 20% [48].

Dans le cas du puits sur lequel nous allons travailler, et en se référant au log de porosité obtenu par diagraphie, nous constatons que la porosité du réservoir ne dépasse pas 14%. En prenant en considération le fait que la variation de la valeur du module de Young dynamique d'une roche à l'état sec et saturé est insignifiante pour des porosités inférieures à 20%, nous avons choisi d'effectuer les essais sur des échantillons à l'état sec.

III.3.1.6. CONCLUSIONS :

1. Les carottes remontées en surface subissent un relâchement suite à la suppression des efforts auxquels elles étaient soumises. Ce relâchement entraîne l'apparition de microfissures "jeunes" qui se referment sous de faibles pressions.
2. Ces microfissures se referment sous l'effet d'un chargement hydrostatique de valeur supérieure au seuil de pression P_f qui correspond à la fin de la phase de serrage et au début de la phase des déformations élastiques linéaires.
3. Dans le cas des grès de Hassi Messaoud, la pression de fermeture des microfissures avoisine généralement 40MPa.
4. Lors de la détermination du module de Young dynamique, l'effet de l'état de saturation des échantillons est négligeable pour des roches ayant des porosités inférieures à 20%. Dans notre cas, et en se référant aux mesures effectuées in situ, la porosité du réservoir ne dépasse pas 14%.

Ces conclusions nous mènent à effectuer les mesures acoustiques sur des échantillons secs soumis à un chargement isotrope de valeur supérieure à 40MPa.

III.3. 2. ANALYSES PETROPHYSIQUES

La détermination des caractéristiques pétrophysiques des échantillons est nécessaire à une meilleure compréhension de leur comportement. Pour cela, deux types d'analyses sont effectuées au laboratoire :

- des analyses conventionnelles (standards) : qui se déroulent dans les conditions de laboratoire (sous pression atmosphérique). Ces analyses regroupent : la mesure de la porosité, de la perméabilité et de la densité.
- des analyses spéciales : réalisées sur des échantillons soumis à une pression hydrostatique. Dans ce cas, la porosité et la perméabilité sont mesurées.

III.3.2.1. ANALYSES CONVENTIONNELLES :

A.) Mesure de la porosité :

La porosité est par définition le rapport du volume des pores V_v au volume total V_T . Elle est désignée par le symbole Φ , et donnée par la formule :

$$\Phi (\%) = \frac{V_v}{V_T} \times 100 = \frac{V_T - V_s}{V_T} \times 100 \quad (\text{III.6})$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_T : \text{volume total de l'échantillon [cm}^3 \text{]}. \\ V_v : \text{volume des vides entre les grains [cm}^3 \text{]}. \\ V_s : \text{volume réel des grains [cm}^3 \text{]}. \end{array} \right.$$

Le volume total V_T de chaque échantillon est calculé par la formule :

$$V_T = \frac{\pi D^2}{4} \times L \quad (\text{III.7})$$

où D [cm] et L [cm] représentent respectivement le diamètre et la longueur de l'échantillon. Ces deux paramètres sont mesurés en utilisant un pied à coulisse.

Le volume de la phase solide V_s est mesuré par expansion de gaz. La méthode consiste à envoyer un volume de gaz V_1 soumis à une pression P_1 et contenu dans une chambre de référence, dans un volume inconnu V_2 , à une température constante.

Une fois que l'équilibre entre la chambre de référence et le milieu poreux est établi, la pression d'équilibre P_{eq} est mesurée, et le volume inconnu V_2 est calculé en utilisant la loi de Mariotte Boyle [49] :

$$\frac{P_{fl} V_{fl}}{T} = cste \quad (III.8)$$

où : $\begin{cases} P_{fl} : \text{pression du fluide.} \\ V_{fl} : \text{volume du fluide.} \\ T : \text{température} \end{cases}$

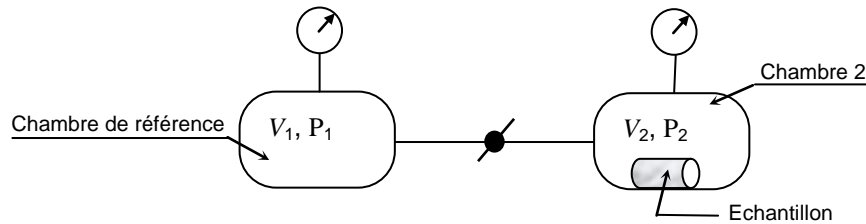


Fig. III.4. : Mesure de la porosité par expansion de gaz

D'après la figure (III.4.), nous pouvons écrire :

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_{eq} (V_1 + V_2)}{T} \quad (III.9)$$

avec:

P_1, V_1 : sont respectivement la pression et le volume dans la chambre de référence .

P_2, V_2 : sont respectivement la pression et le volume dans la chambre 2 .

P_{eq} : est la pression d'équilibre entre les deux chambres.

Comme la température est tenue constante durant l'essai, nous pouvons écrire :

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = P_{eq} (V_1 + V_2)$$

(III.10)

et le volume inconnu V_2 est alors donné par la formule :

$$V_2 = \frac{(P_1 - P_{eq})}{P_{eq}} V_1 \quad (III.11)$$

La mesure est effectuée quand la chambre (2) est d'abord vide, puis contenant l'échantillon. Le volume du solide est alors calculé par différence entre les deux volumes mesurés. Cette technique ne prend en compte que les pores interconnectés [5].

Le gaz utilisé pour cette mesure est l'Hélium, car c'est un gaz léger qui a un très bon pouvoir de pénétration, et qui ne réagit pas avec la matrice rocheuse. Le matériel utilisé est un porosimètre à Hélium

▪ Description de l'essai et du dispositif expérimental :

Destiné à la mesure de la porosité, le porosimètre à Hélium comporte principalement une source Hélium et un porte échantillon.

L'essai est conduit comme suit : le volume du porte échantillon vide V_1 est d'abord mesuré en utilisant de l'Hélium soumis à une pression de 100Psi (0.68MPa). La même opération est refaite, mais en introduisant cette fois ci l'échantillon à l'intérieur du porte échantillon. Le gaz à 100Psi envahit le volume inconnu des pores, et on enregistre ainsi la valeur V_2 .

Le volume de la phase solide sera donnée par :

$$V_s = V_1 - V_2 \quad (\text{III.12})$$

B.) Mesure de la perméabilité :

La perméabilité des échantillons est mesurée en utilisant la méthode de l'état d'équilibre qui se base essentiellement sur la loi de Darcy.

▪ Principe de base de la méthode :

La méthode consiste à appliquer un débit constant à travers l'échantillon de roche. Après l'obtention d'un écoulement permanent, la différence de pression entre les extrémités amont et aval de l'échantillon est mesurée, et la perméabilité k est alors donnée par une loi analogue à celle de Darcy : [40]

$$k = \frac{2Q\mu L P_{\text{atm}}}{(P_g^2 - P_s^2)S} \quad (\text{III.13})$$

avec :

k : perméabilité mesurée (m^2) (1Darcy = $0.987 \times 10^{12} \text{ m}^2$).

Q : débit mesuré (m^3/s).

μ : viscosité du fluide (Pa.s) (1Pa.s = 1 Poiseuille = 10 poises).

S : surface d'injection (m^2).

L : longueur de l'échantillon (m).

P_{atm} : la pression atmosphérique (Pa).

P_g : pression d'injection (Pa).

P_s : pression en sortie (Pa).

▪ Description de l'essai et du dispositif expérimental :

Le dispositif utilisé est un perméamètre à charge constante (fig.III.5). Le principe de la mesure consiste à placer l'échantillon en question dans une cellule, de le soumettre à une pression latérale donnée (pression de confinement) afin d'éviter un passage préférentiel de l'air entre l'éprouvette et la jaquette, puis de lui appliquer un débit constant en utilisant de l'Azote (N_2).

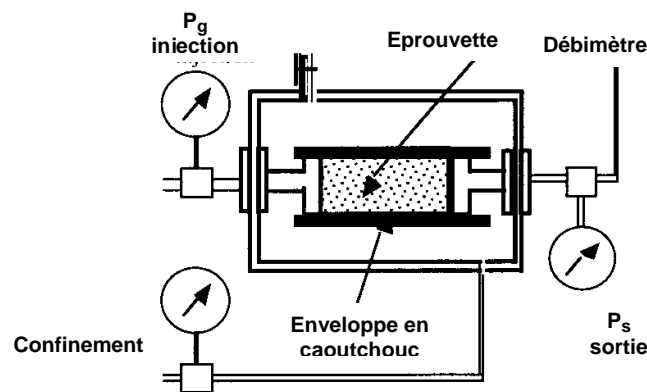


Fig. III.5 : Perméamètre à charge constante

C.) Mesure de la densité :

Pour la détermination de la densité sèche, les échantillons sont séchés puis pesés. La densité sèche est alors déduite en utilisant la formule :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_T} \quad (\text{III.14})$$

ρ_s : densité sèche de la roche [g/cm^3].

m_s : masse de l'échantillon sec [g].

V_T : volume total de l'échantillon [cm^3].

III.3.2.2. ANALYSES SPECIALES :

L'apparition des microfissures dans la matrice rocheuse suite à son relâchement induit une modification de ses caractéristiques pétrophysiques. Il est donc important de mesurer ces mêmes

caractéristiques après fermeture des microfissures apparues, et ceci en soumettant les échantillons à un chargement hydrostatique allant de la pression atmosphérique à une pression maximale de 7000Psi (47.6MPa).

▪ **Description du dispositif expérimental :**

Le dispositif utilisé contient à la fois un porosimètre et un perméamètre, et peut détecter des perméabilités allant de $1\mu\text{Darcy}$ à 5 Darcy, et un volume de pores allant de 0.02cm^3 à 25cm^3 . Le système possède également une gamme de sélection des contraintes, variant entre 500 et 10000Psi (de 3.4 à 68MPa). La contrainte choisie est appliquée dans les deux directions: axiale et radiale, de telle sorte à charger l'échantillon hydrostatiquement, permettant ainsi de déterminer ses caractéristiques pétrophysiques dans des conditions de pression représentatives de son état initial. Les porosités et perméabilités sont données pour huit paliers de pression.

L'appareil comporte principalement un porte échantillon [un carrousel qui permet d'analyser en continu 18 échantillons de 1" de diamètre (2.54cm), ou un deuxième qui peut contenir 12 échantillons de 1.5" de diamètre (3.81cm)], des générateurs de pression et un système électronique de contrôle et d'acquisition. Ces éléments sont contenus à l'intérieur d'un châssis compact, et sont reliés aux différentes sources (sources d'Hélium, d'Azote et d'huile) par des connecteurs. L'introduction ainsi que le contrôle des données s'effectuent manuellement ou automatiquement par le biais de touches digitales et les résultats sont traités et sauvegardés par un micro ordinateur.

a.) Mesure de la porosité :

Le principe utilisé pour la mesure de la porosité des échantillons est le même que celui cité au paragraphe III.3.1.a. Le gaz utilisé pour la mesure de la porosité est l'Hélium.

b.) Mesure de la perméabilité :

La méthode utilisée est la technique du pulse de pression utilisée lors de la mesure des faibles perméabilités. Elle consiste à imposer à l'une des extrémités de l'échantillon un incrément de pression Δp négligeable devant la pression de pore ($<10\%$), et la perméabilité sera déterminée en mesurant la décroissance de cet incrément en fonction du temps [50].

Le banc d'essai comporte deux chambres en amont et en aval de l'échantillon de volumes respectifs V_{am} et V_{av} . Une fois l'incrément de pression imposé, nous laissons l'équilibre s'établir entre les deux chambres jusqu'à atteindre une pression finale commune P_{pf} . Le déclin de pression dépend de la diffusivité hydraulique de la roche dont on déduit la perméabilité [50].

III.3.3. DETERMINATION DE LA TEXTURE DES ECHANTILLONS ET DU VOLUME D'ARGILE CONTENU DANS LEUR MATRICE

La présence des minéraux argileux dans la matrice rocheuse, même en faibles quantités, affecte considérablement les propriétés acoustiques de la roche, et par conséquent ses propriétés mécaniques dynamiques. Il est donc important de déterminer le volume d'argile contenu dans nos échantillons afin d'étudier cette influence.

En se référant à [27], [28] et [36], nous avons déterminé le volume d'argile contenu dans les échantillons par trois techniques différentes :

- une analyse granulométrique laser.
- un essai par diffraction de rayons X.
- une analyse pétrographique sur lames minces.

III.3.3.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE LASER :

La granulométrie laser est un procédé d'analyse destiné à la détermination de la texture des poudres chimiques, organiques et minérales, ainsi que les liquides sous forme d'aérosols. C'est une méthode très rapide (quelques secondes), non destructive (l'échantillon peut être récupéré), et qui couvre une large gamme granulométrique.

Le principe de l'essai consiste à soumettre une quantité de poudre à un faisceau laser produit par un émetteur. Les particules solides de la poudre diffusent une lumière laser, celle-ci est collectée par des lentilles qui la concentrent sur le récepteur (détecteur). Celui-ci assure la collecte et le stockage de l'information.

▪ **Description du dispositif expérimental :**

Le dispositif utilisé pour cette analyse est un granulomètre à laser composé principalement des éléments suivants (fig. III.6) :

- ▷ **Un émetteur :** qui renferme le laser et les composants électroniques qui produisent le faisceau laser pour l'analyse des échantillons.
 - ▷ **Des lentilles :** qui servent à collecter la lumière laser diffusée à partir des échantillons, et à la concentrer sur les composants électroniques du détecteur. Plusieurs lentilles sont disponibles, chacune d'entre elles couvre une certaine plage granulométrique.
-

- ▷ **Un accessoire de préparation des échantillons** : destiné à recevoir les échantillons de poudre, qu'ils soient dispersés dans un liquide ou analysés par voie sèche.
- ▷ **Une cellule de circulation** : à l'intérieur de laquelle circulent la poudre et le dispersant. Ceux ci sont maintenus en suspension par un accessoire externe, qui pompe la solution pour lui faire traverser la cellule de circulation.
- ▷ **Un banc optique** : destiné à la collecte de l'information provenant de la lumière diffusée par les particules de l'échantillon.
- ▷ **un récepteur** : qui assure la collecte et le stockage de l'information. les données sont ensuite envoyées au système informatique pour y être analysées.

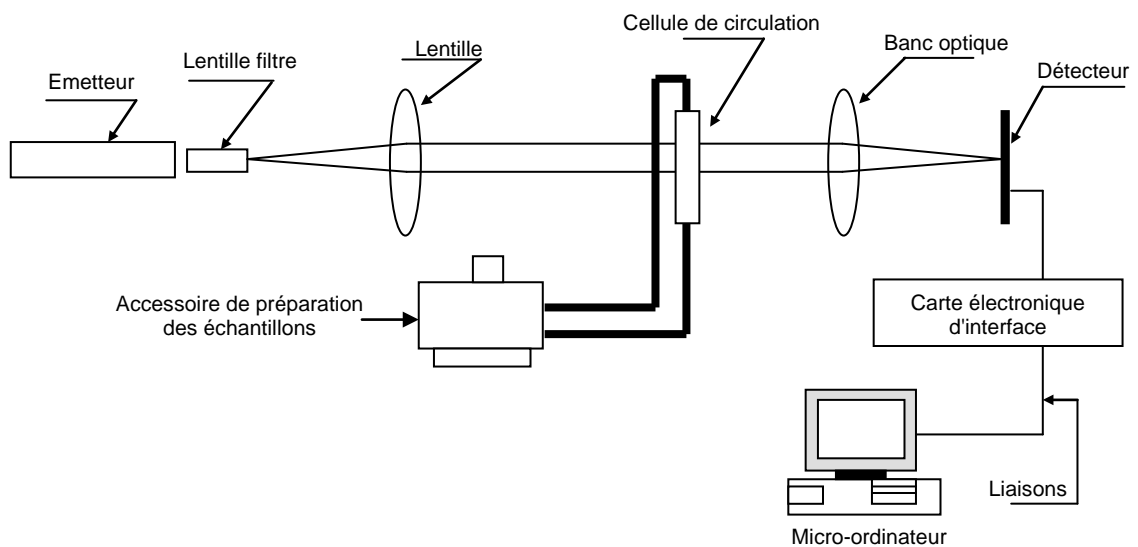


Fig.III.6 : Granulomètre à Laser

▪ Description de l'essai :

L'analyse est précédée par la préparation des échantillons de poudre. Pour cela, une partie de la roche à analyser est concassée à une taille avoisinant 5mm, puis soumise à un traitement par une série de solutions chimiques, afin d'éliminer les impuretés qu'elle peut contenir :

- ▷ l'Acide Chlorhydrique (HCl) est destiné à l'élimination des carbonates.
- ▷ le Nitrate est utilisé pour la fragilisation des grès.
- ▷ l'eau oxygénée (H₂O₂) sert à l'élimination des matières organiques contenues dans les argiles.
- ▷ le Chloroforme est destiné au nettoyage des grains contaminés par l'huile.

La poudre ainsi obtenue est ensuite placée à l'étuve. Une fois sèche, elle est désagrégée par un pilon en caoutchouc, puis placée dans un mélangeur magnétique pendant quelques heures. L'échantillon est enfin prêt à l'essai.

Une quantité de la poudre (1 à 3g pour une suspension liquide, et 1 à 100g pour une poudre sèche) est introduite à l'intérieur de l'accessoire de préparation des échantillons selon le mode adéquat (voie sèche ou voie humide). Si les grains sont très fins, procéder par voie humide, celle-ci correspond à la gamme $[0.05\mu\text{m} ; 900\mu\text{m}]$. Par contre, si les grains sont plutôt grossiers, opter pour la voie sèche qui correspond à la gamme $[5\mu\text{m} ; 3500\mu\text{m}]$.

Une combinaison entre les deux modes est possible, il suffit d'analyser un même échantillon par les deux voies, puis de faire la moyenne entre les deux résultats, ceci permet d'élargir la gamme $[0.05\mu\text{m} ; 3500\mu\text{m}]$.

L'échantillon mis dans la cellule est ensuite pompé par un accessoire externe lui permettant ainsi de traverser la cellule de circulation. Le faisceau laser produit par l'émetteur traverse la poudre, et la lumière laser diffusée à partir des particules solides est collectée par des lentilles, qui la centrent sur le récepteur.

Dans notre cas, tous les échantillons ont été analysés par voie humide sauf le 4A et le 6C pour lesquels une combinaison des deux modes a été nécessaire.

Les résultats de l'analyse sont traités par un logiciel d'acquisition, puis donnés sous forme de courbes et de tableaux.

III.3.3.2. ANALYSE PAR DIFFRACTOMETRIE DES RAYONS X :

La technique d'analyse par diffractométrie des rayons X est utilisée en vue de l'identification et de l'estimation des composants minéralogiques présents dans nos échantillons de roches. Le principe de cette technique consiste à soumettre un échantillon de roche réduit en poudre à un faisceau de rayons X monochromatique. Celui-ci sera diffusé par les plans réticulaires des cristaux contenus dans l'échantillon selon la loi de *BRAGG*.

Loi de BRAGG :

Lorsqu'un faisceau de rayons X monochromatique, de longueur d'onde λ_d tombe sur un cristal, les rayons X sont diffusés dans toutes les directions de l'espace. Selon la loi de *BRAGG*, la diffraction a seulement lieu quand la loi suivante est satisfaite :

$$n_r \lambda_d = 2d_r \sin \theta_d$$

$$(n_r = 1, 2, 3, \dots) \tag{III.15}$$

avec :

n_r : ordre de la réflexion.

λ_d : longueur d'onde en $\left[\overset{\circ}{\text{A}} \right]$.

d_r : distance réticulaire en $\left[\overset{\circ}{\text{A}} \right]$.

θ_d : angle de diffraction en degrés.

Le terme d_r est déterminé par la nature du cristal. Pour réaliser les conditions de diffraction sur une famille de plans, un seul des deux paramètres (θ_d, λ_d) peut être arbitrairement fixé.

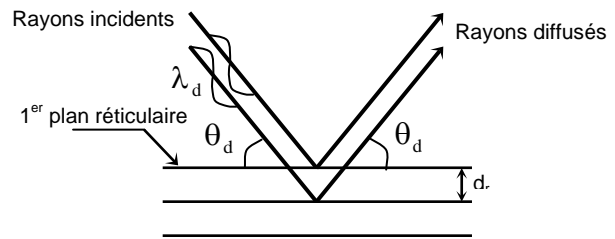
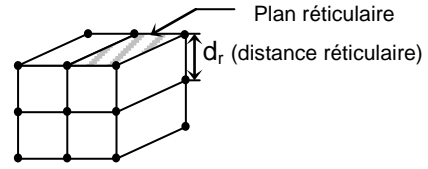


Fig. III.7 : Illustration de la loi de BRAGG

▪ Appareillage et conditions expérimentales :

La production des rayons X consiste à bombarder par des électrons une cible métallique (cuivre dans notre cas), en utilisant un tube à vide et en appliquant une haute tension (2000 à 2500 Volts) pour accélérer les électrons. L'ensemble automatique de diffractométrie comporte trois parties essentielles (fig.III.8):

- ▶ **Un générateur de rayons X :** qui alimente le tube radiogène.
- ▶ **Un goniomètre et un détecteur de rayons X :** qui permettent de mesurer les angles des rayons diffractés. Le détecteur doit être monochromatique.
- ▶ **Une baie de mesure :** qui traite le signal obtenu au niveau du détecteur, et qui sert à actionner un enregistreur sur lequel on aura le diffractogramme de l'échantillon analysé.

