

50376
1991
82

67193

50376
1991
82

N° d'ordre : 706

THESE de DOCTORAT

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE-FLANDRES-ARTOIS

Spécialité

GENIE CIVIL

TITRE

**MODELISATION DE L'INITIALISATION DU DISCAGE PAR
ELEMENTS FINIS : ELABORATION D'UNE METHODE
D'OPTIMISATION DU CAROTTAGE**



par

Véronique VENET

Soutenu le 25 mars 1991

Jury :

M.	J.P. Henry	:	USTLFA	Président
Mme	F. Homand	:	ENSG Nancy	Rapporteur
M.	J.P. Piguet	:	Ecole des Mines Nancy	Rapporteur
M.	D. Fourmaintraux	:	SNEAP (Elf Aquitaine)	Examineur
M.	P. Charlez	:	TOTAL	Examineur
M.	R. Miguez	:	Ingénieur Informaticien IPS	Examineur

LE TRAVAIL EFFECTUE AU COURS DE CETTE THESE ETAIT L'OBJET D'UN CONTRAT DE RECHERCHE FINANCE PAR LA SOCIETE NATIONALE ELF-AQUITAINE . JE REMERCIE PARTICULIEREMENT MESSIEURS MAURY ET SANTARELLI POUR LEUR AIDE ET LEUR SOUTIEN TOUT LE LONG DE CETTE ETUDE .

J'EXPRIME MA PROFONDE RECONNAISSANCE A MONSIEUR HENRY J.P QUI A ETE MON DIRECTEUR DE THESE ET DON'T J'AI PU APPRECIER LES COMPETENCES ,L'EFFICACITE ET LE SENS CRITIQUE DURANT CES 4 ANNEES DE VIE 'COMMUNE'.

MADAME BOUREY ET MESSIEURS SHAHROUR ET CREY M'ONT CONSEILLEE TANT SUR LE PLAN NUMERIQUE QU'INFORMATIQUE , JE LES REMERCIE VIVEMENT POUR TOUTES LES FACILITES QU'ILS M'ONT AINSI OFFERTES AINSI QUE POUR LEUR AMABILITE .

MADAME HOMAND ET MONSIEUR PIGUET ONT EU LA GENTILLESSE D'ACCEPTER D'ETRE MES RAPPORTEURS . MESSIEURS FOURMAINTEAU,CHARLEZ ET MIGUEZ M'ONT FAIT LE PLAISIR D'ETRE MEMBRES DE MON JURY . JE LEURS EXPRIME MES PLUS VIFS REMERCIEMENTS POUR LEUR SOUTIEN ET LEURS OBSERVATIONS .

MESSIEURS SECQ ET MOREL ONT DU SE TRANSFORMER EN PHOTOGRAPHES,DESSINATEURS ET CONCEPTEURS.JE TIENS A LEURS PRESENTER MES PLUS PROFONDS REMERCIEMENTS POUR L'AIDE ET POUR L'AMITIE QU'ILS M'ONT TOUJOURS TEMOIGNÉES .

MESSIEURS KONDO,SHAO ET SIBAI ONT EU LA LOURDE CHARGE DE M'AIDER PENDANT LA REDACTION DE CE MANUSCRIT ET LORS DE LA PREPARATION DE L'EXPOSE,QU'IL ME SOIT PERMIS DE LES REMERCIER POUR LEUR PATIENCE ET LEUR GENTILLESSE.

MADAME HENRY.F A EU LA LOURDE RESPONSABILITE DE TAPER CE MANUSCRIT , QU'ELLE TROUVE ICI TOUTE MA RECONNAISSANCE POUR SON REMARQUABLE TRAVAIL ET SA DISPONIBILITE .JE TIENS EGALEMENT A REMERCIER CHALEUREUSEMENT MESDAMES CADINOT ET CORNILLE POUR LEUR AIDE CONSTANTE ET LEUR AMABILITE .

JE DEDIE CETTE THESE A MES PARENTS,A MA SOEUR,A MA FAMILLE ET A MES AMIS QUI ONT,PAR LEUR PRESENCE ET LEUR PATIENCE, CONTRIBUE FORTEMENT A LA REUSSITE DE CE TRAVAIL .

SOMMAIRE

Résumé	1
Abstract	2
Introduction	3
 CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1 Introduction	4
1.2 Méthodologie de description des disques	7
1.2.1 Convention pour la caractérisation des disques	7
1.2.2 Résultats des premières observations	10
1.3 Résultats des différentes approches empiriques	12
1.3.1 Influence des caractéristiques géomécaniques du matériau	13
1.3.2 Variation de l'épaisseur des disques en fonction des contraintes appliquées	13
1.3.3 Influence des contraintes sur la forme des disques	16
1.3.4 Position du point d'initialisation du discage	16
1.3.5 Conclusions partielles	17
1.4 L'approche numérique par critère	17
1.4.1 Influence des résistances mécaniques de la roche	19
1.4.2 Influence des modules de la roche	20
1.4.3 Influence de la géométrie du carottier	21
1.4.4 Influence de l'épaisseur des disques	24
1.4.5 Indications sur la position du point d'initialisation du discage et sur l'état de contrainte pouvant provoquer la rupture	28
1.5 Conclusions	29