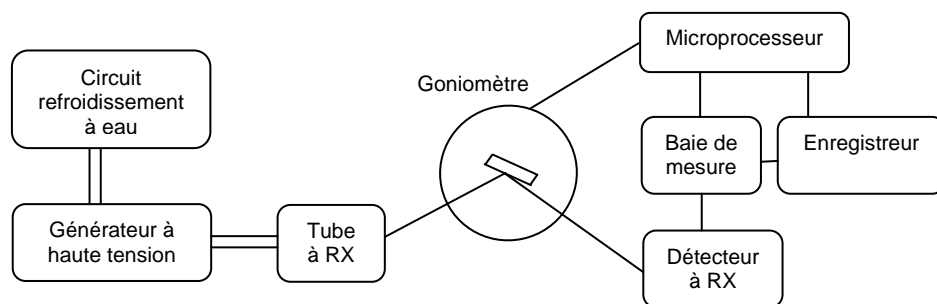


Fig.III.8 : Ensemble automatique de diffractométrie.

▪ Procédure expérimentale :

Avant d'être analysée, la roche est broyée à la granulométrie optimale (entre 10 μ et 40 μ), puis divisée en deux parties : la première montée sur un porte échantillon adéquat, servira à l'étude des minéraux non argileux, et la seconde à l'étude des minéraux argileux après extraction de la fraction fine.

Préparation de la poudre (identification des minéraux non argileux) :

Le montage de la poudre se fait manuellement par simple pression sur un porte échantillon métallique. La méthode consiste à enregistrer à l'aide d'un compteur de particules (quanta), pour chaque groupe de rayons diffractés par un plan réticulaire, l'angle θ qui le caractérise. On obtient directement sur un diagramme la position des raies de diffraction et leur intensité. Connaissant λ_d , la formule de BRAGG permet de calculer les distances réticulaires des différents plans du cristal.

La position des pics (raies de diffraction) permet de mesurer les angles de diffraction, et leur hauteur les intensités des réflexions diffractées. Les raies sont repérées par leurs sommets et par leurs valeurs angulaires de réflexion $2\theta_d$. L'identification des minéraux se fait par comparaison des diagrammes des échantillons étudiés avec les diagrammes standards des principaux minéraux.

Cette méthode permet la détermination qualitative et semi quantitative des minéraux non argileux (Quartz, Calcite, Dolomite, Pyrite, Feldspaths,.....). Le complément à 100 de la somme des pourcentages de ces minéraux, est représenté par la fraction argileuse et les indosés (matière amorphe, organique,...).

Analyse de la fraction fine (nature des minéraux argileux) :

Ici c'est la fraction argileuse qui est analysée. Elle est extraite par suspension dans de l'eau distillée. Les impuretés sont ensuite éliminées par des attaques chimiques modérées et appropriées, et par des moyens physiques (décantation, centrifugation, agitation mécanique ou dispersion par ultrasons....). La solution argileuse est déposée sur des supports en lames de verre pour séchage à l'air libre et température ambiante, puis elles sont soumises à un faisceau de rayons X monochromatiques.

Les minéraux argileux rencontrés sont dosés d'une manière relative, le pourcentage de chacun des minéraux est donné par rapport au total de la fraction argileuse et non par rapport à l'ensemble de la roche.

III.3.3.3. ANALYSE PETROGRAPHIQUE SUR LAMES MINCES :

L'analyse pétrographique sur lames minces (ou sections polies) est un procédé d'investigation très facile à mettre en œuvre, et qui consiste à réaliser une coupe de la roche à étudier. Elle est basée sur la description microscopique détaillée des lames minces en lumière polarisée naturelle et réfléchie, complétée par une analyse radiocristallographique pour la détermination des minéraux argileux. Elle permet de déterminer :

- les diamètres moyen et maximum des grains de Quartz, leur classement et leur morphologie.
- les types de contact entre les grains.
- les pourcentages des principaux constituants.
- les différents types de réseaux poreux et leurs proportions.

Dans le cas de notre recherche, l'analyse se restreint à la détermination du pourcentage d'argile contenu dans les échantillons.

▪ Procédure expérimentale :

Une lamelle de roche de quelques millimètres d'épaisseur, et de surface égale à celle de la lame porte objet est découpée, polie avec des abrasifs, puis collée sur une lame porte objet avec de l'araldite. La surface est une fois encore polie à l'aide d'une polisseuse, puis recouverte avec une lamelle couvre objet.

Une lame est préparée pour chaque échantillon de roche. Les douze lames minces sont ensuite analysées au microscope afin d'estimer le pourcentage d'argile contenu dans la matrice des échantillons.

III.3.4. DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES

DYNAMIQUES DES ECHANTILLONS

La caractérisation mécanique dynamique est effectuée en utilisant une cellule triaxiale autonome auto-compensée munie d'un sonique. L'intérêt de cet essai est d'effectuer les mesures des paramètres mécaniques dynamiques sous des conditions de pression proches de celles du fond.

En référence à III.3.1.4, les mesures acoustiques seront effectuées sous un chargement hydrostatique allant jusqu'à 50MPa.

▪ **Conditions à vérifier avant l'essai :**

D'après les normes ISRM [6], plusieurs conditions doivent être vérifiées pour que l'essai dynamique soit valable :

▷ ***Le diamètre du grain moyen < Longueur d'onde de la pulsation < Dimension minimale de l'échantillon.***

- Le diamètre du grain moyen dans chaque échantillon est donné par l'analyse granulométrique laser. Selon les résultats, celui ci est compris entre 11µm et 600µm .
- La longueur d'onde de la pulsation peut atteindre 6mm.
- La dimension minimale des échantillons est de 38.1mm .

Cette condition est vérifiée pour tous les échantillons.

▷ ***La dimension latérale minimale $\geq 10 \times$ la longueur d'onde.***

- La dimension latérale minimale des échantillons est de 38.1mm .
- La longueur d'onde peut atteindre 6mm

Cette condition n'est donc pas vérifiée, cependant la norme ASTM [51] exige que :

La dimension latérale minimale $\geq 5 \times$ la longueur d'onde

ce qui est vérifié.

▷ ***La longueur de l'échantillon $\geq 10 \times$ le diamètre du grain moyen.***

- Cette condition est vérifiée pour l'ensemble des échantillons.

▪ **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à placer un échantillon de forme cylindrique dans une cellule et de le soumettre à un chargement hydrostatique. Une fois que le niveau de pression désiré est atteint, l'échantillon est soumis à un essai acoustique par transmission directe², qui consiste à produire une impulsion de vibration longitudinale au moyen d'un transducteur piézoélectrique³ appliqué sur l'une de ses faces. Après avoir traversé l'échantillon, l'impulsion vibratoire est convertie en un signal électrique à l'aide d'un second transducteur, ce dernier permet de mesurer le temps de propagation de l'onde ultrasonique à travers l'échantillon.

La vitesse de propagation de l'onde à travers l'échantillon est donnée par la formule :

$$V_p = \frac{L}{t_p} \quad \text{et} \quad V_s = \frac{L}{t_s} \quad (\text{III.16})$$

avec :

t_p : temps de parcours de l'onde P [s].

t_s : temps de parcours de l'onde S [s].

V_p : vitesse de propagation de l'onde P [m/s].

V_s : vitesse de propagation de l'onde S [m/s].

L : longueur de l'échantillon [m].

Comme nous l'avons montré au paragraphe I.4, les paramètres mécaniques dynamiques E_{dy} , G_{dy} et ν_{dy} sont exprimés en fonction des vitesses de propagation des deux ondes de compression et de cisaillement, associées à la valeur de la masse volumique par la formule suivante :

- Module de Young dynamique :

$$E_{dy} = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (\text{III.17})$$

- Coefficient de Poisson dynamique :

$$\nu_{dy} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (\text{III.18})$$

- Module de cisaillement dynamique :

$$G_{dy} = \rho V_s^2 \quad (\text{III.19})$$

▪ Description du dispositif expérimental :

La réalisation de l'ensemble des mesures des vitesses de propagation des ondes acoustiques nécessite un dispositif d'acquisition et de mesure complexe, composé de:

- ▶ Une cellule triaxiale autonome autocompensée, à l'intérieur de laquelle s'effectue l'essai.

² Consiste à appliquer les deux transducteurs (émetteur et récepteur) sur les deux phases opposées de l'échantillon.

³ Dispositif dont le rôle est de convertir une énergie électrique en énergie acoustique et inversement, exemple: le quartz.

- ▶ Trois générateurs de pression. Chaque générateur est constitué d'une pompe et de son coffret de contrôle :
 - la pompe hydraulique supporte les éléments mécaniques et hydrauliques destinés à la génération des pressions à l'intérieur de la cellule triaxiale;
 - le coffret de contrôle renferme l'ensemble des éléments électriques et électroniques permettant le contrôle manuel et automatique de la pompe hydraulique.
- ▶ Un ensemble hydraulique :
 - les flexibles hydrauliques, la tuyauterie et les raccords permettant de relier les trois pompes à la cellule triaxiale,
 - des vannes manuelles permettant de diriger les fluides dans le système (coupure de circuit, purge,...),
 - un support de disque de rupture de sécurité (ou soupape destructible à 120 MPa) placé sur une voie d'accès à la chambre de confinement.
- ▶ Un ensemble électronique ultrasonique :
 - un micro-ordinateur du type PC,
 - une paire de capteurs ultra-soniques (émetteur + récepteur) pour ondes longitudinales et transversales (P et S),
 - un émetteur-récepteur à ultrasons .
- ▶ Un oscilloscope numérique servant à visualiser la forme de l'onde émise et celle reçue.
- ▶ Un logiciel installé sur le micro-ordinateur permet de digitaliser les signaux obtenus par l'oscilloscope. Il permet de récupérer les fichiers des données sauvegardées, et de les traiter.

Description de la cellule triaxiale :

La figure (III.9) représente une coupe longitudinale de la cellule triaxiale. Fabriquée en acier inoxydable, elle présente trois parties principales : la chambre du vérin axial, la chambre de confinement et l'embase inférieure .

La particularité de cette cellule est qu'elle est autonome (c'est à dire qu'elle ne nécessite aucun bâti de chargement); et auto-compensée (c'est à dire que l'application de la contrainte de confinement induit automatiquement une contrainte axiale ayant la même valeur, ce qui permet de soumettre l'échantillon à un système de chargement hydrostatique).

La partie supérieure de la cellule est un vérin hydraulique à double effet, c'est à dire qu'il suffit d'injecter de l'huile sous pression dans sa chambre supérieure pour descendre le piston et ainsi écraser l'échantillon, ou d'injecter de l'air (ou de l'huile) sous une faible pression dans la chambre inférieure pour faire remonter le piston (à la fin de l'essai par exemple).

Entre ces deux chambres hydrauliques est située une chambre intermédiaire, dite d'auto-compensation, qui communique avec la chambre de confinement par l'intermédiaire d'un conduit présent au centre du piston.

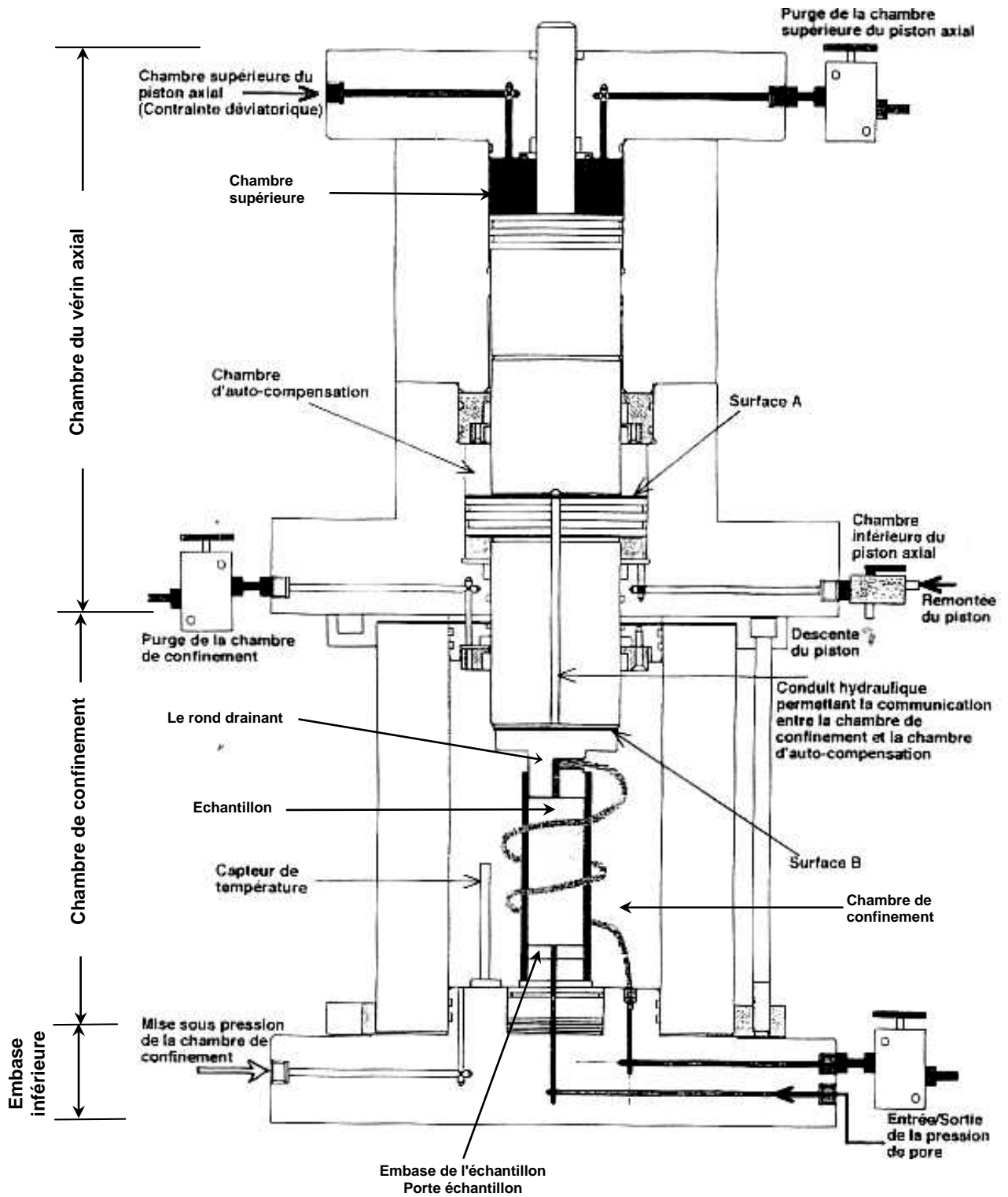


Fig. III.9 : La cellule triaxiale

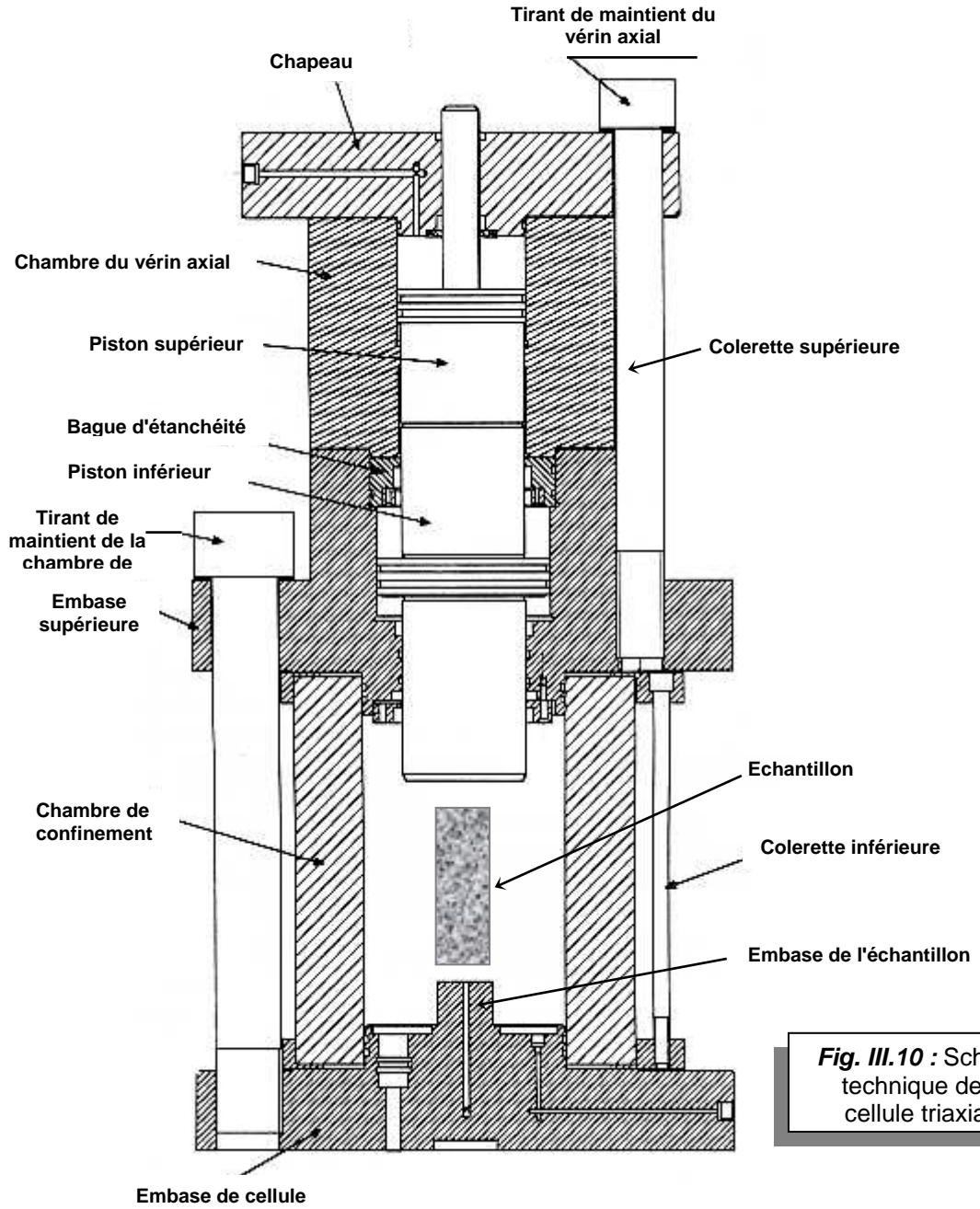


Fig. III.10 : Schéma technique de la cellule triaxiale

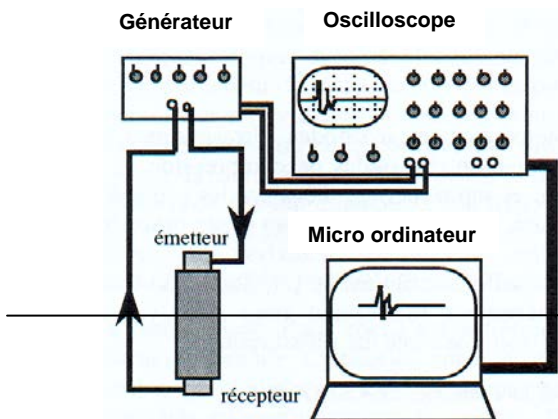


Fig. III.11 : Dispositif expérimental de l'essai ultrasonique.

Lorsque la pression de confinement augmente, elle applique sur le piston une force qui tend à le faire remonter, mais la pression augmente également dans la chambre d'auto-compensation où la force résultante tend à faire descendre le piston. Les surfaces où sont appliquées ces deux forces ont la même superficie et le piston reste donc en équilibre. L'émetteur ultrasonique est placé dans le rond supérieur drainant d'échantillon, c'est à dire sous la pression hydrostatique, l'avantage est qu'il est positionné au plus près de l'échantillon.

La cellule triaxiale est prévue pour accepter une pression de confinement, chargement axial et pression interstitielle allant respectivement à une valeur maximale de 100, 394 et 100 MPa. Il est cependant recommandé en cas d'utilisation du système sonique, de ne pas dépasser une pression de confinement de 60 MPa, sous peine de destruction du capteur ultrasonique, sa résistance étant ramenée à 60 MPa.

▪ Description du processus expérimental :

Le processus expérimental comporte quatre étapes : l'étalonnage de l'appareillage, la préparation des échantillons, la préparation de la cellule triaxiale et l'essai proprement dit.

▷ *Etalonnage de l'appareillage :*

Afin de vérifier la fiabilité des mesures acoustiques nous avons procédé à l'étalonnage de l'appareillage en mesurant le temps de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S à travers des étalons en acier, dont les caractéristiques acoustiques sont bien connues.

Les résultats donnés sur le tableau III.2 montrent que la précision des mesures est acceptable (selon les normes ISRM [6], l'erreur relative ne doit pas dépasser 1% dans le cas des ondes P et 0.5% dans le cas des ondes S).

	Temps réel (μ s)		Temps mesuré (μ s)		Erreur absolue (μ s)		Erreur relative (%)	
	tp	ts	tp	ts	tp	ts	tp	ts
<i>Etalon en acier</i>	12.905	23.572	12.9	23.5	0.005	0.072	0.039	0.31

Tableau III.2 : Résultats de l'étalonnage

▷ *Préparation des échantillons :*

La préparation de l'échantillon à tester s'effectue en étalant un gel de couplage sur ses deux surfaces planes afin d'assurer la transmission de l'onde acoustique. Il est très important de veiller à ce que tous les échantillons aient des faces planes, afin d'avoir le meilleur couplage possible

[6]. Les dimensions finales des échantillons doivent aboutir à un élargissement (rapport L/D) proche de 2, et ceci afin de faciliter la distinction entre les ondes P et les ondes S [6].

L'échantillon est ensuite introduit dans une jaquette de néoprène. La jaquette a pour rôle de protéger les échantillons et d'asservir grâce à sa grande souplesse la transmission intégrale de la pression de confinement, en empêchant la pénétration de l'huile à l'intérieur des pores de l'échantillon.

► **Préparation et mise en place de la cellule :**

Le récepteur ultrasonique est fixé à son emplacement situé sous l'embase de la cellule. L'échantillon doté de son système d'étanchéité est positionné sur l'embase, puis recouvert avec le rond drainant contenant l'émetteur ultrasonique. Des connecteurs électriques traversent la cellule par l'intermédiaire de passages de cloison. Ils sont reliés d'une part aux systèmes d'émission et d'acquisition (Emetteur-Récepteur et oscilloscope numérique), et d'autre part aux capteurs ultrasoniques.

Après vérification des connexions électriques et du bon fonctionnement des capteurs ultrasoniques, la chambre de confinement est vissée sur l'embase de cellule, puis remplie avec une huile spéciale.

La chambre du vérin axial est ensuite fixée sur la chambre de confinement à l'aide des tirants. Les purges de la chambre de confinement et du vérin axial sont maintenues ouvertes afin d'évacuer l'air emprisonné à l'intérieure de la cellule. Le vérin axial est alors descendu jusqu'à ce qu'il vienne buter sur la partie supérieure de l'échantillon. Une contrainte de 0.1MPa est appliquée afin d'assurer une bonne transmission des ondes [6].

Ces opérations terminées, nous fermons les deux purges. La cellule est enfin prête à l'essai.

► **Mesure des temps de propagation des ondes longitudinales P et transversales S :**

Après avoir procédé à la préparation de l'échantillon et de son système d'étanchéité, puis effectué les opérations de sa mise en place à l'intérieur de la cellule, l'essai est enfin entamé.

L'échantillon est placé dans les conditions de contraintes désirées. Pour cela, son chargement est assuré par une pompe destinée à la génération de la pression de confinement, celle ci étant contrôlée manuellement par le biais de son coffret.

Le système d'auto-compensation de la cellule triaxiale permet d'appliquer simultanément sur l'échantillon une pression de confinement et une pression axiale égales en valeur. L'échantillon est ainsi soumis à un chargement hydrostatique dont nous avons fixé la valeur maximale à 50 MPa. La pression est appliquée avec un accroissement constant de 5MPa/min.

Avant d'atteindre la pression de 50MPa, nous avons également effectué des mesures sous les paliers de pression 5 - 10 - 15 - 20 - 25 - 30 - 35 - 40 et 45MPa.

CHAPITRE IV

RESULTATS DES ESSAIS

Les résultats bruts de l'ensemble des essais effectués in situ et au laboratoire sont regroupés dans le présent chapitre, sous forme de tableaux et de courbes.

IV.1. RESULTATS DES ESSAIS REALISES IN SITU :

Les tests de diagraphie ont été effectués par une compagnie de service étrangère. Les résultats nous ont été fournis sous forme de Logs (enregistrements continus en fonction de la profondeur), et sous forme de données sur bande magnétique afin de faciliter leur traitement.

Les paramètres mesurés sur le puits en question sont :

- la radioactivité naturelle de la formation donnée par le Gamma Ray de fond. Cette mesure permet d'estimer le pourcentage d'argile des réservoirs, et de faire une approche de la perméabilité.
- la densité de la formation.
- la résistivité de la formation. Cette mesure permet le calcul de la porosité et de la saturation en eau et en hydrocarbures.
- le diamètre du trou.
- les temps de parcours des ondes soniques dans la formation donnés par la diagraphie sonique. Les caractéristiques mécaniques dynamiques de la roche réservoir sont calculées en combinant les vitesses des ondes P et S avec les valeurs de la densité.

Plusieurs propriétés du réservoir nous ont été communiquées : la densité, la porosité, la saturation en eau et en hydrocarbures, le pourcentage d'argile dans la formation.....etc.

Parmi ces différents paramètres, seuls la porosité, la densité, l'argilosité et les vitesses de propagation des ondes soniques ont été considérés dans le cas de notre étude. Les valeurs de ces paramètres sur toute la hauteur du réservoir sont représentées sur la figure (IV.1).

IV.1.1. LA POROSITE Φ (%) :

Les résultats sont fournis sur une hauteur de réservoir de 90m (de 3390 à 3480m de profondeur). L'enregistrement est effectué en 600 points de mesure avec un pas de 1/2 pied (0.1524m).

Selon la classification donnée en annexe A, le réservoir a une porosité faible à moyenne (comprise entre 3.8 et 13.22%). La valeur moyenne est de 6.7%.

IV.1.2. LE POURCENTAGE D'ARGILE:

Le pourcentage d'argile dans le réservoir est déterminé sur une hauteur de 90m avec un pas de 0.1524m. Les valeurs obtenues sont comprises entre 0.8 et 27.17%. La valeur maximale est enregistrée à la cote 3399.4m.

IV.1.3. LA DENSITE :

La densité est mesurée sur toute la hauteur du réservoir. Elle varie entre 2.2 et 2.7g/cm³.

IV.1.4. LES PROPRIETES ACOUSTIQUES :

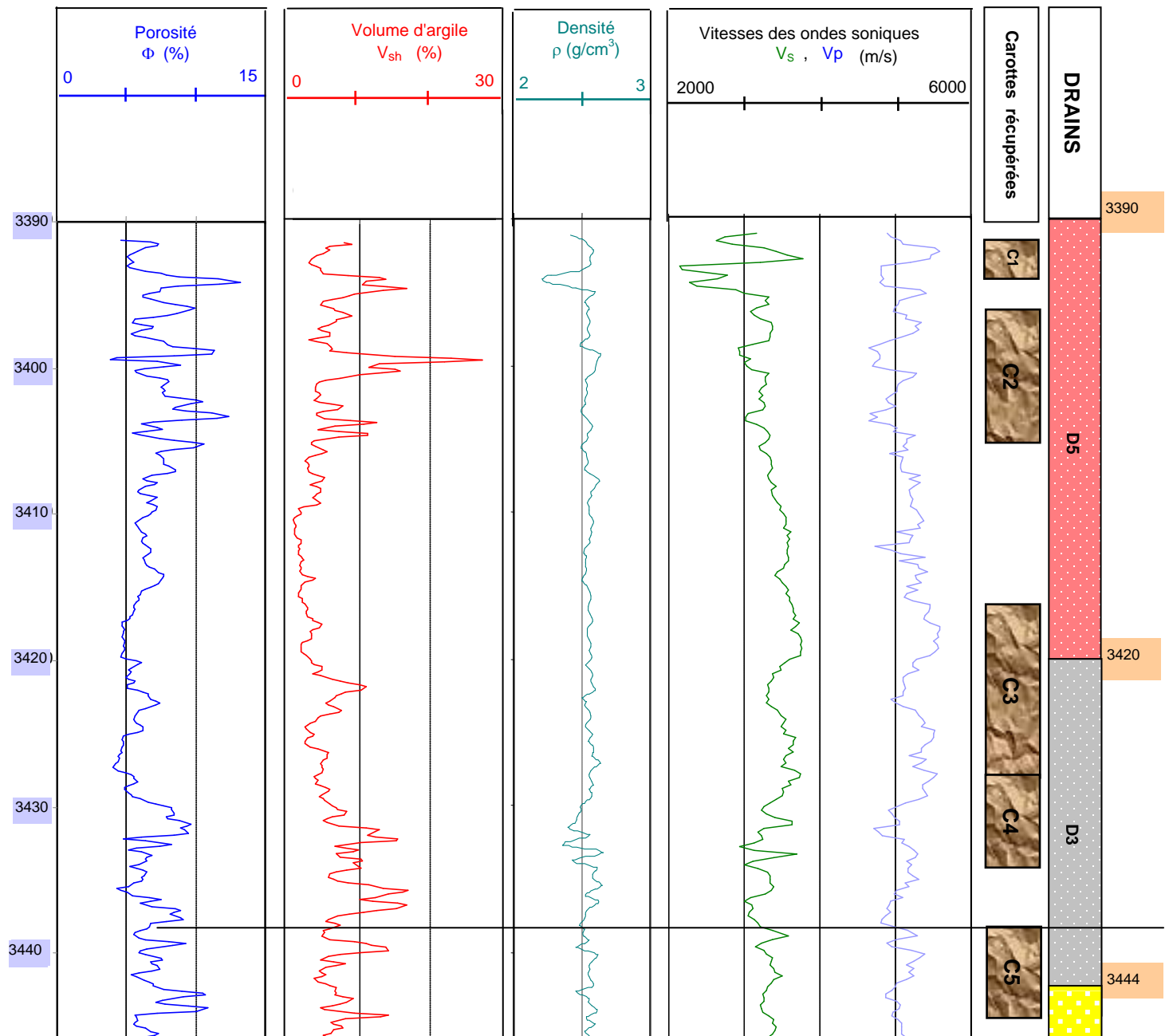
Les temps de parcours des ondes longitudinales P et transversales S à travers la formation sont mesurés sur une hauteur de 145m (entre 3343 et 3487m de profondeur), avec un pas de 0.1524m.

D'après les résultats (fig.IV.1), les vitesses des ondes longitudinales ont une valeur minimale de 4600m/s et atteignent une vitesse maximale d'environ 5600m/s. Les ondes de cisaillement ont des vitesses comprises entre 2140 et 3780m/s.

N.B :

Les différents drains qui constituent le réservoir sont représentés sur la figure V.1. Les carottes récupérées sont également représentées sur la même figure.

"Ci" : carotte numéro "i".



IV.2. RESULTATS DES ESSAIS REALISES AU LABORATOIRE

IV.2.1. RESULTATS DES ANALYSES PETROPHYSIQUES :

A.) Les analyses conventionnelles :

Les résultats des analyses pétrophysiques conventionnelles effectuées dans les conditions normales de pression et de température sur l'ensemble des échantillons sont regroupés dans le tableau ci dessous :

<i>Drain</i>	<i>N°Ech</i>	<i>Cote (m)</i>	<i>Porosité (%)</i>	<i>Perméabilité (mD)</i>	<i>Densité (g/cm³)</i>
D5	1	3392,55	4.91	43.03 Fissuré	2.60
	2	3399,42	2.08	0.02	2.63
	3B	3418,20	5.58	0.14	2.62
	3A	3419,05	5.69	0.38	2.63
	3C	3419,83	6.47	2.86	2.62
D3	4A	3429,35	9.90	4.31	2.62
	4B	3430,75	2.63	0.05	2.60
	5B	3443,65	2.49	0.03	2.62
D2	5A	3444,85	8.13	0.56	2.62
	6A	3466,15	8.13	0.43	2.61
ID	6B	3469,13	2.92	0.03	2.70
	6C	3475,55	7.57	0.38	2.62

Tableau IV.1 : Caractéristiques pétrophysiques des échantillons

Les figures (IV.2.a) et (IV.2.b) montrent respectivement les valeurs des porosités et perméabilités enregistrées.

Selon la classification donnée en annexe A (adoptée par [55]), nous remarquons que les caractéristiques pétrophysiques des échantillons sont faibles.

- **La porosité** est faible à médiocre dans le cas des échantillons n° 1, 2, 3A, 3B et 3C prélevés dans le drain D5 (entre 3390 et 3420m). Elle est très faible lorsqu'on approche la cote 3400m (échantillon n°2).

La plus importante valeur de la porosité (9.9%) est enregistrée à la cote 3429.35m (échantillon n°4A) située dans le drain D3. Les deux autres échantillons prélevés dans ce même drain (4B et 5B) ont une faible porosité ($\approx 2.5\%$).

Les deux échantillons prélevés dans le drain D2 (5A et 6A) ont la même porosité (8.13%), celle ci est médiocre selon la classification en annexe A .

Enfin, les deux échantillons prélevés dans l'Inter drain ID (6B et 6C) ont des porosités différentes. Elle est faible pour l'échantillon 6B et médiocre pour le 6C.

Lorsque nous comparons ces résultats à ceux enregistrés in situ, il nous paraissent globalement très différents.

- **La perméabilité** est faible à très faible. Elle atteint la plus grande valeur (4.31mD) à la cote 3429.35m. Celle-ci est classée faible selon l'annexe B.

N.B.: L'échantillon n°1 est à écarter, car la grande valeur de perméabilité que nous avons enregistré dessus est due à l'existence d'une fissure très visible au sein de sa matrice.

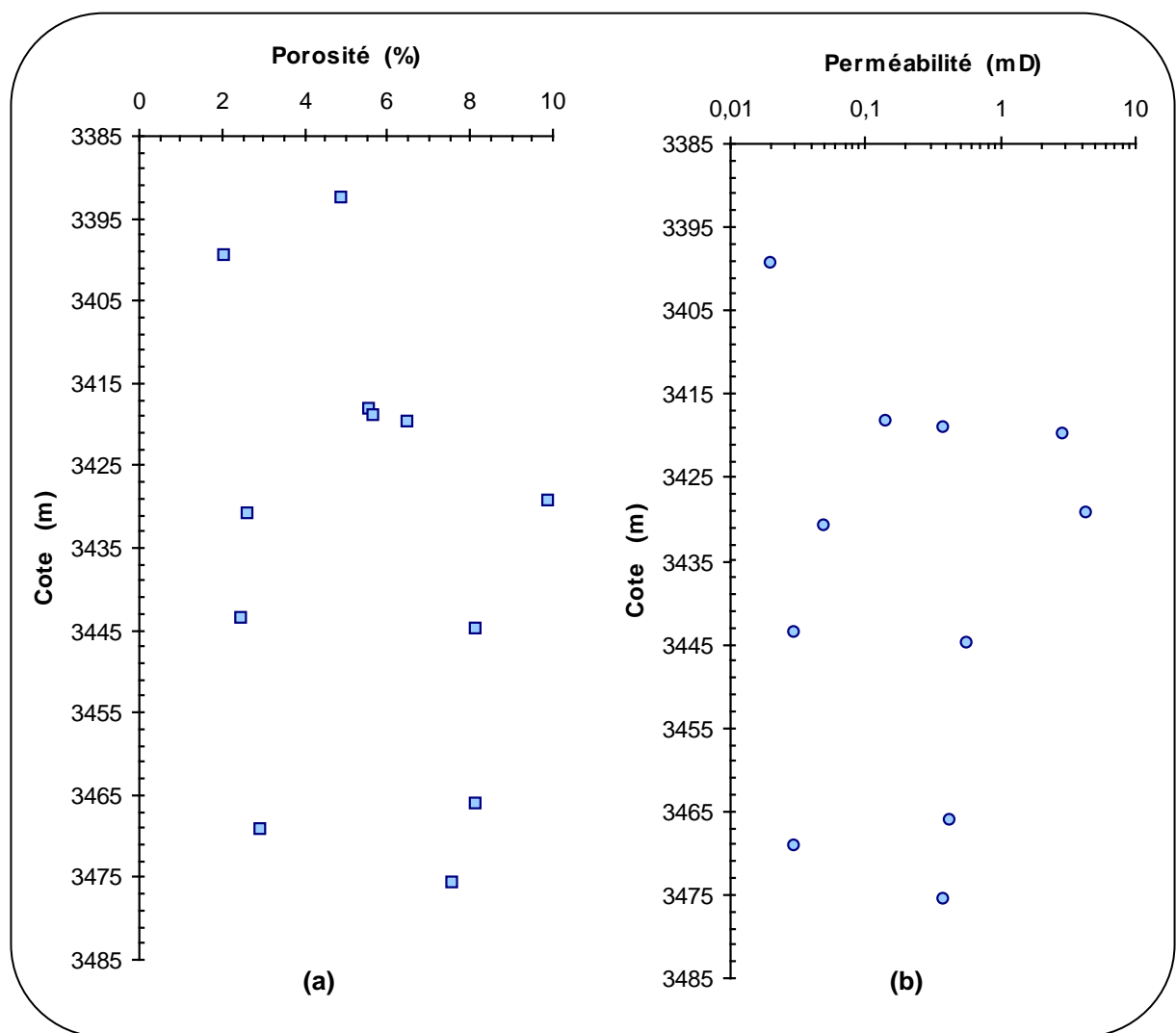


Fig. IV.2 : Résultats des analyses pétrophysiques conventionnelles

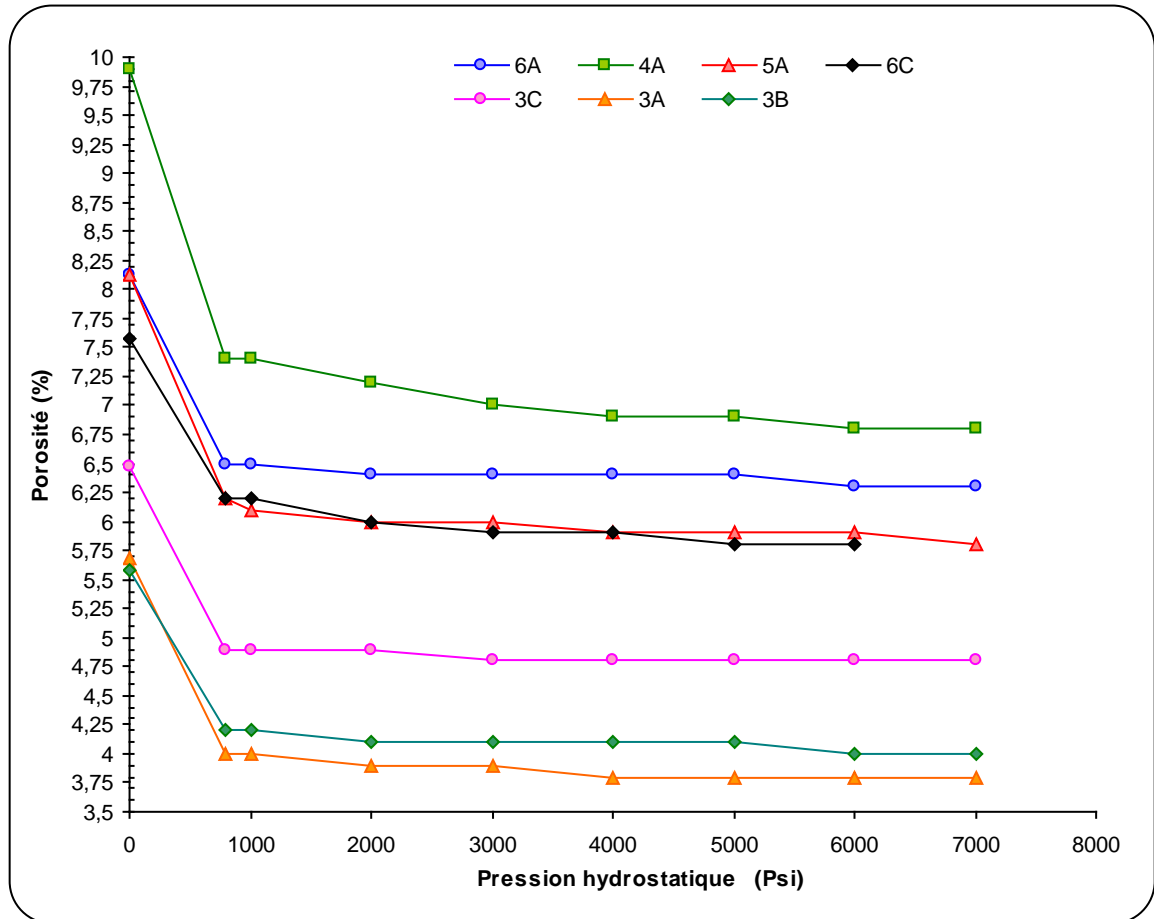
- La densité des échantillons varie entre 2.60g/cm^3 et 2.70g/cm^3 .

Conclusion :

Tout en étant quantitativement différents, les résultats des essais in situ et ceux du laboratoire conduisent à conclure que la roche réservoir en question est peu poreuse et faiblement perméable.

B.) Les analyses spéciales :

Des mesures identiques sur les échantillons soumis au chargement hydrostatique montrent que les propriétés pétrophysiques des roches varient en fonction de la pression appliquée. Nous observons sur les figures (IV.3) et (IV.4) que la porosité et la perméabilité décroissent quand la pression augmente.