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DU LOGICIEL DISCAGELF

2.1	Objectifs	32
2.2	Présentation du critère de rupture	33
2.3	Détermination des contraintes de discage	35
2.4	Description du logiciel DISCAGELF	37
	2.4.1 Sous-programme de maillage	38
	2.4.2 Les sous-programmes de la loupe	40
	2.4.3 Les conditions aux limites	41
	2.4.4 Le sous-programme de calcul	42
	2.4.5 Les sous-programmes de détermination des contraintes de discage et de sortie graphique	42
2.5	Vérification de la loupe et détermination de la taille minimale des éléments de la discrétisation ...	42
	2.5.1 Vérification de la loupe - Influence du maillage	42
	2.5.2 Détermination du nombre limite d'éléments en fond de saignée	46
2.6	Présentation générale des courbes de discage	49
2.7	Conclusions	51

CHAPITRE 3 : VALIDATION DE L'HYPOTHESE "ELASTICITE"

3.1	Etude numérique : Comparaison Discagelf - Logiciel de Bauer	52
3.2	Validation expérimentale simplifiée	55
	3.2.1 Résultats expérimentaux	55
	3.2.2 Résultats numériques	57
	3.2.3 Analyse et validation	60
3.3	Validation expérimentale avec pression de boue	61
	3.3.1 Choix et définition du matériau de substitution	62
	3.3.2 Description du montage expérimental	63
	3.3.3 Description de la méthodologie	65
	3.3.4 Résultats expérimentaux	67
	3.3.5 Résultats numériques - Validation	69
3.4	Conclusions	72

Sommaire

CHAPITRE 4 : ETUDE PARAMETRIQUE AVEC SIMULATION DE LA PRESSION DE BOUE

4.1	Influence des caractéristiques géomécaniques	73
4.2	Influence de la densité de boue	76
4.3	Influence du rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier	80
4.4	Influence de l'épaisseur des disques	83
4.4.1	Faible rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier (= 1.5)	83
4.4.2	Fort rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier (= 2)	85
4.5	Influence de la forme de l'outil	88
4.5.1	Influence de l'élanement (BY) du carottier	88
4.5.2	Influence de l'excentricité (AX1) du carottier	96
4.6	Influence du poids sur l'outil	103
4.7	Forme des disques	104
4.7.1	Influence du rapport des rayons du carottier et de l'épaisseur des disques	104
4.7.2	Influence de la profondeur, de la nature de la roche et de la pression de boue	112
4.7.3	Influence du type de la forme de l'outil de forage	113
4.8	Conclusions	113
	Conclusions	114
	Bibliographie	118
 Annexes		
	Annexe A : Détermination des pressions transmises par le talc en fond de saignée	123
	Annexe B1 : Influence des caractéristiques géomécaniques de la roche	131
	Annexe B2 : Influence de la densité de boue	137
	Annexe B3 : Influence du rapport des rayons du carottier	141
	Annexe B4 : Influence de l'épaisseur	143
	Annexe B5 : Influence de la forme du carottier	150
	Annexe C : Forme des disques	155

NOTATIONS

AX1 (Mètre)	:	excentricité gauche du carottier
BY (Mètre)	:	Elancement du carottier
CTp	:	Coefficient de transmission de pression dans le talc
C_v, C_o, C_b, C_r	:	Coefficients correcteurs associés : <ul style="list-style-type: none">- à la profondeur- au poids sur l'outil- à la densité de boue- au rapport σ_R/σ_A
D_b	:	Densité de la boue
E (MPa)	:	Module d'Young du matériau
E_p (cm)	:	Hauteur de la carotte
MAIL	:	Code du type de carottier
K	:	Coefficient de poussée des terrains = σ_R / σ_A
K_1	:	σ_{R1} / σ_A
k_1 (MPa)	:	Contrainte radiale de discage pour $\sigma_A = 0$ MPa (Ordonnée des droites d'Obert et Stephenson)
K_2	:	σ_{R2} / σ_A
k_2	:	Pente des droites d'Obert et Stephenson $\sigma_R = f(\sigma_A)$
K_d	:	Degrés de raffinement du maillage
λ	:	Paramètre de retour sur le critère (λ_{min})
n	:	Porosité
v	:	Coefficient de Poisson
P_{AL} (MPa)	:	Pression axiale limite appliquée sur le talc
P_{AF} (MPa)	:	Pression axiale finale appliquée sur le talc
P_{bF} (MPa)	:	Pression de réouverture de la fracture
P_f (MPa)	:	Pression d'initiation de la fracture (Break down Pressure)
P_o	:	Poids sur l'outil
P_p (MPa)	:	Pression de pore
P_s (MPa)	:	Pression de maintenance de l'ouverture (Shut-in pressure)