Pression [Psi]	800	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
Pression [MPa]	5.44	6.80	13.61	20.41	27.21	34.01	40.82	47.62

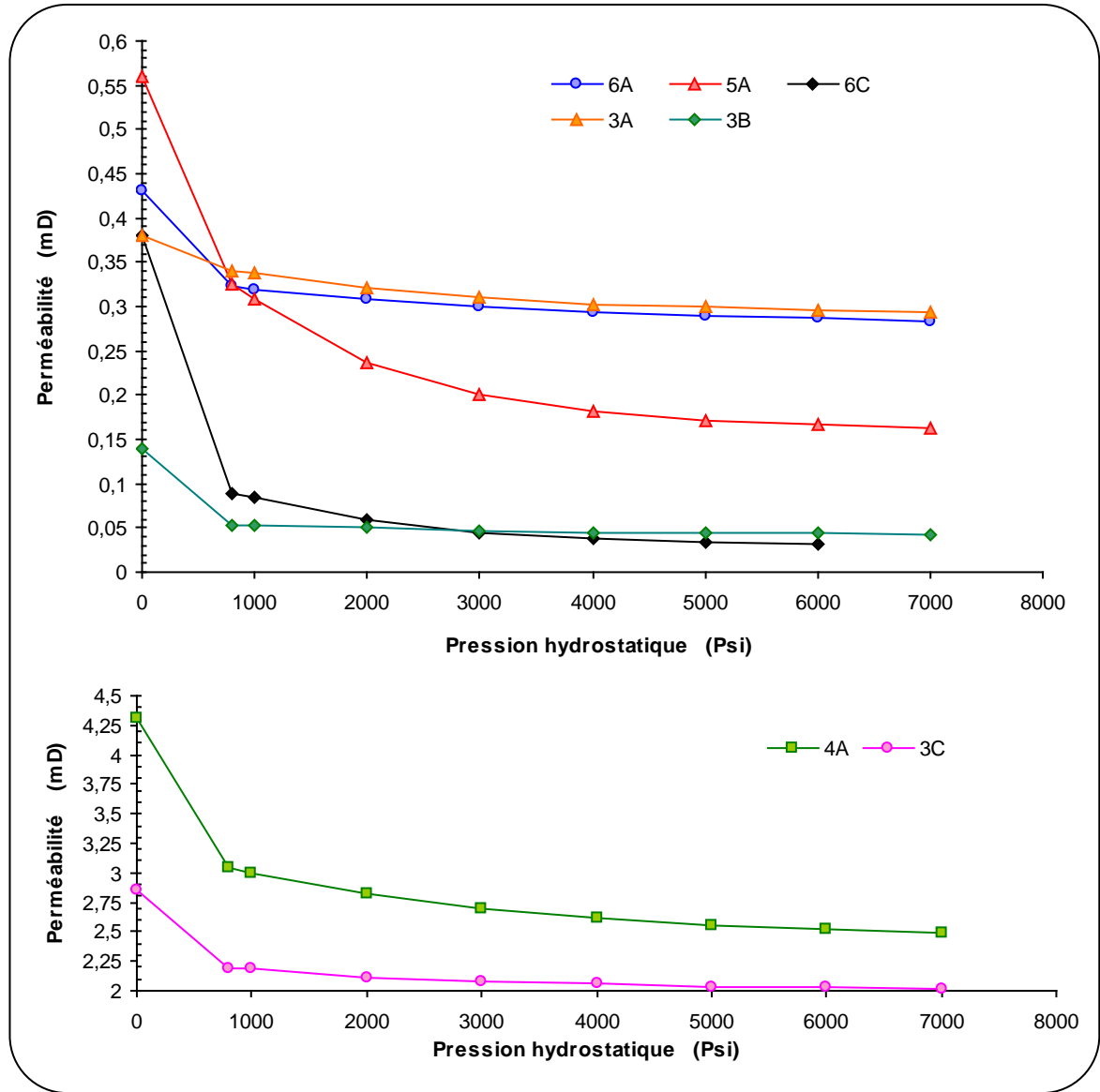
Fig.IV.3 : Variation de la porosité en fonction de la pression hydrostatique

Cette diminution n'est pas linéaire, et peut être caractérisée comme suit : une diminution très rapide dans l'intervalle de pression allant de 0 à 800Psi (5.44 MPa), puis une réduction du taux de cette diminution au fur et à mesure que la pression augmente.

Cette diminution de la valeur des porosités et perméabilités est attribuée à la fermeture des microfissures existantes à l'intérieur des échantillons. Ces microfissures apparaissent quand les carottes extraites du fond du puits sont remontées en surface, et que la matrice de la roche se développe dans toutes les directions suite à la suppression des forces qui agissaient dessus. Ces microfissures appelées "microfissures jeunes" (voir III.3.1.4), se referment graduellement sous

l'effet de la pression appliquée. Les propriétés pétrophysiques ainsi mesurées sont plus représentatives des caractéristiques initiales de la roche avant son extraction du fond du puits.

Pour la plupart des échantillons, nous remarquons une stabilisation notable de la porosité et de la perméabilité à partir d'une pression d'environ 6000Psi (≈ 41 MPa).



Pression [Psi]	800	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
Pression [MPa]	5.44	6.80	13.61	20.41	27.21	34.01	40.82	47.62

Fig.IV.4 : Variation de la perméabilité en fonction de la pression hydrostatique

N.B:

- Au cours de ces analyses, quatre échantillons ont été rejetés à cause de leur très faible perméabilité. Les échantillons en question sont le n°2, 4B, 5B et 6B.
- L'échantillon n°1, initialement fissuré n'a pas résisté à l'effet du chargement hydrostatique appliqué, ce qui a conduit à sa rupture.

IV.2.2. RESULTATS DES TESTS DESTINES A LA DETERMINATION DU VOLUME D'ARGILE

A.) L'analyse pétrographique sur des lames minces :

Une observation microscopique sur lames minces a permis de faire une première description pétrographique des échantillons testés, ainsi qu'une estimation du volume d'argile contenu dans leur matrice.

Les résultats obtenus montrent qu'il s'agit en général de grès, contenant des éléments argileux à différents pourcentages et des traces de micas pour certains.

N° éch.	Cote(m)	Caractérisation	% Argile
1	3392,55	Grès moyen à grossier, silico-argileux (l'argile inter granulaire est kaolinitique). Présence de micro fissures ouvertes.	5
2	3399,42	Argile silteuse, micacée.	70
3A	3419,05	Grès quartzitique.	1
3B	3418,20	Grès moyen silico argileux.	5
3C	3419,83	Grès silico argileux. L'argile est essentiellement kaolinique + traces d'illite liée à la transformation des micas blancs (muscovite).	2
4A	3429,35	Grès moyen silico argileux.	8
4B	3430,75	Argile illitique , argile silto- gréseuse, micacée.	80
5A	3444,85	Argile inter granulaire (kaolinitique). Grès moyen silico argileux.	5
5B	3443,65	Argile illitique , laminée, micacée, silteuse.	75
6A	3466,15	Grès silico argileux. L'argile est essentiellement kaolinique + traces d'illite liée à la transformation des micas blancs (muscovite).	8
6B	3469,13	Argile déssiminée + argile structurale , micacée.	30
6C	3475,55	Argile inter granulaire (kaolinitique). Grès moyen silico argileux.	5

Tableau IV.2 : Résultats de l'analyse pétrographique sur lames minces

Les photos IV.1 et IV.2 sont prises sur les lames minces réalisées à partir des échantillons. Nous pouvons observer sur la photo n°1 la composition de l'échantillon 4A prélevé à la profondeur 3429.35m. Les grains de Quartz sont nettement visibles, l'espace poreux est en grande partie intergranulaire.

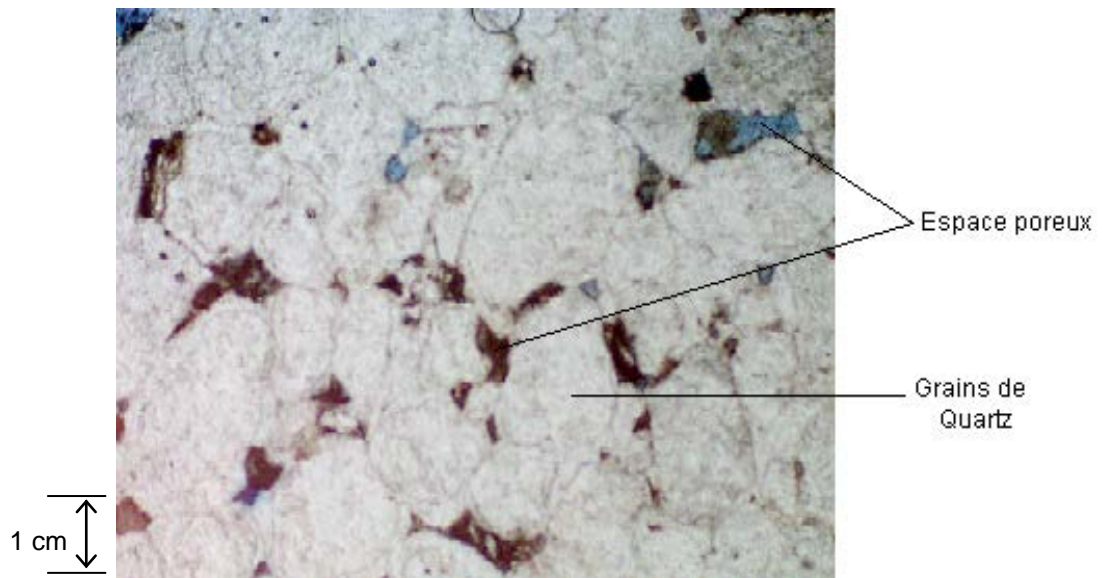


Photo IV.1 : Echantillon 4A observé au microscope optique sur une lame mince

La photo n°2 a été prise sur le même échantillon, en utilisant une lumière polarisée.

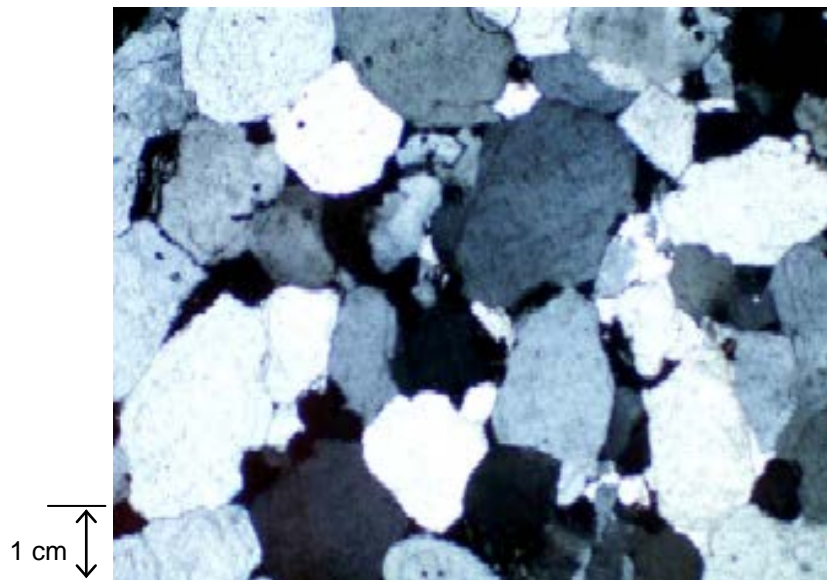


Photo IV.2 : Echantillon 4A observé au microscope optique sur une lame mince - Lumière polarisée

B.) Diffraction de Rayons X :

Les résultats obtenus par une diffraction aux rayons X sont donnés sur le tableau ci après:

N° éch.	Cote (m)	% MINÉRAUX NON ARGILEUX	% MINÉRAUX ARGILEUX			
		Quartz	Kaolinite	Illite	Chlorite	% argile
1	3392,55	98	/	traces	traces	2
2	3399,42	30	35	60	5	70
3A	3419,05	96	/	/	/	/
3B	3418,20	98	35	65	traces	2
3C	3419,83	98	/	/	/	/
4A	3429,35	98	40	60	/	2
4B	3430,75	70	45	50	5	30
5A	3444,85	98	traces	traces	/	2
5B	3443,65	30	55	45	traces	70
6A	3466,15	98	90	10	/	2
6B	3469,13	50	65	35	/	50
6C	3475,55	96	traces	/	/	4

Tableau IV.3 : Résultats de l'analyse RX

Les valeurs obtenues montrent que les échantillons sont des grès composés essentiellement de quartz (minéral prédominant). Le pourcentage de celui-ci se rapproche de 100% dans le cas de la majorité des échantillons ($\approx 97\%$), et pour les autres il est compris entre 30% et 70%.

Le pourcentage des minéraux argileux est élevé (compris entre 30 et 70%) dans le cas des échantillons 2, 4B, 5B et 6B, mais tend vers zéro pour le reste. Les minéraux argileux présents dans les échantillons sont : la kaolinite, l'illite et la chlorite.

C.) L'analyse granulométrique laser :

La texture des échantillons analysés est donnée sur le tableau IV.4. Le taux d'argile est très faible ($0\% \leq V_{sh} \leq 5\%$) pour tous les échantillons à l'exception du N°2 où il atteint 13.34%.

Nous observons un taux élevé de sable pour la majorité des échantillons ($> 50\%$) à l'exception du N°2, où il équivaut 2.65%.

Le pourcentage de silt est élevé dans le cas des échantillons 2, 4B et 6B ($> 40\%$), et varie entre 3% et 30% pour les autres.

N° Ech.	Cote (m)	Argile (%)	Silt (%)	Sable (%)
1	3392,55	1,57	11,2	87,23
2	3399,42	13,34	84,01	2,65
3A	3419,05	0,82	5,12	94,06
3B	3418,20	1,41	14,02	84,57
3C	3419,83	0,63	6,28	93,09
4A	3429,35	0,365	3,55	95,385
4B	3430,75	5,53	41,67	52,8
5A	3444,85	1,15	10,2	88,65
5B	3443,65	4,4	29,81	65,79
6A	3466,15	1,52	13,99	84,49
6B	3469,13	3,05	39,07	57,88
6C	3475,55	0,285	4,12	95,265

Tableau IV.4 : Texture des échantillons (analyse granulométrique laser)

N.B : La classification utilisée pour l'interprétation des résultats de la granulométrie laser est la classification Wentworth (annexe C).

IV.2.3. RESULTATS DES ESSAIS MECANIKES DYNAMIQUES

Les temps de propagation des ondes P et S ont été mesurés pour plusieurs paliers de pression hydrostatique : 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 et 50 MPa.

Notons que la valeur de la pression isotrope appliquée sur les échantillons au cours de ces essais a été justifiée au paragraphe III.3.1.4 puis confirmée par les résultats des analyses pétrophysiques effectuées sous contraintes. Cette valeur est supérieure à la pression de fermeture des microfissures qui avoisine 40MPa.

Les figures (IV.5)et (IV.6) montrent respectivement l'évolution des vitesses de propagation des ondes longitudinales P et transversales S calculées en utilisant la formule (III.16), en fonction de la pression appliquée.

Une première analyse des courbes montre que la vitesse de propagation des ondes P et S augmente avec l'accroissement de la pression hydrostatique. Cette évolution n'est pas linéaire, et le taux d'augmentation varie d'un échantillon à un autre. Cette augmentation est attribuée à la fermeture des microfissures créés suite au relâchement des carottes , ce qui induit une diminution du temps de parcours des ondes à travers les échantillons, et par conséquent une augmentation de la vitesse.

Pour la majorité des échantillons, les vitesses se stabilisent à partir d'une pression de 40MPa.

N.B : Pour certains échantillons, les mesures n'ont pas été enregistrées pour les faibles valeurs de pression (<10MPa), à cause de la forte atténuation des ondes.

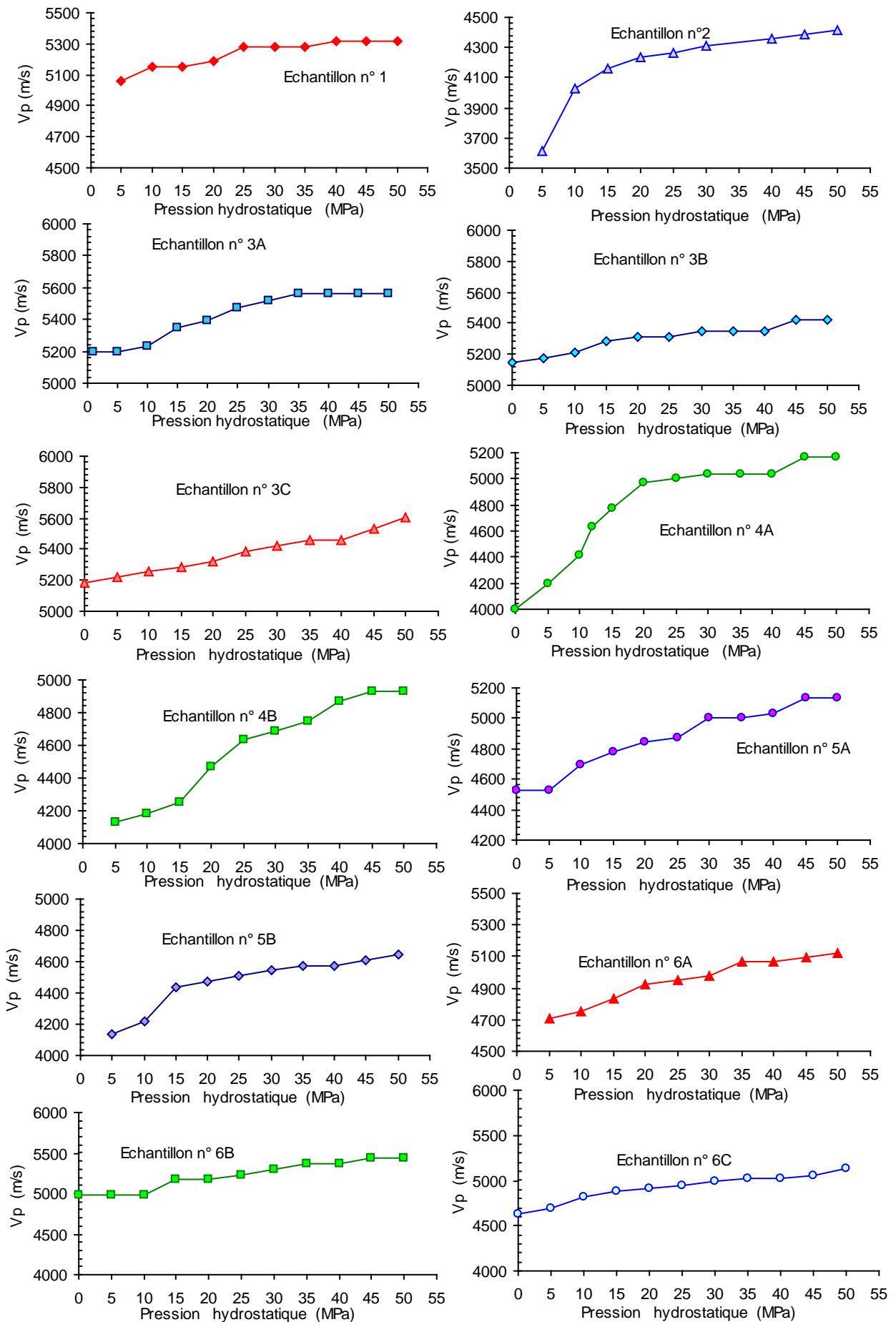


Fig. IV.5 : Variation de la vitesse des ondes de compression en fonction de la pression hydrostatique

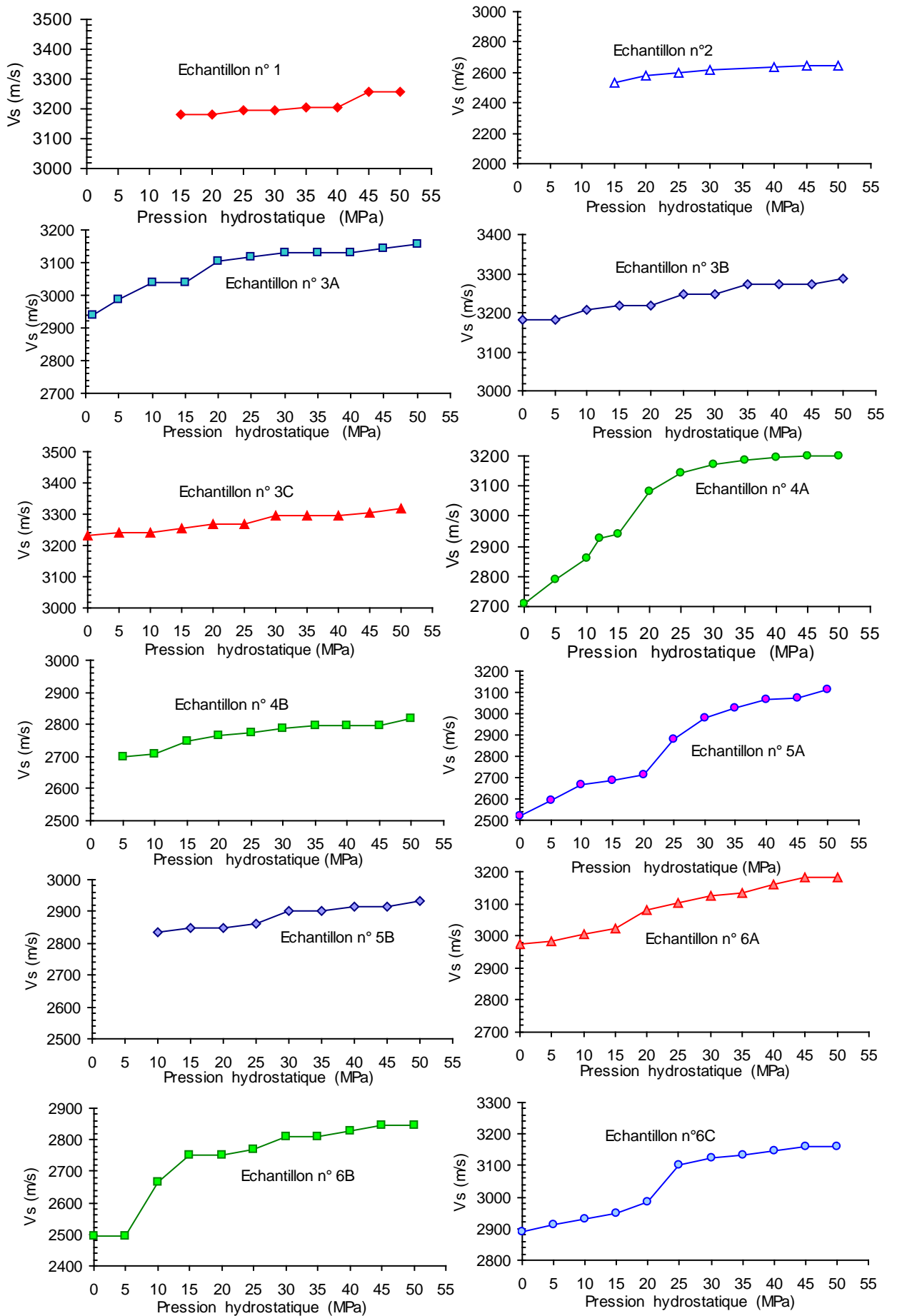


Fig. IV.6 : Variation de la vitesse des ondes de cisaillement en fonction de la pression hydrostatique

CHAPITRE V

EXPLOITATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

L'objectif principal de cette étude étant d'acquérir une meilleure connaissance du comportement mécanique de la roche réservoir de Hassi Messaoud, nous avons exploité les résultats de manière à montrer la variation du module de Young dynamique en fonction de certains paramètres comme la pression, la porosité et le contenu en argile.

Les résultats des essais mécaniques dynamiques effectués au laboratoire seront ensuite comparés aux résultats de la diagraphie sonique, en analysant les différents facteurs responsables de l'écart qui existe entre les deux mesures.

Puis, ayant cet ensemble intéressant de données, nous avons jugé utile de les combiner afin d'établir une corrélation applicable à la roche réservoir de Hassi Messaoud.

V.1. INFLUENCE DE LA POROSITE ET DU CONTENU EN ARGILE SUR LES VITESSES DES ONDES ACOUSTIQUES

V.1.1. Variation des vitesses des ondes P et S en fonction de la porosité :

La figure (V.1) montre la variation des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques à travers les échantillons en fonction de la porosité. Les valeurs représentées en ordonnées sont les vitesses de propagation des ondes longitudinales P et transversales S mesurées sous un chargement hydrostatique de 45MPa, et en abscisses les porosités mesurées dans les mêmes conditions de chargement.

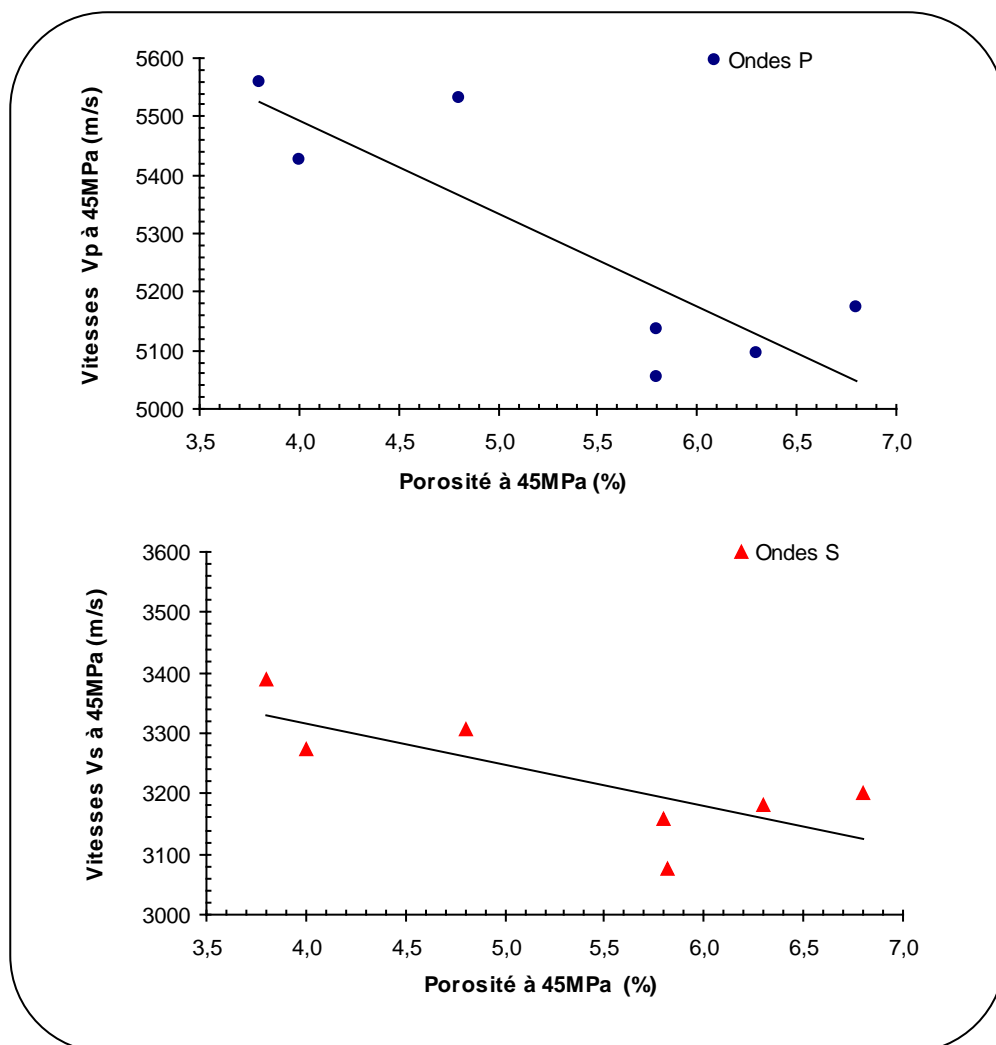


Fig. V.1 : Variation des vitesses de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S en fonction de la porosité

En première approximation, la courbe de tendance montre que la vitesses des ondes diminue avec l'augmentation de la porosité, ce qui est conforme aux résultats des travaux cités en analyse

bibliographique. Ceci s'explique par le fait que le milieu devient de plus en plus rigide quand la porosité diminue, et les vitesses des ondes ont ainsi tendance à se rapprocher des vitesses du solide sans porosité.

V.1.2. Variation des vitesses des ondes P et S en fonction du contenu en argile :

Comme nous l'avons cité en III.3.3, la détermination du pourcentage d'argile contenu dans les échantillons nécessite la réalisation de plusieurs tests de laboratoire.

Nous présentons dans ce qui suit une comparaison entre les résultats obtenus, en citant les avantages et inconvénients de chaque procédé afin de faciliter le choix des valeurs à considérer.

A.) Détermination du pourcentage d'argile contenu dans les échantillons - Choix de la méthode :

Le tableau (V.1) regroupe les résultats des trois procédés destinés à la détermination du pourcentage d'argile contenu dans chaque échantillon, à savoir : l'analyse granulométrique laser, l'analyse pétrographique sur lames minces et la diffractométrie aux rayons X. Les résultats obtenus par la diagraphie Gamma Ray sont également présentés sur le tableau afin de les comparer aux résultats de laboratoire.

N° éch.	G.Laser (%)	RX (%)	Lames minces(%)	G.Ray (%)
2	13.34	70	70	20
4B	5.53	30	80	5.2
5B	4.4	70	75	4.7
6B	3.05	50	30	2.8
1	1.57	2	5	3
3A	0.82	/	1	1.8
3B	1.41	2	5	3.4
3C	0.63	/	2	3.3
4A	0.365	2	8	4.9
5A	1.15	2	5	7.5
6A	1.52	2	8	5
6C	0.285	4	5	8

Tableau V.1 : Résultats des essais destinés à l'estimation du volume d'argile dans les échantillons

Les résultats montrent que les valeurs du pourcentage d'argile varient d'un procédé à l'autre :

Une question se pose à ce niveau : " *A quoi est dû cet écart ? et quelles sont les valeurs à considérer pour la suite de nos interprétations ?* ".

Afin de répondre à cette question, il est nécessaire de d'analyser les avantages et inconvénients de chaque procédé :

- *l'analyse pétrographique sur lames minces* : dans cette méthode, la détermination du pourcentage de minéraux argileux présents dans l'échantillon se base essentiellement sur une estimation à l'œil. Dans ce cas, les silts très fins ($2\ \mu\text{m} < \Phi < 4\ \mu\text{m}$), fins ($4\ \mu\text{m} < \Phi < 8\ \mu\text{m}$) et moyens ($8\ \mu\text{m} < \Phi < 16\ \mu\text{m}$) sont difficilement distingués des argiles ($\Phi < 2\ \mu\text{m}$), ce qui peut induire une surestimation de la quantité d'argile contenue dans l'échantillon.

- *l'analyse par diffractométrie des Rayons X*: c'est une méthode qualitative et semi quantitative, c'est à dire qu'elle est destinée à la détermination de la nature des minéraux argileux présents dans la matrice plutôt que leur quantité.

Cette méthode consiste à estimer le pourcentage de minéraux non argileux (Quartz, Calcite, Dolomite, Pyrite, Feldspaths.....etc.) et de déduire par la suite le pourcentage de minéraux argileux en considérant que :

le % de minéraux non argileux + le % de minéraux argileux + indosés + matières organiques = 100%

Cependant, le pourcentage d'argile est souvent calculé comme suit :

% de minéraux argileux = 100% - % de minéraux non argileux

ce qui induit une surestimation du % d'argile puisque les indosés et matières organiques ne sont pas pris en considération.

D'autre part, les silts fins sont difficilement repérables à cause de leur faible rayonnement (silice amorphe). Dans ce cas, les minéraux non argileux sont sous estimés (puisque les silts fins ne sont pas pris en compte), et par conséquent les minéraux argileux sont estimés par excès.

- *l'analyse granulométrique laser* : ce procédé consiste à détecter le diamètre de chaque grain présent dans l'échantillon analysé, ainsi des erreurs sont susceptibles d'être commises dans le cas d'une mauvaise désagrégation.

En considérant que la désagrégation ou séparation des grains est bien faite, l'erreur commise sur les résultats de la mesure devrait être négligeable.

N.B : Notons également que l'échantillonnage peut être considéré comme une source d'écart entre les résultats des trois procédés.

En examinant les résultats des mesures, et en tenant compte des avantages et inconvénients de chaque type d'essai, nous avons dégagé les conclusions suivantes :

- L'écart qui existe entre les résultats obtenus par RX et lames minces, et ceux donnés par granulométrie laser dans le cas des échantillons argileux 2, 4B, 5B et 6B peut être expliqué par le fait que les valeurs données par RX et lames minces sont surestimées, puisque ces échantillons contiennent un important taux de silts très fins, fins et moyens (voir tableau IV.4.).
- Dans le cas des échantillons peu argileux (1, 3A, 3B, 3C, 4A, 5A, 6A et 6C), l'écart est moins important puisque ces échantillons ne contiennent pas un important taux de silts.

A partir des observations citées précédemment, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- Pour l'estimation du pourcentage d'argile contenu dans les échantillons, il est préférable de procéder par une analyse granulométrique laser, puisque cette méthode donne des résultats satisfaisants par rapport à la diffractométrie RX et l'analyse pétrographique sur lames minces.
- Pour déterminer le type des minéraux argileux contenus dans la matrice, il est nécessaire d'effectuer une diffractométrie aux rayons X.
- L'analyse pétrographique sur lames minces est plus adaptée dans le cas de l'étude de la distribution des minéraux argileux au sein de la matrice.

L'écart entre les valeurs obtenues par G. laser et celles enregistrées par Gamma Ray de fond peut être dû à la variation des conditions d'essai entre le laboratoire et le fond. Rappelons que le recalage des cotes peut également être une source d'écart entre les deux résultats.

CONCLUSION :

Tenant compte des conclusions citées précédemment, les valeurs que nous allons considérer pour la suite de nos interprétations sont les résultats de la granulométrie laser.

B.) Influence du contenu en argile sur les vitesses des ondes acoustiques :

Afin de montrer l'influence de la présence des minéraux argileux dans la matrice rocheuse sur les propriétés acoustiques des grès de Hassi Messaoud, les vitesses de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S mesurées à 45MPa sont représentées en fonction du pourcentage d'argile (déterminé par granulométrie laser) contenu dans chaque échantillon (fig.V.2).

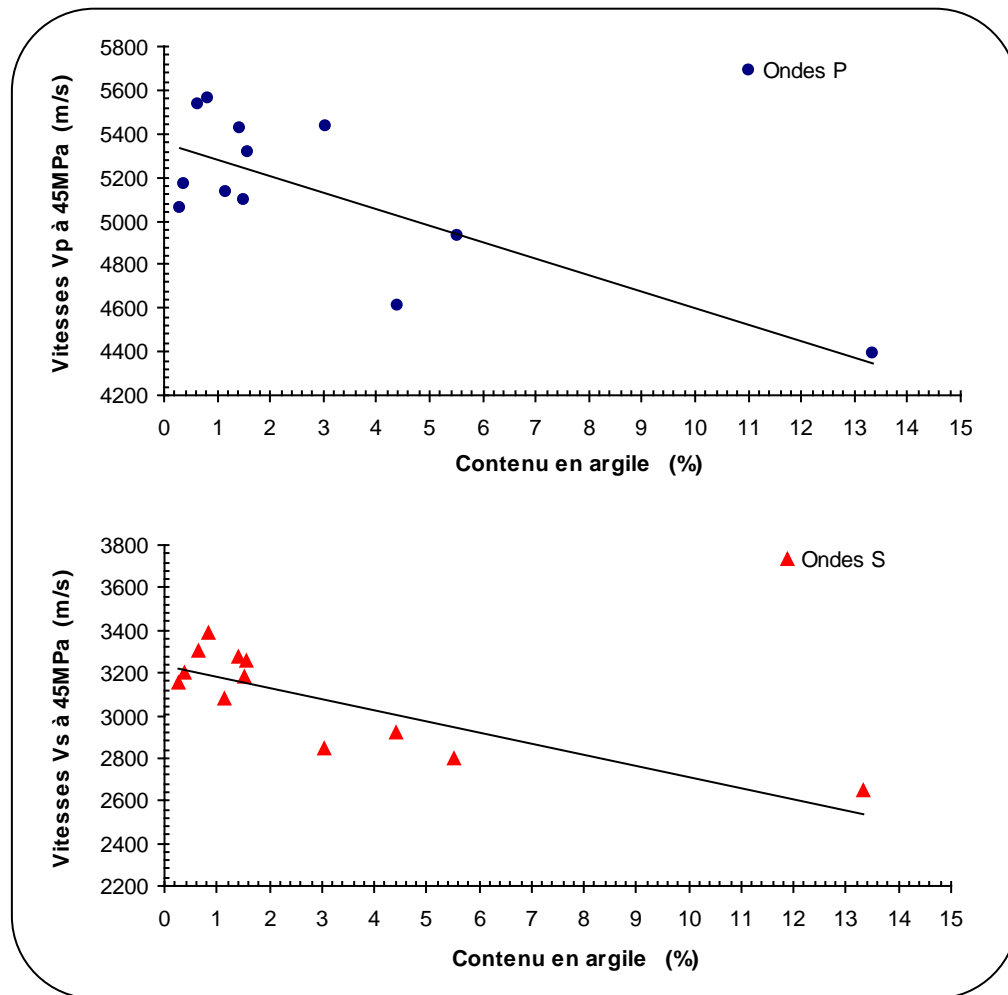


Fig. V.2 : Variation des vitesses de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S en fonction du contenu en argile.

La figure montre qu'en général, la vitesse des ondes acoustiques diminue avec l'augmentation du pourcentage d'argile. Ce résultat est conforme aux résultats de la littérature.

V.2. CALCUL DES PARAMETRES MECANQUES DYNAMIQUES

Les paramètres mécaniques dynamiques (E_{dy} , G_{dy} et v_{dy}) sont directement liés aux vitesses de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S par les formules données en III.3.4.

Un intérêt particulier a été accordé au module de Young, car c'est une caractéristique dont la connaissance est essentielle au bon déroulement des diverses opérations de l'exploitation des gisements.

V.2.1. Le module de Young dynamique E_{dy} :

Le module de Young dynamique est calculé en appliquant la formule (III.17), qui associe les vitesses d'ondes acoustiques (longitudinales et de cisaillement) à la valeur de la densité. Une valeur est obtenue pour chaque niveau de pression. Les résultats montrent que le module de Young dynamique de nos échantillons varie entre 44GPa et 72GPa.

V.2.1.1. Variation du module de Young dynamique en fonction de la pression hydrostatique :

Les courbes de la figure (V.3) donnent la variation du module de Young dynamique en fonction de la pression hydrostatique (pour chaque échantillon). Nous remarquons que le module de Young dynamique augmente avec l'accroissement de la pression. Cette évolution n'est pas linéaire et le taux d'augmentation varie d'un échantillon à un autre.

Cette augmentation traduit la rigidification de la matrice rocheuse, suite à la fermeture des microfissures sous l'effet de la pression appliquée.

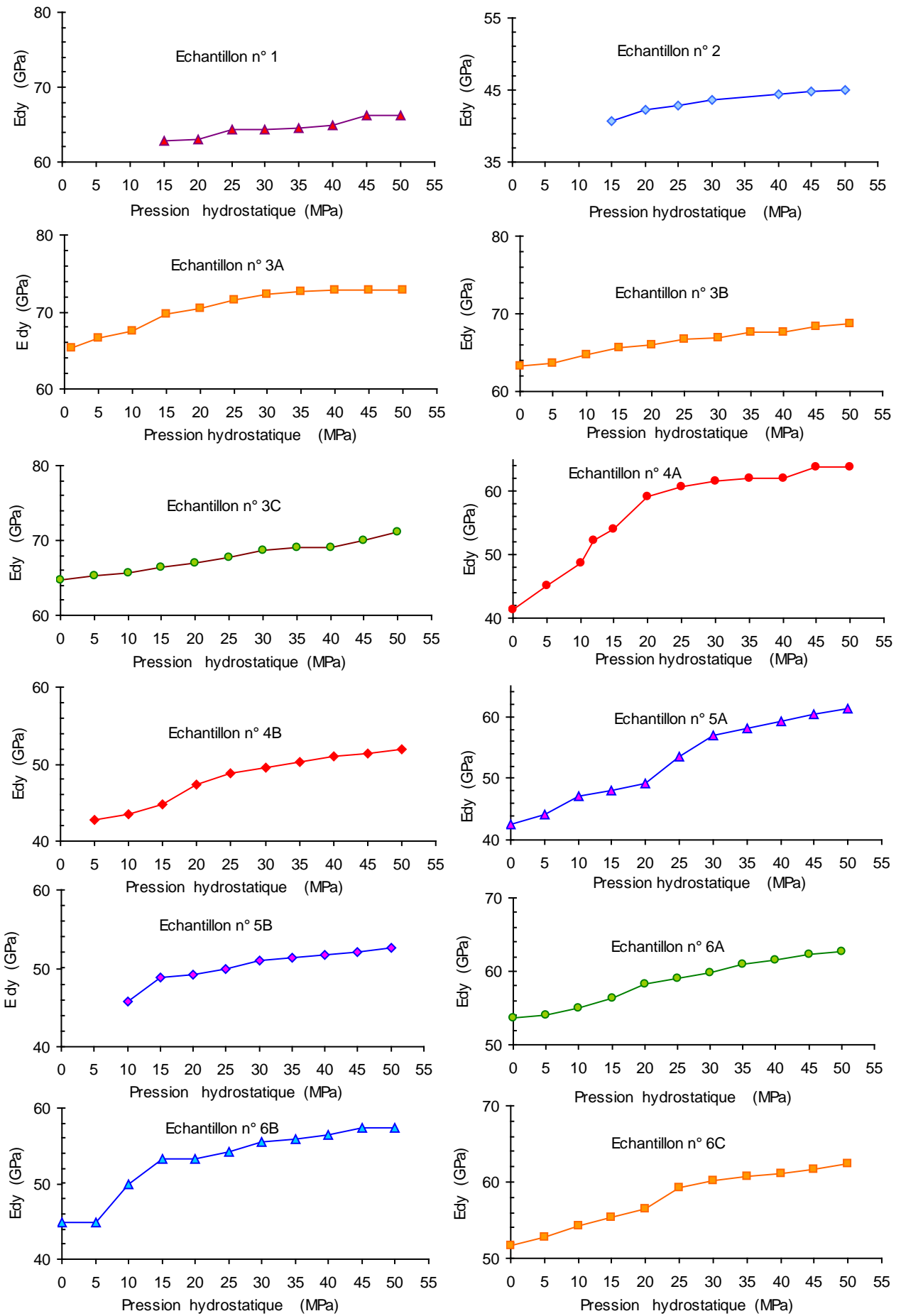


Fig. V.3 : Variation du module de Young dynamique E_{dy} en fonction de la pression hydrostatique

V.2.1.2. Variation du module de Young dynamique en fonction de la porosité :

La variation du module de Young dynamique mesuré sous un chargement hydrostatique de 45MPa, en fonction de la porosité mesurée dans les mêmes conditions de pression est présentée sur la figure (V.4).