R_c (MPa)	: Résistance à la compression du matériau (R_c^N R_c^C)
R_e (M)	: Rayon extérieur du carottier
R_i (M)	: Rayon intérieur du carottier
R_t (MPa)	: Résistance à la traction du matériau ($R_T^{(N)}$ $R_T^{(C)}$)
σ_A (MPa)	: Contrainte axiale (sig A dans les figures)
σ_B (MPa)	: Contrainte due à la densité de boue
σ_h (MPa)	: Contrainte horizontale minimum
σ_H (MPa)	: Contrainte horizontale maximum
σ_o (MPa)	: Contrainte due au poids sur l'outil
σ_R (MPa)	: Contrainte radiale (sig R dans les figures)
σ_{R1} (MPa)	: Contrainte radiale maximum d'initialisation du discage (σ_A cste) (sig R1 dans les figures)
σ_{R2} (MPa)	: Contrainte radiale minimum d'initialisation du discage (σ_A cste) (sig R2 dans les figures)
σ_{Rd} (MPa)	: Contrainte radiale de discage
σ_{Ri} (MPa)	: Contraintes radiales d'initialisation du discage σ_{R1} et σ_{R2}
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (MPa)	: Contraintes principales mineures, intermédiaires majeures
τ_o (MPa)	: Résistance au cisaillement du matériau (Tau dans les figures)

RESUME

Un problème essentiel en Mécanique des Roches appliquée au Génie Pétrolier est la connaissance des contraintes in-situ à de grandes profondeurs, connaissance qui permettrait de prévoir, et donc d'optimiser la stabilité des puits. Le thème de notre recherche est l'étude du discage lorsque celui-ci apparaît dans les carottes pétrolières ; ce phénomène se révèle être un moyen peu coûteux pour estimer les contraintes in-situ.

Notre travail s'est décomposé en deux parties.

Dans un premier temps, un programme en éléments finis (DISCAGELF), en symétrie de révolution, a été mis au point. Une discrétisation automatique du domaine, ainsi que la possibilité d'effectuer des loupes sur la zone à haute probabilité de rupture, assurent son accessibilité et son implantation éventuelle sur des micro-ordinateurs de type P.C. Une validation de ce logiciel, à partir d'essais effectués sur le triaxial vrai de Lille (sans pression de boue), et sur la machine à disquer du CERCHAR (avec simulation de la pression de boue) a ensuite été effectuée. Les résultats expérimentaux coïncident avec les valeurs obtenues par DISCAGELF.

Dans la seconde partie, nous présenterons les résultats numériques, relatifs à l'influence des paramètres (caractéristiques géomécaniques de la roche, densité de la boue, rapport des rayons du carottier, épaisseur de la carotte, type et forme de l'outil de forage, poids sur l'outil) sur les contraintes de discage et sur la position du point d'initialisation de la rupture. Nous avons ainsi principalement mis en évidence que :

- deux contraintes radiales délimitant un domaine de non discage (à contrainte axiale fixée) provoquent la rupture,
- le point d'initialisation du discage peut se situer à trois endroits distincts selon les valeurs du jeu de paramètres entré (le mode de rupture étant différent),
- la variation des contraintes radiales de discage en fonction de l'épaisseur des disques permet de répertorier trois familles de disques selon les épaisseurs mais ce phénomène dépend du rapport des rayons du carottier.

Mots Clés : Discage - Contraintes in-situ - Méthodes numériques - Eléments Finis - Validation - Pression de boue- Epaisseur de la carotte - Forme des disques.

ABSTRACT

The determination of in situ stresses at great depth, allowing to plan and thus optimize the stability of oil wells, is a major problem in rock mechanics applied to oil drilling and more generally to mining and civil engineering. The scope of the present work is the study of discing phenomena occurring in rocks cores, which could be an unexpensive way to estimate in situ stresses.

This study is divided in two parts.

In the first part, a finite element computer software (DISCAGELF) for axisymetrical problems has been developed. It includes an preprocessor automatic meshes generatory and offers the ability to zoom on zones of high probability of fracture, making it a user friendly and accessible software, easy to instable on personnel computers. This code has been validated on truly-triaxial testory device from Lille (without mud pressure) and on results from the core discing machine from CERCHAR (with simulation of mud pressure). A good agreement has been obtained between experimental and DISCAGELF results.

In the second part of the study, numerical simulations are presented, regarding the influence of parameters (mechanical properties of rocks, mud density, ratio of core bit radii, disc thickness, type and shape of drilling tool, weight of drilling tool) on core discing stresses and position of fracture initiation point. It has principally been shown that :

- two radial stresses (at constant axial stress), delimiting a non discing domain, lead to fracture,
- three different discing initiation point locations, depending on input parameters values, can be found (the fracture type being different),
- the variation of discing radial stresses with disc thickness introduces three disc families, as a function of their thickness ; however this phenomenon depend of the ratio of "core bit radii".

Key-words : Core discing - In situ stresses - Numerical methods - Finite Element method - Validation - Mud pressure - Core Thickness - Shape of core discs.

INTRODUCTION

Un des problèmes essentiels en Mécanique des Roches est la connaissance des contraintes in-situ afin d'estimer et d'optimiser la stabilité d'ouvrages souterrains (Génie Minier, Civil ou Pétrolier). Malheureusement, les essais réalisables à grande profondeur sont limités et très onéreux. L'observation de carottes montrent dans certains cas la présence de surfaces de rupture perpendiculaires à l'axe du forage, de formes et d'épaisseurs régulières. Ce phénomène est appelé discage ("core discing") et est répétitif dans la matrice rocheuse. Cette propriété de répétabilité à l'état naturel permet de supposer que le discage peut être utilisé comme un indicateur des contraintes en place.

Les objectifs de notre travail sont :

- de créer un logiciel de calcul bidimensionnel, permettant à partir de données de terrain, d'estimer les contraintes provoquant l'initialisation du discage.

Ce logiciel doit être de manipulation facile, accessible et adaptable à des micros ordinateurs de capacité moyenne.

- de définir les paramètres influant sur le discage et d'analyser leurs actions sur ce phénomène (étude paramétrique).

Cet ouvrage se décompose en quatre parties.

Dans le premier chapitre, nous rappellerons la méthodologie de description des disques mise au point par Miguez [34] [35], puis nous exposerons les résultats déjà obtenus par deux techniques d'approche : l'approche empirique et l'approche numérique. Les paramètres qui seront utilisés dans l'étude paramétrique seront également définis.

Nous décrirons, dans la deuxième partie, le logiciel DISCAGELF créé pour cette étude. Les sous-programmes de maillage automatique, des loupes et des sorties graphiques seront détaillés. Nous définirons ensuite la discrétisation maximale à utiliser. L'allure générale des graphes représentant les variations des contraintes radiales de discage en fonction des contraintes axiales sera analysée.

Le troisième chapitre est consacré à la validation de DISCAGELF. Elle se déroulera en trois étapes. Nous comparerons nos résultats avec ceux obtenus par :

- un autre logiciel (Bauer [2]),
- des essais réalisés sur le triaxial vrai de Lille I, sans pression de boue,
- des essais réalisés sur la machine à disquer de Moudafi avec simulation de la pression de boue. Dans cette partie, nous examinerons de façon simplifiée le comportement du matériau de substitution (le talc) utilisé pour remplacer la boue de forage.

Dans la quatrième partie, nous présenterons et analyserons une partie des résultats obtenus lors de l'étude de l'influence des paramètres (caractéristiques géomécaniques du matériau, pression de boue, rapport des rayons du carottier, épaisseur de la carotte, type et géométrie de l'outil de forage et poids sur l'outil) sur les contraintes d'initialisation de discage et ce, en présence de boue dans le forage. Puis nous examinerons l'action de ces paramètres sur la forme possible des disques.

A partir de cette étude d'influence nous pourrions donc :

- estimer, en cas de discage ou d'amorce de rupture, un intervalle limite pour les contraintes radiales,
- définir les paramètres sur lesquels les ingénieurs pétroliers peuvent jouer afin de se situer dans une zone de sécurité vis à vis de la rupture (ce qui permettrait l'extraction de carottes intactes).

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 INTRODUCTION

Pour déterminer le degré de stabilité des ouvrages souterrains (mines, tunnels, puits pétroliers, ouvrages de stockage), une connaissance approfondie du comportement de la roche et de l'ouvrage, ainsi que de l'état des contraintes in-situ et de ses modifications, est nécessaire.

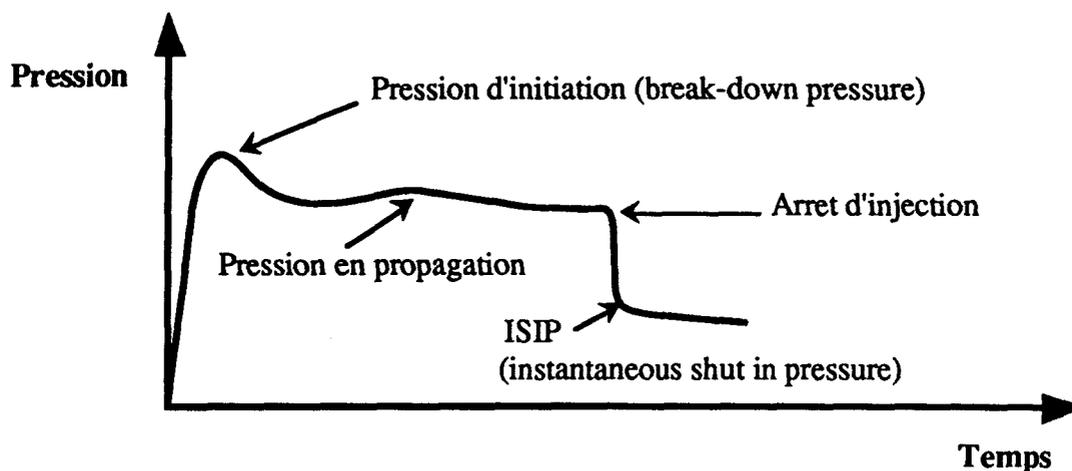
A cet effet, pour des ouvrages réalisés à faible profondeur, le mécanicien des roches dispose d'une large gamme d'essais in-situ [12], lui permettant de mesurer :