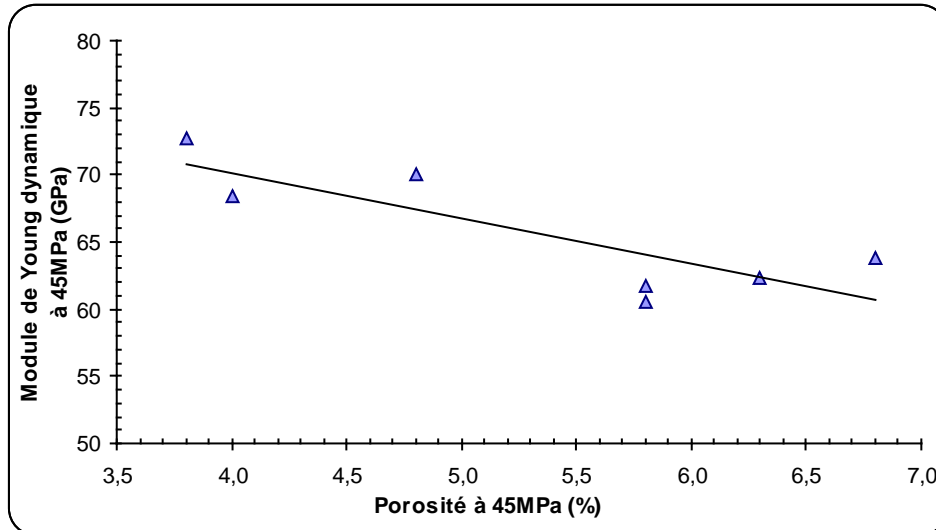


Fig. V.4. : Variation du module de Young dynamique en fonction de la porosité

La figure montre que le module de Young décroît avec l'augmentation du volume poreux contenu dans leur matrice. Ceci se comprend aisément : le milieu devient de moins en moins rigide quand le volume poreux augmente.

V.2.1.3. Variation du module de Young dynamique en fonction du contenu en argile :

La figure (V.5) montre la variation du module de Young dynamique enregistré sous un chargement hydrostatique de 45MPa, en fonction du pourcentage des minéraux argileux contenus dans les échantillons.

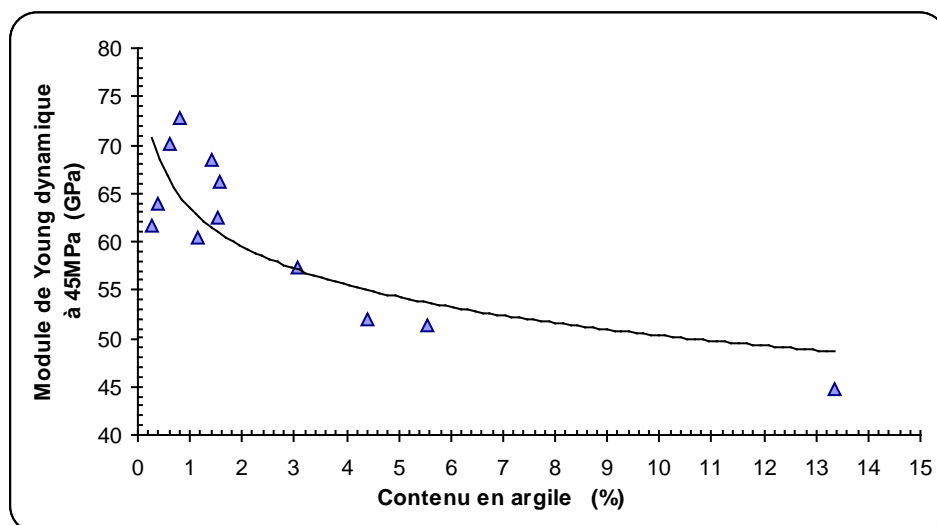


Fig. V.5. : Variation du module de Young dynamique en fonction du contenu en argile

Nous observons un décroissement de la valeur du module élastique dynamique avec l'augmentation du pourcentage d'argile. Ceci s'explique par le fait que la rigidité du grès diminue quand l'argilosité augmente, c'est à dire, quand un matériau de bonne qualité (de la silice) est remplacé par un autre constituant aux propriétés mécaniques inférieures : les argiles.

V.2.2. Le module de cisaillement dynamique G_{dy} :

Le module de cisaillement est une caractéristique qui intervient également dans certaines applications. Notons que les travaux de littérature s'intéressent généralement au module de Young de la roche réservoir et que les études concernant le module de cisaillement sont très rares.

V.2.2.1. variation du module de cisaillement dynamique G_{dy} en fonction de la pression hydrostatique:

Le module de cisaillement dynamique est calculé en appliquant la formule (III.19). Une valeur est obtenue pour chaque palier de pression, ce qui permet de tracer la courbe donnant sa variation en fonction de la pression hydrostatique (pour chaque échantillon). Les résultats montrent que le module de cisaillement dynamique augmente avec l'accroissement de la pression (fig.V.6).

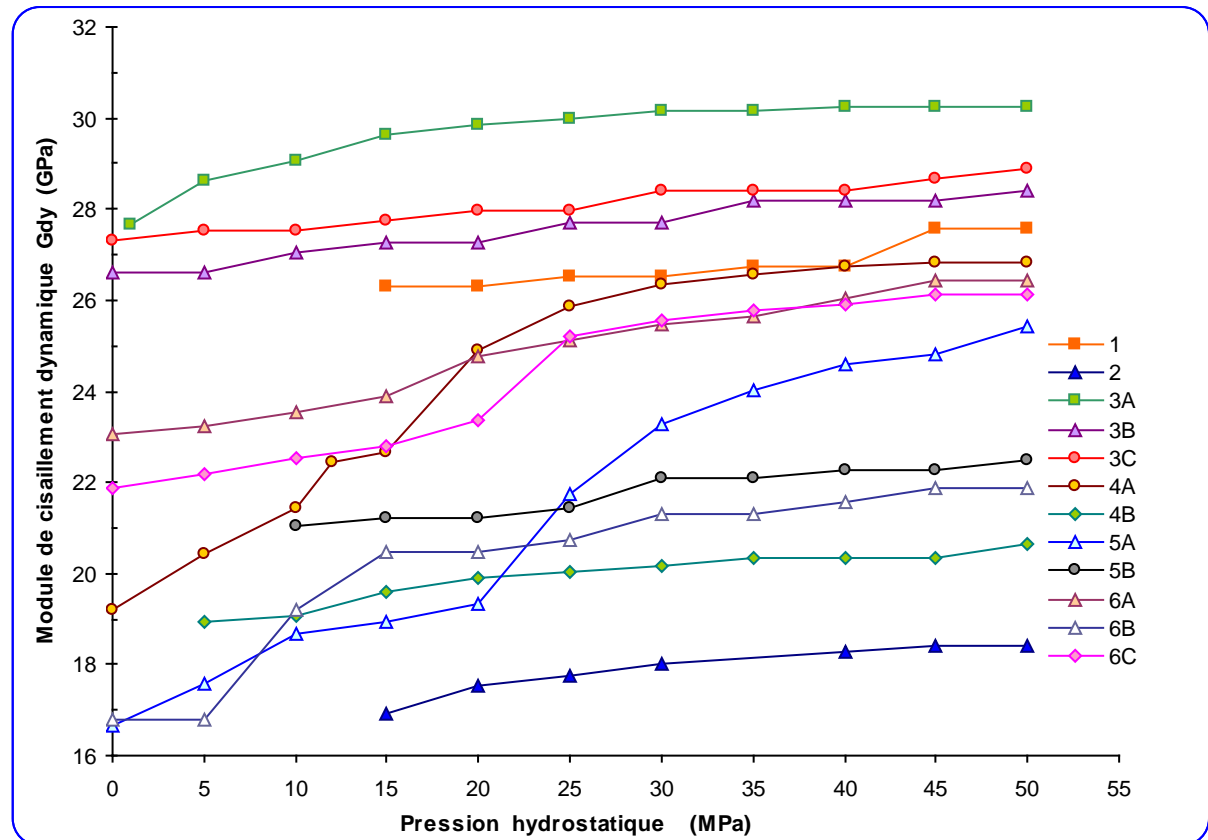


Fig. V.6 : Variation du module de cisaillement dynamique G_{dy} en fonction de la pression hydrostatique.

V.3. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS DES MESURES ACOUSTIQUES REALISEES IN SITU ET AU LABORATOIRE :

Sur la figure V.7, nous avons superposé l'ensemble des résultats des mesures acoustiques réalisées in situ et au laboratoire. Les valeurs dont nous disposons sont :

- Les vitesses de propagation des ondes P et S dans la formation, obtenues par une diagraphie sonique (V_p^{diag} et V_s^{diag} respectivement). Les valeurs sont données sur une hauteur de réservoir de 100 mètres avec un pas de 0.1524m. Dans ce cas, la roche est saturée, non fissurée (nous parlons ici des microfissures induites par le relâchement de la matrice rocheuse).
- Les vitesses de propagation des ondes P et S obtenues à partir d'un essai ultrasonique effectué sur les carottes récupérées sous pression atmosphérique (V_p^{atm} et V_s^{atm} respectivement). En tout, 135 points de mesure ont été enregistrés sur les 57 mètres de carottes récupérées. Dans ce cas, la roche est sèche et fissurée (relâchement de la matrice).
- Les vitesses de propagation des ondes P et S obtenues par le biais de l'essai dynamique effectué en utilisant la cellule triaxiale munie d'un sonique, sur des échantillons extraits dans le cœur des carottes et soumis à un chargement hydrostatique de 45MPa ($V_p^{45\text{MPa}}$ et $V_s^{45\text{MPa}}$ respectivement). Dans ce cas, la roche est sèche, non fissurée (les microfissures induites par le relâchement sont refermées sous l'effet de la pression hydrostatique appliquée).
- Les vitesses de propagation des ondes P et S à travers ces mêmes échantillons sous pression atmosphérique (V_{p1}^{atm} et V_{s1}^{atm} respectivement).

La figure (V.7) montre que :

Dans le cas des ondes de compression P :

- 1.) les vitesses mesurées sur les carottes (V_p^{atm}) sont inférieures à celles obtenues par diagraphie (V_p^{diag}). Ce résultat était attendu puisque :
 - la vitesse dans la roche fissurée (V_p^{atm}) < la vitesse dans la roche non fissurée (V_p^{diag}).
 - la vitesse dans la roche sèche (V_p^{atm}) < la vitesse dans la roche saturée (V_p^{diag}) [11].
 - 2.) les vitesses mesurées sur les échantillons sous un chargement hydrostatique de 45MPa ($V_p^{45\text{MPa}}$) se rapprochent des valeurs obtenues par diagraphie (V_p^{diag}). Ceci s'explique par le fait que les microfissures qui existent dans les échantillons (induites par le relâchement) se referment sous l'effet de la pression appliquée et ainsi les vitesses se rapprochent des vitesses in situ.
-

Dans le cas des ondes de cisaillement S :

- 1.) les vitesses mesurées sur les carottes (V_s^{atm}) sont inférieures à celles obtenues par diagraphie (V_s^{diag}). Comme pour les ondes P, ceci s'explique par le fait que la vitesse dans une roche fissurée est inférieure à la vitesse dans la même roche non fissurée. Dans ce cas, l'effet de la saturation est négligeable (les ondes de cisaillement ne se propagent pas dans les liquides).
- 2.) les vitesses mesurées sur les échantillons sous un chargement hydrostatique de 45MPa ($V_s^{45\text{MPa}}$) restent inférieures aux valeurs obtenues par diagraphie (V_s^{diag}).

Conclusion :

Les vitesses de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S mesurées au laboratoire sous pression atmosphérique (avant fermeture des microfissures) sont inférieures à celles enregistrées in situ par la diagraphie sonore.

Après restauration de l'état initial de la roche (fermeture des microfissures par application d'une pression isotrope de 45MPa), les vitesses des ondes P mesurées au laboratoire se rapprochent de celles données par la diagraphie sonore, mais elles restent inférieures dans le cas des ondes S.

Comme nous l'avons cité en analyse bibliographique, plusieurs facteurs sont susceptibles d'induire un écart entre les résultats des mesures réalisées in situ et celles effectuées au laboratoire :

- (a) les fréquences utilisées au laboratoire sont de l'ordre du MHz, alors que celles utilisées in situ sont de l'ordre de la dizaine de KHz. D'après la littérature, l'effet de la fréquence sur les mesures peut être assez considérable dans les milieux atténuants.
 - (b) In situ, la roche est soumise à un état de contrainte triaxial dont les composantes horizontales sont très mal connues. Au laboratoire, les échantillons sont soumis à un chargement hydrostatique simulant les conditions in situ.
 - (c) Les essais de laboratoire sont effectués sur des échantillons secs, ce qui n'est pas le cas in situ, puisque la roche contient différents fluides et à différentes proportions. Notre choix d'effectuer les essais sur des échantillons secs a été justifié en III.3.1.5, mais l'état de saturation de la roche peut être considéré comme une source d'écart entre les résultats des deux essais.
 - (d) L'effet de l'échelle : la diagraphie sonore est réalisée à l'échelle du mètre tandis que les mesures ultrasoniques au laboratoire sont réalisées à l'échelle du centimètre.
 - (e) L'existence d'éventuelles erreurs dans l'estimation de la valeur du recalage.
-

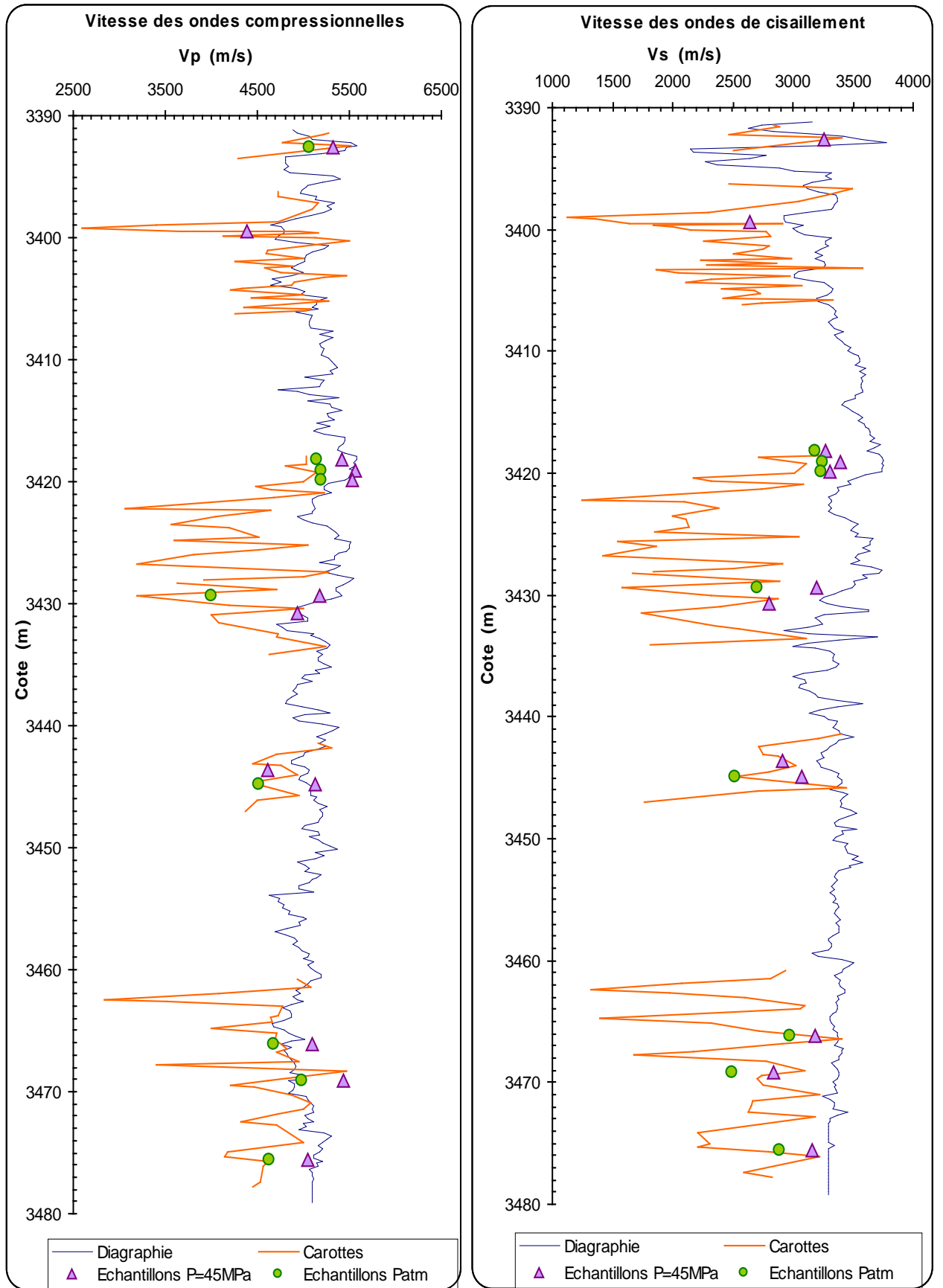


Fig. V.7 : Comparaison entre les vitesses mesurées in situ et au laboratoire

V.4. CORRELATIONS

Au laboratoire, la mesure des vitesses de propagation des ondes acoustiques est effectuée avec une bonne précision, sur des échantillons dont les caractéristiques sont bien connues. Malheureusement, les données ainsi obtenues ne sont pas disponibles sur toute la hauteur du réservoir, puisque la récupération des carottes n'est pas totale dans la majorité des cas.

Afin d'éviter ce manque de données, les réservoirs sont généralement caractérisés par le biais des mesures réalisées in situ. Dans ce cas, les enregistrements sont continus le long du réservoir, et les différentes caractéristiques de la roche sont obtenues en un temps relativement court. Cependant, plusieurs phénomènes (comme la présence de la boue de forage) influent sur la valeur des paramètres mesurés, d'où la nécessité d'introduire des corrections basées sur des mesures de laboratoire. Notre but étant de caractériser la roche réservoir de Hassi Messaoud de la meilleure façon possible en utilisant les mesures réalisées in situ, il serait très intéressant de combiner les résultats obtenus au laboratoire pour établir une corrélation destinée à être appliquée in situ pour estimer certaines caractéristiques de la roche.

Une question se pose à ce niveau : "*Doit-il exister un lien entre les différentes propriétés de la roche réservoir ? et si oui, quelle peut être la nature de cette dépendance ?*".

Nos résultats de laboratoire montrent que les vitesses de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S mesurées à travers les échantillons testés, varient en fonction de la porosité et du contenu en argile. De telles dépendances ont été constatées par plusieurs chercheurs qui se sont intéressés au développement de formules empiriques reliant entre les différentes caractéristiques de la roche, suite au manque de modèles physiques décrivant son comportement (voir analyse bibliographique). Ces formules empiriques apportent une description utile en ce qui concerne l'influence de quelques paramètres comme la pression effective, la porosité et le contenu en argile sur les vitesses. Néanmoins, les chercheurs précisent que les résultats obtenus concernent des échantillons bien déterminés et que l'extrapolation de ces résultats à d'autres échantillons ne peut être faite qu'avec une grande précaution.

Malgré le nombre insuffisant de données, nous avons jugé utile d'établir une corrélation en combinant les différents résultats que nous avons obtenu au laboratoire. Ces formules permettraient de faire une prédiction des vitesses de propagation des ondes, et par conséquent de se faire une idée sur les caractéristiques mécaniques dynamiques de la roche réservoir de Hassi Messaoud en ne connaissant que deux paramètres : la porosité et le contenu en argile.

Les données dont nous disposons sont :

- les vitesses de propagation des ondes P et des ondes S mesurées sur les échantillons sous une pression de 45MPa (V_P^{45MPa} et V_S^{45MPa} respectivement).
-

- les vitesses de propagation des ondes P et des ondes S mesurées sur les échantillons soumis à la pression atmosphérique (V_P^{atm} et V_S^{atm} respectivement).
- la porosité mesurée à 45MPa ($\Phi_{45\text{MPa}}$),
- le pourcentage d'argile contenu dans chaque échantillon V_{sh} (les résultats considérés sont ceux de la granulométrie laser).

En effectuant plusieurs régressions multilinéaires entre les différents résultats, nous avons obtenu deux types de corrélations, avec des coefficients acceptables :

V.4.1. CORRELATION N° 1 :

La première corrélation relie la vitesse de propagation des ondes acoustiques mesurée sur des échantillons soumis la pression hydrostatique ($V_P^{45\text{MPa}}$ et $V_S^{45\text{MPa}}$) à la porosité mesurée dans les même conditions de pression ($\Phi_{45\text{MPa}}$) et à l'argilosité (V_{sh}). Cette fonction a été obtenue par régression multilinéaire, avec un coefficient de corrélation de 0.86 pour les ondes P et 0.8 pour les ondes S.

D'après nos résultats, la vitesse des ondes acoustiques s'exprime en fonction de la porosité $\Phi_{45\text{MPa}}$ (en %) et de la teneur en argile V_{sh} (en %) par la relation suivante :

- Pour les ondes P :

Corrélation N°1 (a)

$$V_P^{45\text{MPa}} \text{ (m/s)} = - 68 V_{\text{sh}} \text{ (\%)} - 165.7 \Phi_{45\text{MPa}} \text{ (\%)} + 6226$$

Coefficient de corrélation : R = 0.86

Nombre d'échantillons : n = 7

- Pour les ondes S :

Corrélation N°1 (b)

$$V_S^{45\text{MPa}} \text{ (m/s)} = - 52.83 V_{\text{sh}} \text{ (\%)} - 73.3 \Phi_{45\text{MPa}} \text{ (\%)} + 3664$$

Coefficient de corrélation : R = 0.80

Nombre d'échantillons : n = 7

Ces relations répondent aux constatations déjà faites en ce qui concerne la variation des vitesses en fonction de la porosité et du contenu en argile. Les signes négatifs reflètent le fait que la vitesse dans la roche diminue si la porosité ou l'argilosité augmentent.