- les déformations et la structure du massif (extensomètre - déflectomètre, etc. ...),
- le comportement contrainte-déformation, avec ou sans effet du temps (dilatomètre, sismique-réfraction ...),
- l'état de contrainte ou sa variation (cellules de charges ...).

La détermination du tenseur de contrainte à grande profondeur nécessite des essais beaucoup plus onéreux. Trois techniques sont principalement utilisées :

- la fracturation hydraulique,
- l'analyse de la courbe des déformations différentielles (DSCA),
- l'observation de l'ovalisation des puits de forage.

La fracturation hydraulique [15] [21] [47] suppose, le plus souvent, qu'une des contraintes principales est parallèle à l'axe du forage. Dans cette technique, une section du puits est isolée, puis mise sous pression à l'aide d'un fluide (généralement de l'eau) jusqu'à l'apparition et la propagation d'une fracture. Cette pression limite P_f (*Breakdown pressure*) est relevée. On note P_s (*shut in pressure*) la pression nécessaire au maintien de l'ouverture de la fracture (fig. 1.1). Ces deux valeurs sont utilisées dans les relations suivantes pour obtenir les contraintes in-situ [15] :



Principe de la fracturation hydraulique

Figure 1.1 : Allure générale des courbes de fracturation hydraulique

Pour tous les cycles, sauf le premier :

$$\sigma_h = P_s$$

$$\sigma_H = 3 P_s - P_b^f - P_p$$

avec σ_h contrainte horizontale minimale
 σ_H contrainte horizontale maximale

et pour le 1er cycle :

$$\sigma_h = P_s$$

$$\sigma_H = 3 P_s - P_f - P_p + R_t$$

avec P_b^f : pression de réouverture de la fracture
 P_p : pression de pore
 R_t : résistance à la traction du matériau

Une nouvelle méthode d'approche de l'état de contrainte in-situ a été récemment élaborée : l'analyse de la courbe des déformations différentielles (DSCA). Contrairement à la fracturation hydraulique, les essais sont réalisés sur des carottes en laboratoire. Elle permettrait d'évaluer les directions des contraintes principales [41] [16] [28]. Décrivons brièvement le principe de la méthode DSCA : un échantillon de roche, prélevé par carottage, est supposé se microfissurer lors de la relaxation, proportionnellement à l'état de contrainte exercé in-situ sur celui-ci. A partir des déformations provenant de la refermeture des microfissures (par recompression hydrostatique), différents modèles plus ou moins sophistiqués permettent de déterminer le tenseur complet des contraintes in-situ.

Les directions des contraintes radiales minimale et maximale peuvent être déterminées également par l'observation de l'ovalisation des puits de forage [4], ovalisation qui apparaît donc principalement lorsque le chargement est anisotrope. Dans ce cas, la direction du plus petit diamètre correspond à la direction de la contrainte radiale maximale [35].

Enfin, il est important de noter que dans certains forages pétroliers, lors de l'extraction de carottes d'échantillonnage, on observe le découpage de celles-ci en tronçons (ou disques [32]) "d'épaisseurs relativement uniformes ayant des surfaces de rupture à peu près perpendiculaires à l'axe du forage" [38]. Ces fractures peuvent couper complètement la carotte formant ainsi des disques ou n'apparaître que sur les bords de l'échantillon donnant lieu à des amorces de discage (fig. 1.2).

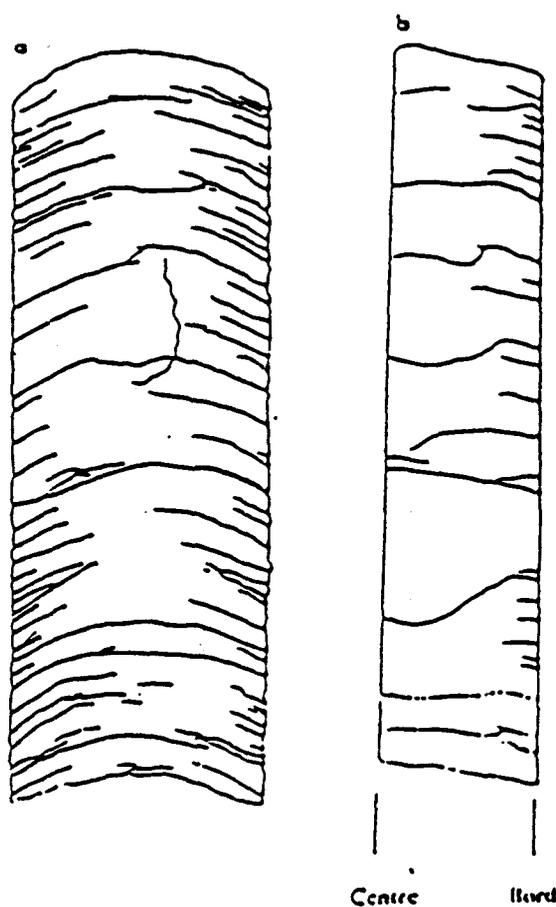


Figure 1.2 : Discage et amorces de discage

On appellera **discage vrai** la répétition de ce découpage régulier de la carotte en disques, et **prédiscage** la formation d'une seule surface de rupture de même morphologie et origine que le discage vrai.

La régularité surprenante de ce phénomène, du point de vue de ses dimensions et de ses formes, permet de supposer que celui-ci est relié à l'état de contrainte en place par l'intermédiaire de la concentration de contrainte en fond de saignée, d'où l'idée d'employer le discage comme un indicateur des contraintes in-situ. Connaissant les paramètres influant sur les conditions d'apparition de la rupture, il serait donc possible :

- soit, à partir de l'observation de carottes disquées, impropres aux essais de laboratoire, de relier la géométrie et l'épaisseur des disques aux valeurs et directions des contraintes in-situ,

- soit, en connaissant les contraintes in-situ, d'optimiser la forme du carottier pour éviter l'apparition de ruptures, et donc obtenir des échantillons sains pour les essais de laboratoire.

Remarquons qu'en Génie Minier, le phénomène de discage est utilisé pour déterminer les zones à risques de sur-tir (libération brutale de gaz). Dans ce cas, on mesure sur les carottes, la longueur de chaque tronçon et la fréquence de leur apparition. Ces paramètres semblent permettre d'estimer les dangers lors de l'abattage [7] [27].

Pour interpréter le discage, trois techniques d'approche complémentaires peuvent être employées :

- ***Approche empirique***

Elle se propose de reproduire en Laboratoire les conditions nécessaires pour l'obtention du discage, essentiellement les contraintes appliquées, les propriétés géomécaniques du matériau.

- ***Approche par critère***

On se donne une loi de comportement, le plus souvent élastique linéaire, et un critère de rupture. Le calcul consiste alors à rechercher pour différents états de contraintes le premier point où le critère de rupture est vérifié, correspondant au point potentiel d'initialisation du discage. Cette méthode permet également d'obtenir, à partir des valeurs et des directions des contraintes principales, des informations sur le mode de rupture et la forme des disques potentiels.

- ***Approche par la Mécanique Linéaire de la Rupture***

Dans ce cas, on tente de modéliser l'initialisation et la propagation de la rupture, et de relier les résultats obtenus aux contraintes in-situ.

La méthode d'approche par critère présente l'avantage de modéliser l'initialisation du discage en utilisant une gamme importante de paramètres relatifs à la géométrie du carottier, aux propriétés géomécaniques du matériau, et ce, pour un coût de calcul relativement faible.

La méthode expérimentale, plus longue et plus onéreuse, devrait être principalement un outil de validation des modélisations effectuées par les deux approches numériques. La troisième méthode [13], plus axée sur la propagation de la rupture, permet d'obtenir un maximum d'informations sur les disques créés au niveau de leurs formes, plutôt que sur les amorces de rupture modélisées par la méthode par critère.

Dans un premier temps, nous détaillerons la méthode de description des disques élaborée par Miguez [34] [35], puis nous passerons en revue les principaux résultats obtenus par l'intermédiaire des deux premières techniques d'approche pour la modélisation du discage.

1.2 METHODOLOGIE DE DESCRIPTION DES DISQUES

1.2.1 Convention pour la caractérisation des disques

La carotte de prélèvement doit être parfaitement orientée et repérée, le sens d'avancement du carottier est pris comme sens positif et les disques sont numérotés selon ce sens. La surface de rupture entre deux disques a une forme caractéristique et présente deux points hauts (les minimas) et deux points bas (les maximas) (fig. 1.3).