Sur le plan théorique, cette formulation est valable pour des porosités inférieures à 37.6% dans le cas des ondes P, et inférieures à 50% dans le cas des ondes S (au delà de ces limites, les vitesses deviennent négatives, alors que même à 100% de porosité, la vitesse mesurée devrait être celle des fluides en place).

Dans le pratique ce problème ne se pose pas dans le cas de la roche réservoir de Hassi Messaoud, puisque sa porosité n'atteint jamais des valeurs aussi importantes. Elle est généralement inférieure à 20%.

Afin de vérifier leur validité, ces formules ont été appliquées aux résultats des mesures diagraphiques enregistrées sur notre puits (MD#507). Ainsi, ayant les porosités et pourcentages d'argile mesurés sur toute la hauteur du réservoir, les vitesses de propagation des ondes P et des ondes S ont été calculées en utilisant les corrélations N°1(a) et N°1(b).

Nous constatons sur la figure (V.8) qui regroupe les résultats obtenus, que les valeurs qui résultent de l'application de la corrélation sont satisfaisantes, puisqu'on retrouve l'allure donnée par la diagraphie sonique. Les vitesses données par la corrélation sont inférieures à celles enregistrées in situ.

V.4.2. CORRELATION N° 2 :

La seconde corrélation relie les vitesses de propagation des ondes acoustiques mesurées sur des échantillons soumis à une pression hydrostatique de 45MPa (V_P^{45MPa} et V_S^{45MPa}), à la porosité mesurée dans les mêmes conditions de pression (Φ_{45MPa}), à l'argilosité (V_{sh}) et aux vitesses de propagation des ondes mesurées à la pression atmosphérique (V_P^{atm} et V_S^{atm}). Cette fonction a été obtenue par régression multilinéaire, avec un coefficient de corrélation proche de 0.86 pour les ondes P et 0.92 pour les ondes S.

D'après nos résultats, la vitesse des ondes acoustiques s'exprime en fonction de ces trois paramètres comme suit :

- Pour les ondes P :

Corrélation N°2 (a)	
$V_P^{45MPa} \text{ (m/s)} = 0.07 V_P^{atm} \text{ (m/s)} - 75.7 V_{sh} \text{ (\%)} - 142.7 \Phi_{45MPa} \text{ (\%)} + 5785$	
Coefficient de corrélation : R = 0.86	
Nombre d'échantillons : n = 7	

- Pour les ondes S :

Corrélation N°2 (b)

$$V_S^{45\text{MPa}} \text{ (m/s)} = 0.28 V_S^{\text{atm}} \text{ (m/s)} - 43 V_{\text{sh}} \text{ (\%)} - 21 \Phi_{45\text{MPa}} \text{ (\%)} + 2556$$

Coefficient de corrélation : R = 0.92

Nombre d'échantillons : n = 7

L'application de cette corrélation sur les données du puits MD#507 a été possible puisque nous disposons de 135 valeurs de vitesses d'ondes P et S mesurées à la pression atmosphérique (mesurées sur les carottes récupérées). Le log résultant de cette application est représenté sur la fig. (V.9) . Nous constatons que la courbe donnée par la corrélation suit l'allure du log sonique, et que les vitesses données par la corrélation sont inférieures à celles données par la diagraphie.

Cependant, cette formule n'est applicable que sur les parties du réservoir dont les carottes sont disponibles, puisqu'il est nécessaire d'avoir la vitesse mesurée directement sur les carottes.

V.4.3. CALCUL DES PARAMETRES MECANIQUES DYNAMIQUES :

Les modules de Young et de cisaillement dynamiques sont calculés en intégrant dans les formules III.17 et III.19 les valeurs des vitesses obtenues par l'application des corrélations n°1 et n°2.

Nous avons représenté sur la figure V.10 les deux logs du module de Young dynamique calculés à partir des vitesses mesurées par la diagraphie sonique et celles obtenues par les corrélations.

Nous remarquons que les deux courbes suivent globalement la même allure, et que les valeurs données par les corrélations sont inférieures à celles de la diagraphie. Les module de Young dynamiques mesurés sur échantillons au laboratoire (à 45MPa) sont compris entre les résultats de la diagraphie et ceux des corrélations.

Afin d'avoir une idée sur les valeurs du module de cisaillement dynamique, nous avons représenté sur la figure V.11 le log obtenu par l'application des corrélations et celui donné par diagraphie. Nous remarquons que les valeurs calculées à partir des résultats de la diagraphie sont supérieures à celles données par les formules. Les points qui représentent les valeurs mesurées au laboratoire à 45MPa se situent entre les deux logs.

CONCLUSION :

Les courbes qui résultent de l'application des deux corrélations montrent que les résultats sont satisfaisants. Les vitesses calculées par ces formules sont inférieures à celles données par la diagraphie sonore, ce qui était attendu puisque nous avons préalablement constaté que les vitesses mesurées au laboratoire, et qui ont servi à l'établissement de ces corrélations sont inférieures à celles enregistrées in situ.

La corrélation N°1 permet de déduire la vitesse de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S à travers la roche réservoir en connaissant sa porosité et son argilosité. Les vitesses ainsi calculées sont données sur toute la hauteur du réservoir, et le module de Young dynamique de la roche est alors déterminé en associant ces vitesses à la densité de la roche. A partir de ce résultat, nous pouvons reconstituer le log du module de Young dynamique sur les quelques centaines de puits qui n'ont pas bénéficié d'une diagraphie sonore.

La corrélation N°2 nécessite la connaissance de trois paramètres : la porosité, le pourcentage d'argile et la vitesse de propagation des ondes dans la roche sans la soumettre au chargement hydrostatique (sous pression atmosphérique). Dans ce cas il n'est possible de calculer les vitesses des ondes P et S que dans les zones dans lesquelles les carottes sont récupérées. Cette corrélation permet d'estimer les vitesses de propagation des ondes à pression atmosphérique.

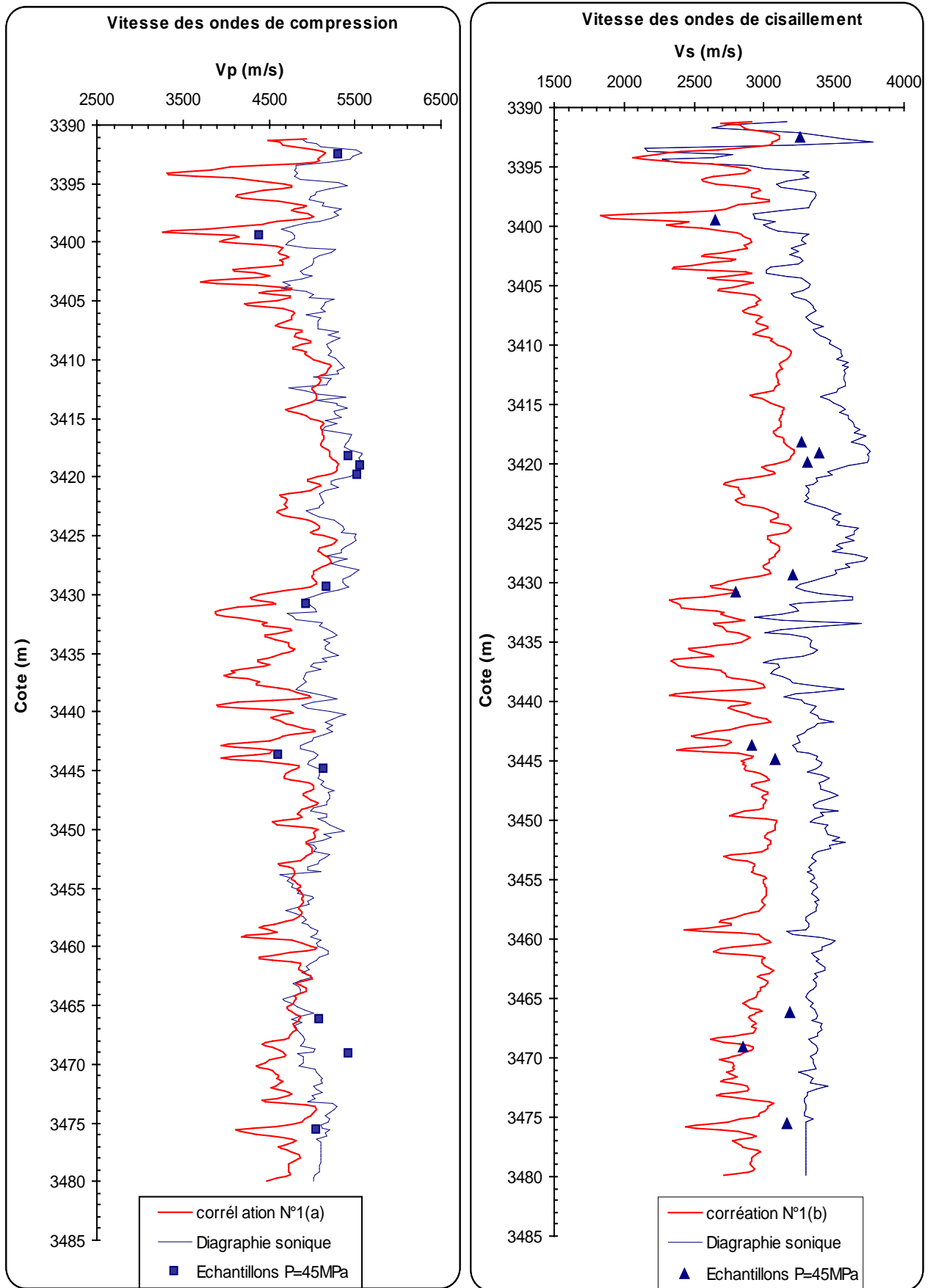


Fig.V.8 : Comparaison entre les vitesses obtenues par la corrélation n°1, par diagraphie et au laboratoire

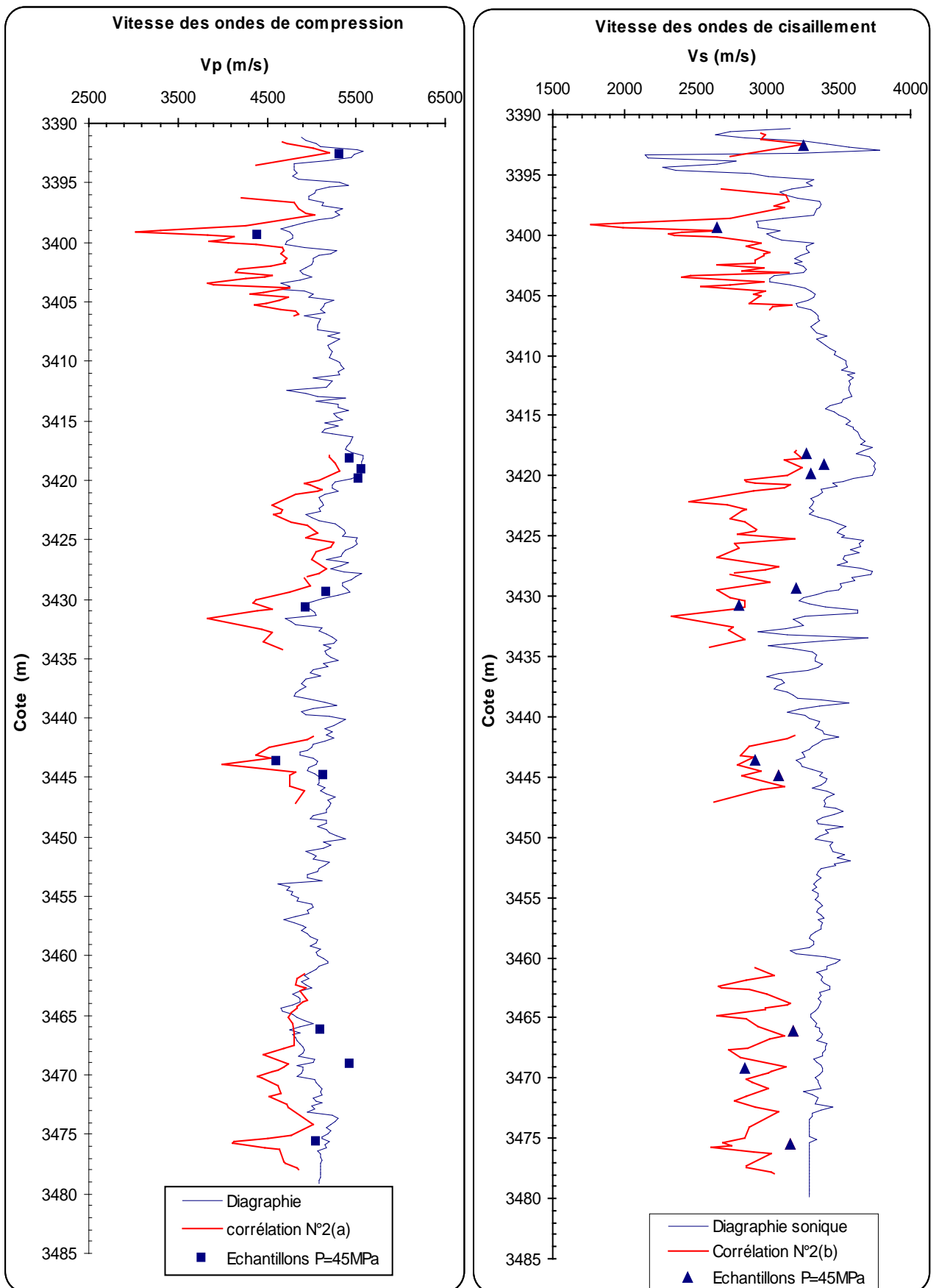


Fig. V.9 : Comparaison entre les vitesses obtenues par les corrélation n°2, par diagraphie et au laboratoire

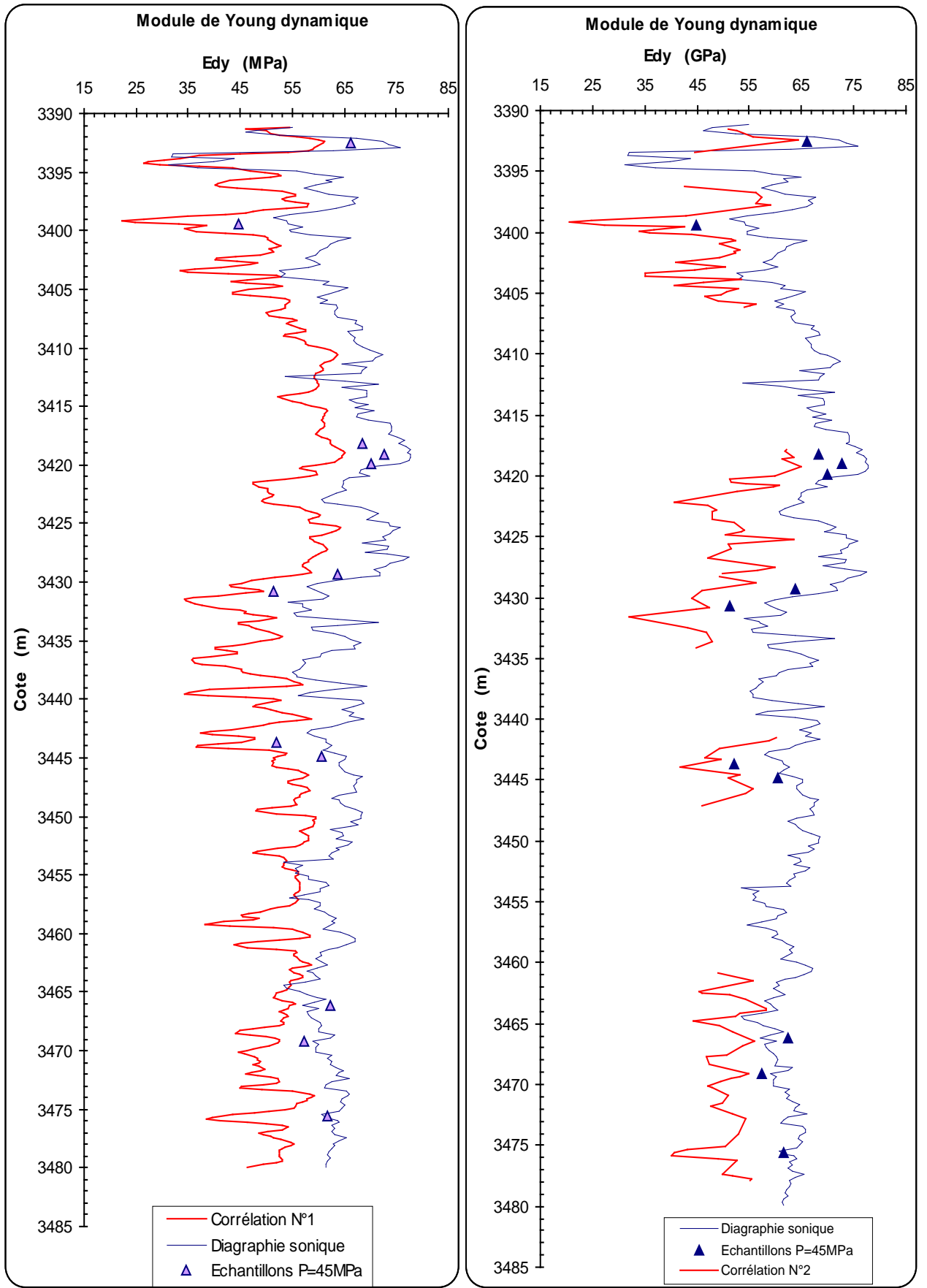


Fig. V.10 : Comparaison entre les valeurs du module de Young dynamique obtenues par les corrélations, par diagraphie et au laboratoire

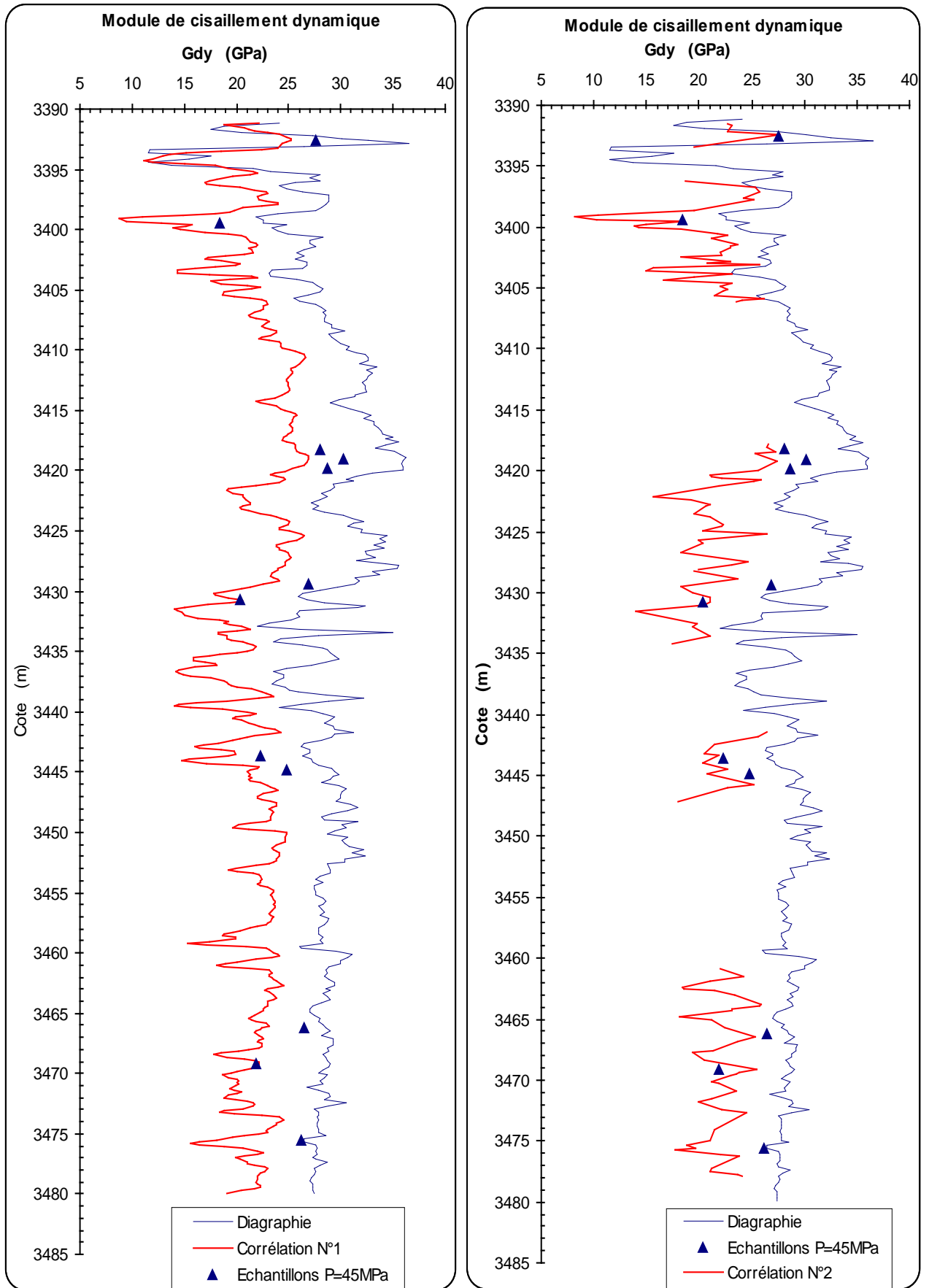


Fig. V.11 : Comparaison entre les valeurs du module de cisaillement dynamique obtenues par les corrélations, par diagraphie et au laboratoire

Conclusion Générale et Perspectives

L'analyse mécanique des roches réservoirs est une étape indispensable qui permet de comprendre et de prévoir le comportement des réservoirs pétroliers. Etant enfouie à des milliers de mètres au fond de la terre, l'étude du comportement mécanique de cette roche s'inscrit dans un cadre vaste et très complexe, et pose jusqu'à nos jours un problème crucial aux ingénieurs pétroliers. Cette complexité est principalement due au manque d'observations directes sur le réservoir, à la difficulté de reporter de façon fiable les conditions intégrales du contexte naturel au laboratoire et à la multiplicité des facteurs qui interviennent et qui influent sur ce comportement à savoir : la composition de la roche, son degrés de cimentation et d'altération, sa porosité et sa perméabilité, la nature et les propriétés des fluides contenus dans ses pores, la température, la pression,.....etc.

Toutefois, la compréhension du comportement de la roche réservoir peut être envisagée grâce à l'étude des effets séparés et combinés de ces divers facteurs. Une telle étude n'est possible qu'au laboratoire, par le biais d'essais contrôlés effectués sur des échantillons extraits du fond du réservoir, en veillant à reproduire au mieux les conditions qui règnent in situ.

L'objectif de cette étude est, avant tout, d'apporter un plus en ce qui concerne la caractérisation mécanique de la roche réservoir de Hassi Messaoud, en accordant un intérêt particulier à la détermination de son module de Young, car celui ci est une propriété dont la connaissance est essentielle à la maîtrise et le contrôle des diverses opérations de l'exploitation des gisements.

Pour mener à bien notre travail, nous avons recueilli un maximum de données : des résultats enregistrés in situ par le biais de tests de diagraphie, et des valeurs obtenues au laboratoire.

Les analyses de laboratoire ont été effectuées sur des échantillons de roche prélevés du fond d'un puits situé sur le champ de Hassi Messaoud. Les tests ont été conduits de manière à étudier l'effet de la pression, de la porosité et du contenu en argile sur la valeur du module de Young dynamique, déterminé par le biais d'un essai basé sur une propagation d'ondes acoustiques. Etant directement lié aux vitesses de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S , l'étude de la variation du module de Young dynamique en fonction de ces paramètres revient à étudier l'effet de ces mêmes paramètres sur les vitesses de propagation des ondes acoustiques.

La difficulté principale que nous avons rencontré lors de la réalisation des essais de laboratoire est celle de reproduire l'état de contrainte initial de la roche, du moment que les contraintes horizontales qui règnent in situ sont inconnues. Suite à une analyse des variations apparues au niveau de la matrice rocheuse après son extraction du fond du réservoir, nous avons déduit que la restauration de l'état initial de la roche réservoir consiste à refermer les microfissures induites par la décompression de la matrice. La fermeture de ces microfissures est effectuée par l'application d'un chargement hydrostatique de valeur supérieure au seuil de pression P_f qui correspond à la fin de la phase de serrage des microfissures et au début du comportement élastique linéaire de la roche. Plusieurs tests effectués sur la roche de Hassi Messaoud montrent que cette valeur avoisine généralement 40MPa. A partir de là, nous avons décidé de réaliser les essais sous un chargement isotrope de 45MPa.

Dans une première étape, nous avons mesuré les paramètres pétrophysiques et déterminé la valeur du volume d'argile contenu dans chaque échantillon. Les analyses pétrophysiques effectuées sous pression atmosphériques puis sous un chargement hydrostatique allant jusqu'à 7000Psi (47.6MPa), ont

montré que la porosité et la perméabilité de la roche diminuent avec l'augmentation de la pression appliquée. Les propriétés déterminées sous le chargement hydrostatique sont plus représentatives des caractéristiques initiales des échantillons.

Pour la détermination du volume d'argile contenu dans chaque échantillon, nous avons réalisé trois types d'analyses : une diffractométrie des rayons X, une analyse pétrographique sur lames minces et une analyse granulométrique laser. Les résultats ont montré qu'il existe un écart entre les résultats des trois procédés. L'examen des avantages et inconvénients de chaque méthode nous a conduit à conclure que l'analyse granulométrique laser est le procédé le mieux adapté pour la détermination du volume d'argile contenu dans la roche.

Afin de mesurer les paramètres mécaniques dynamiques des échantillons dans des conditions de pression qui traduisent leur état initial, nous avons utilisé une cellule triaxiale autonome auto-compensée munie d'un sonique. Les vitesses de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S ont été mesurées pour plusieurs paliers de pression hydrostatique. Les résultats des mesures montrent que les vitesses des ondes augmentent avec l'accroissement de la pression appliquée, et par conséquent le module de Young dynamique augmente également.

Les vitesses acoustiques étant influencées par la porosité et le contenu en argile, nous avons exploité les résultats des mesures de telle façon à montrer la variation des propriétés acoustiques et par conséquent du module de Young dynamique en fonction de ces deux paramètres. Les résultats montrent que les vitesses des ondes P et S diminuent avec l'augmentation de la porosité et du taux d'argile dans la roche, et de même pour le module de Young dynamique.

Afin de situer les réponses de la diaggraphie sonique effectuée in situ par rapport aux résultats de l'essai ultrasonique réalisé au laboratoire, nous avons comparé entre les résultats des deux procédés. L'analyse des résultats montre que les vitesses mesurées au laboratoire sous pression atmosphérique (avant fermeture des microfissures) sont inférieures à celles enregistrées in situ. Après restauration de l'état initial de la roche (fermeture des microfissures par l'application d'une pression isotrope de 45MPa), les vitesses des ondes P mesurées au laboratoire se rapprochent de celles de la diaggraphie sonique, mais elles restent inférieures dans le cas des ondes S. Le module de Young dynamique mesuré au laboratoire est inférieur à celui obtenu par diaggraphie.

Le but du travail de laboratoire étant d'appliquer les résultats obtenus pour résoudre les problèmes rencontrés sur le terrain, nous avons jugé utile, malgré le nombre insuffisant d'échantillons, d'établir des corrélations s'appliquant à la roche réservoir de Hassi Messaoud en combinant les résultats des mesures effectuées au laboratoire. Deux corrélations ont ainsi été déterminées: la première qui relie la vitesse de propagation des ondes P et S mesurées à 45MPa, au volume d'argile et à la porosité mesurée dans les mêmes conditions de chargement, et la deuxième fait intervenir en plus des paramètres cités précédemment la vitesse de propagation des ondes sous pression atmosphérique.

Ces formules expérimentales permettent de faire une prédiction des vitesses des ondes P et S, et par conséquent du module de Young dynamique de la roche réservoir en connaissant la porosité de la roche et son contenu en argile. Il ne s'agit pas là d'une détermination précise mais d'une évaluation d'un paramètre en connaissant les deux autres.

L'application de ces formules sur les données disponibles montrent que le log obtenu par les corrélations suit l'allure du log obtenu par diaggraphie. Les valeurs données par les corrélations sont inférieures à celles enregistrées in situ, ce qui était attendu puisque les valeurs que nous avons mesuré

au laboratoire sont inférieures à celles enregistrées in situ. Il serait cependant utile d'effectuer les mêmes analyses sur un plus grand nombre d'échantillons afin de confirmer la fiabilité de la formule.

Notons que ces formules apportent une description utile et permettent de reconstituer le log du module de Young dynamique sur les quelques centaines de puits qui n'ont pas bénéficié d'une diagraphe sonique. Une évaluation du module de cisaillement dynamique est également possible.

Les tests mécaniques dynamiques effectués sur la roche réservoir de Hassi Messaoud étant peu nombreux, l'ensemble des données que nous avons recueillies présente une base de départ intéressante pour d'éventuelles études ultérieures visant à caractériser au mieux la roche réservoir, en particulier celle de Hassi Messaoud. Au terme de ce travail, il serait très intéressant d'établir des corrélations qui permettraient de faire une estimation des paramètres mécaniques statiques de la roche à partir de mesures dynamiques. Bien qu'elles soient purement expérimentales, ce type de formules permet de suppléer le manque de modèles théoriques s'appliquant à la roche réservoir.

Un très important travail de recherche et de développement reste à faire afin d'augmenter la quantité de données expérimentales de laboratoire, ce qui permettrait de développer les corrélations en modèles s'appliquant à la roche réservoir en général et à celle de Hassi Messaoud en particulier.

Références Bibliographiques

- [1] **ABRIKOSOV I., GOUTMAN I.**, "Géologie du pétrole : Généralités, Prospection, Exploitation", Ed. MIR, Moscou, 1986, 301pp.
- [2] **MAURY VINCENT**, "Production d'hydrocarbures et mécanique des roches", IFP, Paris, Septembre 1999.
- [3] **MAURY VINCENT**, "La mécanique des roches dans les problèmes de production", Bulletin Technique Exploration Production n°119, Octobre 1986.
- [4] **SERRA OBERTO**, "Diagraphies Différées - Bases de l'Interprétation -Tome I", Bulletin des Centres de Recherche, ELF Aquitaine - PAU, 1979.
- [5] **BOURBIE T., COUSSY O., ZINSZNER B.**, « Acoustique des milieux poreux » , Publications de l'IFP, collection ' science et technique du pétrole', n°27, Ed. Technip, Paris,1986.
- [6] **ISRM : INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS - Commission on standardization of laboratory and field tests - Suggested methods for determining sound velocity - Document n°4, March 1977.**
- [7] **WYLLIE M.R.J., GREGORY A.R., GARDNER G.H.F.**, " An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media", Geophysics, 23, 459-493, 1958.
- [8] **TUMAN V.S., ALM R.F.**, " Dynamic and static elastic properties", SPE 603, Stanford, 1963.
- [9] **KING M.S.**, " Wave velocities in rocks as function of changes in overburden pressure and pore fluid saturation", Geophysics 31, 50-73, 1966.
- [10] **NUR A., SIMMONS G.**, " The effect of viscosity of a fluid phase on velocity in low porosity rocks", Earth and Planet Sc. Lett., 7, 99-108, 1969. (D'après [28])
- [11] **NUR A.,MURPHY W.**, « Wave velocities and attenuation in porous media with fluids » , Proc. of 4th Int. Conf. On Continuum models of discrete systems, Stockholm, 311-327, 1981.
- [12] **HAN D. H., NUR A., MORGAN D.**, " Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones ", Geophysics, 51, 2093-2107, 1986.
- [13] **YU, VUSOFF, DURNEY 1991** ,
- [14] **FREUND D.**, "Ultrasonic compressional and shear velocities in dry clastic rocks as a function of porosity, clay content and confining pressure ", Geophysical Journal International 108, 125-135, 1992.
- [15] **JONES S.M.**, " Velocities and quality factors of sedimentary rocks at low and high effective pressures", Geophysical Journal International 123, 774-780, 1995.
- [16] **BEST A.**, " The influence of pressure on ultrasonic velocity and attenuation in near surface sedimentary rocks ", Geophysical prospecting, 45, 345-364, 1997.

- [17] **KHAKSAR A., Mc CANN C., GRIFFITHS C., SOTHCOTT J., KHAZANEHDARI J.**, "Stress sensitivity of P and S wave velocities in a set of low to medium porosity dry sandstones", 59th EAGE conference, Geneva, Switzerland, Extended Abstracts, 1997. (D'après [28]).
- [18] **JONES T.**, " Wave propagation in porous rocks and models for crystal structure ", PhD. Thesis, Stanford University, California, 1983. (d'après [5])
- [19] **NUR A., WALLS J.D., WINKLER K., DE VILBISS J.**, " Effects of fluid saturation on waves in porous rock and relations to hydraulic permeability ", SPE Journal, 450-458, 1980.
- [20] **WINKLER K.**, « Frequency dependent ultrasonic properties of high porosity sandstone » , J. Geophy. Res. , 88, 9493-9499, 1983.
- [21] **FOURMAINTRAUX 1975**
- [22] **BOURBIE T., ZINSZNER B.**, « Hydraulic and acoustic properties as a function of porosity in Fontainebleau sandstones » , J. Geophysical Research , 90, 11524-11532, 1985.
- [23] **MARSALA, A.F., RAGAZZINI, G., BRIGNOLI, M., SANTARELLI, F.J.**, "Basin scale rock mechanics : Logs and core measurements", SPE28034, Netherlands, August 1994.
- [24] **DE MARTINI D.C., BEARD D.C., DANBURG J.S., ROBINSON J.H.**, "Variations of seismic velocities in sandstones and limestones with lithology and pore fluid at simulated in situ conditions", Proc. EGPC Exploration Seminar, Nov. 15 - 17, 1976 (D'après [5]).
- [25] **TOSHAYA C., NUR A.**, "Effects of diagenesis and clays compressional velocities in rocks", Geoph. Res. Lett., 9, 5 - 8, 1982.
- [26] **KOWALLIS B.J., JONES L.E.A., WANG H.F.**, " Velocity - porosity clay content systematics of poorly - consolidated sandstones " , presented to AGU meeting, San Francisco, Dec. 1983. (D'après [5]).
- [27] **KLIMENTOS T., MC CANN C.**, " Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content and permeability in sandstones " , Geophysics, vol. 55, n°8, 998 - 1014, August 1990.
- [28] **KHAKSAR, A., GRIFFITHS, C.M., Mc CANN, C.**, "Compressional and shear wave velocities as a function of confining stress in dry sandstones", Geophysical Prospecting 47, 487-508, 1999.
- [29] **ERLING FJAER, RUNE M. HOLT**, "Stress and stress release effects on acoustic velocities from cores, logs and seismics", SPWLA 40th Annual Logging Symposium, May 1999.
- [30] **TUTUNCU, A. N., SHARMA, M. N.**, " Relating Static and Ultrasonic Laboratory Measurements to Acoustic Log Measurements in Tight Gas Sands ", SPE 24689, TEXAS, 1992.
- [31] **WYLLIE M.R.J., GREGORY A.R., GARDNER L.W.**, " Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media ", Geophys., n° 2, 41-70, 1956 .
- [32] **WYLLIE M.R.J., GARDNER G.H.F., GREGORY A.R.**, " Studies of elastic wave attenuation in porous media", Geophys., n° 27, 569-589, 1962.
- [33] **SCHLUMBERGER CO.** " Log interpretation charts ", Ed. By Schlumberger limited, 1977(D'après [5])
- [34] **NAFE H.E., DRAKE C.L.**, " Physical properties of marine sediments in the sea", vol.3, 794-815, Interscience 1963. (D'après [5]).

- [35] **RAYMER L.L., HUNT E.R., GARDNER J.S.**, " An improved sonic transit time to porosity transform", SPWLA, 21st Ann. Logg. Symp. , July 1980.
- [36] **HAN D. H., EBERHART PHILLIPS D., ZOBACK M.D.**, " Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity and clay content in sandstone ", Geophysics, 54, 82-89, 1989.
- [37] **KARTOBI K.**, " Calibration des attribus sismiques - Application au champ de Hassi Guettar ", Rapport d'avancement n°1, CRD/SONATRACH, Juin 2000.
- [38] **BELHAOUAS, R., BENANI, A., DESPAX, D.**, "Amélioration des procédures de Fracturation Hydraulique à Hassi Messaoud- Contribution de SONATRACH Production, Direction régionale Hassi Messaoud ", Well Evaluation Conference (WEC), 1995.
- [39] **BOYER S., ANDRIEUX P., MICHAUT B.**, " Principes physiques de fonctionnement des outils de diagraphie ", Geologues, n°99.
- [40] **JEAN PAUL SARDA ET AL.**, "Manuel de mécanique des roches - Tome 1 : Fondements", Comité Français de mécanique des roches coordonné par *Françoise Homand* et *Pierre Duffaut* , Ed. Les Presses de l'Ecole des mines , Paris, 2000, 265pp.
- [41] **WALSH J.B.**, "The effect of Cracks on the Compressibility of Rock", Journal of Geophysical Research , vol. 70, N° 2, 381-389, 1965.
- [42] **GUSTKIEWICZ J.**, "Synoptic view of mechanical behaviour of rocks under triaxial compression", Rock at Great Depth, Maury & Fourmaintraux (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 6191 9754; 1989.
- [43] **KHODJA S., FERFERA F., KAOUANE A., BELHAOUAS R., DESPAX D.**, "Mesure des propriétés mécaniques sur le réservoir Cambro-Ordovicien du champ de Hassi Messaoud", 4^{ème} journées Scientifiques et Techniques, SONATRACH, Alger, 16 - 19 Avril 2000.
- [44] **SIMMONS G., RICHTER D.A.**, "Microcracks in rocks : a new petrographic tool " abstract, EOS - Trans - AGN (55) 478 ; 1974.
- [45] **BENAMEUR M., KHODJA S.**, "Etude de l'influence du relâchement des carottes sur les qualités réservoir - Application au réservoir de Hassi Messaoud", L'Explorateur Pétrolier, Revue trimestrielle n°14, Juillet 1999.
- [46] **BATZLE M.L., SIMMONS G., SIEGRFIED R.W.**, " Microcrack closure in rocks under stress : direct observations ", Journal of Geophysical Reaserch, Vol.85, n°B12, p.7072-7090, 1980.
- [47] **GHIASSI H.**, " Détermination de l'état de contrainte in situ par analyse de la microfissuration des roches ", Thèse de Docteur-Ingénieur, Ecole Centrale des Arts et Manufactures.
- [48] **IMPACT**, Document Schlumberger , 1992.
- [49] **TIAB D., ERLE C. DONALDSON**, "Petrophysics : Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties" , Ed. GPC, Houston, Texas, 1996, pp. 706.
- [50] **FERFERA FETHI** , "Influence du champ de contrainte sur l'évolution de la perméabilité monophasique d'un grès", Thèse Doct. , Ecole Centrale de Paris, 1997.
- [51] **ASTM** : American Society for Testing and Materials - ASTM D2845-69.

- [52] **GROLIER, J., FERNANDEZ, A.,** " Les propriétés physiques des roches : Théories et modèles" , Ed. MASSON, Paris, 1991, 460pp.
- [53] **ERLING FJAER, RUNE M. HOLT, PER HORSRUD, ARNE M. RAEEN,** "Petroleum related rock mechanics", Developments in Petroleum Science 33 ; Ed. ELSEVIER, Netherlands , 1992, 331pp.
- [54] **COSSE R.,** "Techniques d'exploitation pétrolière : LE GISEMENT", Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs , Ed. TECHNIP , Paris, 1988, 329pp.
- [55] **KHARCHI FATTOUM, KARTOBI KHELIL, MEZIANE NADIA,** "Caractérisation mécanique d'un milieu poreux dans le domaine pétrolier - Etude méthodologique", Journées Nationales sur le Génie des Matériaux, Université de Boumerdès, Avril 2000.
- [56] **KARTOBI KHELIL, MEZIANE NADIA,** "Relation entre les paramètres mécaniques dynamiques et statiques- Application au domaine pétrolier", Rapport d'avancement N°1, CRD/SONATRACH, Mai 2000.
- [57] **KARTOBI KHELIL, MEZIANE NADIA,** "Relation entre les paramètres mécaniques dynamiques et statiques- Application au domaine pétrolier", Rapport d'avancement N°2, CRD/SONATRACH, Mars2001.
- [58] **KHARCHI FATTOUM, KARTOBI KHELIL, MEZIANE NADIA,** "Caractérisation des roches réservoir par l'acoustique", 6^{ème} Congrès Français d'Acoustique , Université de Lille, Avril 2002.

ANNEXE "A"

En référence à [55], la porosité est dite :

- "*faible*" si " $\Phi < 5\%$ ".
- "*médiocre*" si " $5\% < \Phi < 10\%$ ".
- "*moyenne*" si " $10\% < \Phi < 20\%$ ".
- "*bonne*" si " $20\% < \Phi < 30\%$ ".
- "*excellente*" si " $\Phi > 30\%$ ".

ANNEXE "B"

La gamme des perméabilités rencontrées est très étendue. Elle varie de 0.1mD jusqu'à plus de 10D. Selon [55], nous pouvons employer les termes suivants pour spécifier la valeur de la perméabilité :

- < 1mD : "*très faible*"
- 1 à 10 mD : "*faible*"
- 10 à 50 mD : "*médiocre*"
- 50 à 200 mD : "*moyenne*"
- 200 à 500 mD : "*bonne*"
- > 500 mD : "*excellente*"

ANNEXE "C"

Les particules sédimentaires sont classées comme suit [49]:

Limiting Particle Diameter			Size class		
(mm)	φ unité	μm			
2048	— - 11		V.Large	Boulders	GRAVEL
			Large		
1024	— - 10		Medium		
			Small		
256	— - 8		Large	Cobbles	
128	— - 7		Small		
64	— - 6		V.Coarse	Pebbles	
32	— - 5		Coarse		
16	— - 4		Medium		
8	— - 3		Fine		
4	— - 2		V.Fine		
2	— - 1		V.Coarse	Sand	
1	== 0		Coarse		
1/2	— + 1	500	Medium		
1/4	— + 2	250	Fine		
1/8	— + 3	125	V.Fine		
1/16	— + 4	62	V.Coarse		Silt
1/32	— + 5	31	Coarse		
1/64	— + 6	16	Medium		
1/128	— + 7	8	Fine		
1/256	— + 8	4	V.Fine		
1/512	— + 9	2	Clay		MUD

Classification standard des particules sédimentaires