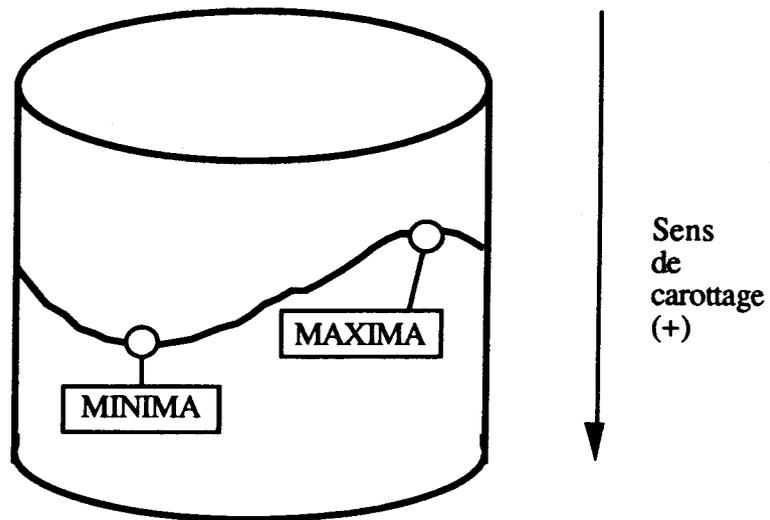


Figure 1.3 : Représentation de la surface de rupture

On définit une génératrice qui est, soit celle relevée sur les carottes marquées lors de l'extraction, soit la droite passant par le point le plus haut (minima absolu) de la première surface de rupture (origine en 0), et parallèle à l'axe du carottage.

A partir de cette génératrice, on numérote les quatre points particuliers P_i ($i = 1,4$) de la surface de rupture en faisant une rotation positive par rapport à l'axe orienté ; le point 1 correspond au maxima absolu (le point le plus bas). Ces points sont repérés par les angles α_i ($i = 1,4$) par rapport à l'origine 0 (fig. 1.4).

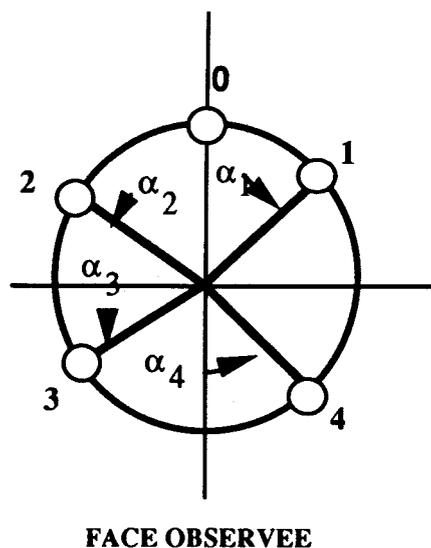


Figure 1.4 : Définition des points P_i et des angles α_i

L'épaisseur des disques est relevée au centre du disque. Les angles de la surface de rupture avec la perpendiculaire à l'axe aux points P_i sont notés β_i en adoptant la convention de signe représentée sur la figure 1.5.a.

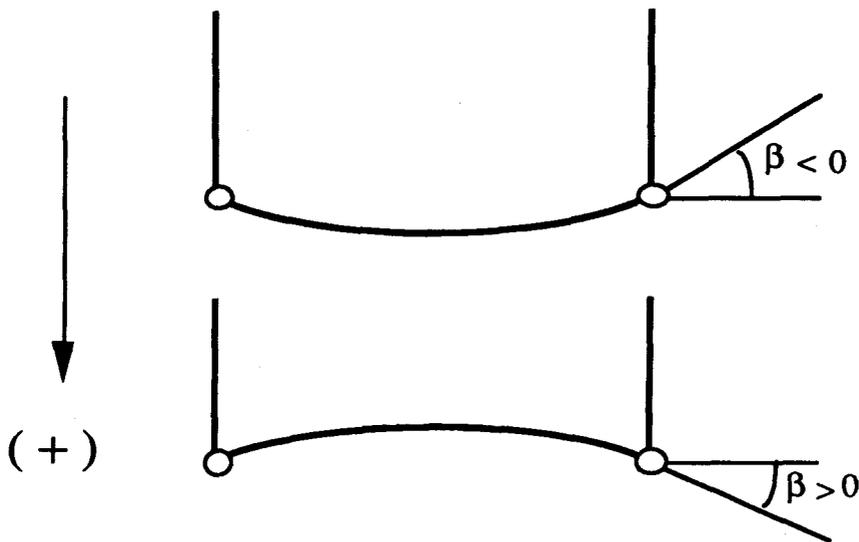


Figure 1.5.a : Convention de signe des angles β_i

Les côtes des points P_i sont relevés de la façon suivante :

$$F_1 = \text{côte du centre} - \text{côte de } P_1$$

$$F_2 = \text{côte de } P_2 - \text{côte de } P_1$$

$$F_3 = \text{côte de } P_3 - \text{côte de } P_1$$

$$F_4 = \text{côte de } P_4 - \text{côte de } P_1$$

S'il y a ovalisation de la carotte, celle-ci est complètement caractérisée par les données suivantes (fig. 1.5.b). On notera :

δ : différence entre le diamètre maximum (d_M) et le diamètre minimum (d_m)

θ : angle entre les directions de D_M et de d_m

θ_0 : angle entre les directions de d_m et la génératrice.

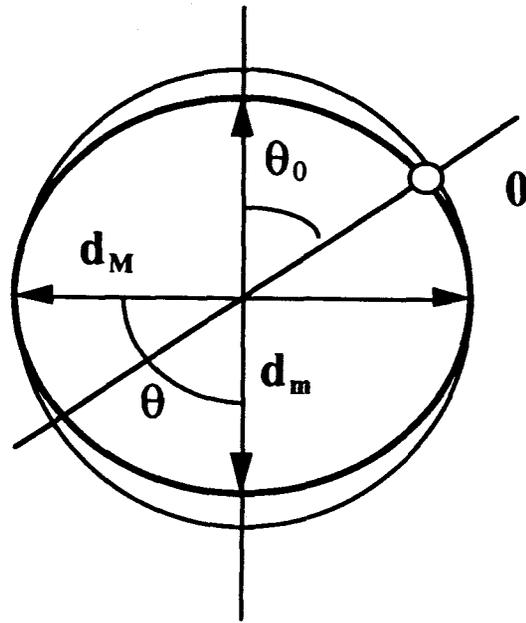


Figure 1.5.b : Repérage de l'ovalisation

1.2.2 Résultats des premières observations

A partir de ces différentes mesures effectuées sur les carottes des carothèques d'Elf Aquitaine, Miguez [35] a répertorié cinq grandes familles de disques selon leurs formes : la forme assiette correspond à une isotropie des contraintes [32] ($\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4$), la forme gouttière [31] [30] ($\beta_2 = \beta_4 > 0$ et $\beta_1 = \beta_3 = 0$ ou $\beta_2 = \beta_4 = 0$ et $\beta_1 = \beta_3 < 0$), la forme selle de cheval [39] ($\beta_2 = \beta_4 > 0$ et $\beta_1 = \beta_3 < 0$) et les formes secondaires assiette inversée et gouttière inversée. Ces différentes géométries s'expriment clairement dans un graphe $\beta_1, (\beta_3) - \beta_2, (\beta_4)$ (fig. 1.6)

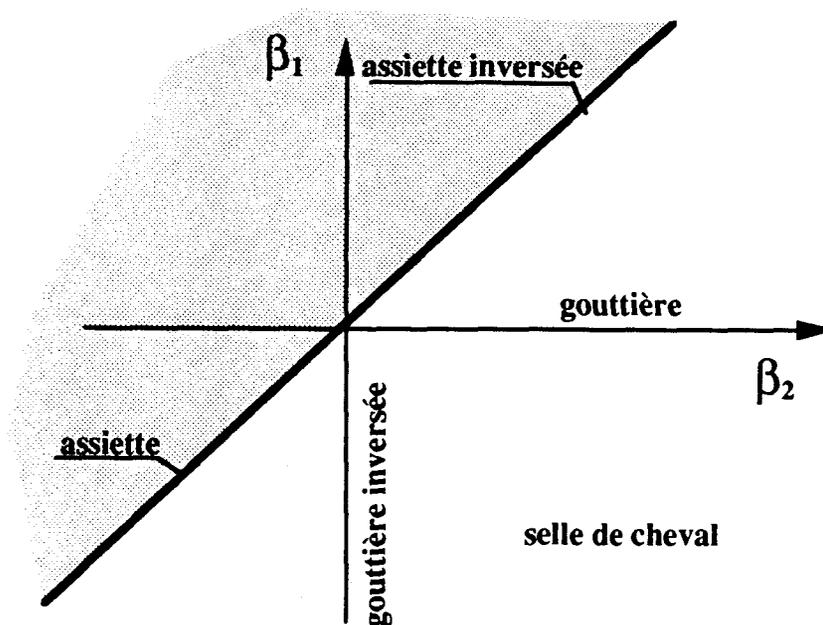


Figure 1.6 : Représentation des formes des disques en fonction des angles β

Lorsque $\beta_1 \equiv \beta_3$ et $\beta_2 \equiv \beta_4$, la contrainte axiale σ_A , dont la direction est parallèle à l'axe du forage, et les contraintes radiales σ_H et σ_h sont principales. Dans ce cas, les mesures effectuées par Miguez [35] montrent que les points $P_1 - P_3$ et $P_2 - P_4$ sont diamétralement opposés ; les axes passant par ces couples seraient donc des axes privilégiés pour le disque. Lorsqu'il y a ovalisation, les directions des contraintes horizontales minimum σ_h et maximum σ_H correspondent respectivement avec les axes formés par les droites passant par les points bas ($P_1 - P_3$) et hauts ($P_2 - P_4$) des surfaces de rupture.

Soit σ_{r1} la contrainte principale dans la direction des points P_1, P_3 et σ_{r2} la contrainte principale dans la direction des points P_2, P_4 , alors $\sigma_{r1} \equiv \sigma_h$ et $\sigma_{r2} \equiv \sigma_H$. L'ordre des contraintes principales peut être ainsi estimé dans un diagramme $\beta_1 - \beta_2$ (fig. 1.7). Le point A correspondant à un état isotrope des contraintes $\sigma_A = \sigma_{r1} = \sigma_{r2}$ et les courbes C_1 et C_2 délimitant les familles de disques sont des inconnus.

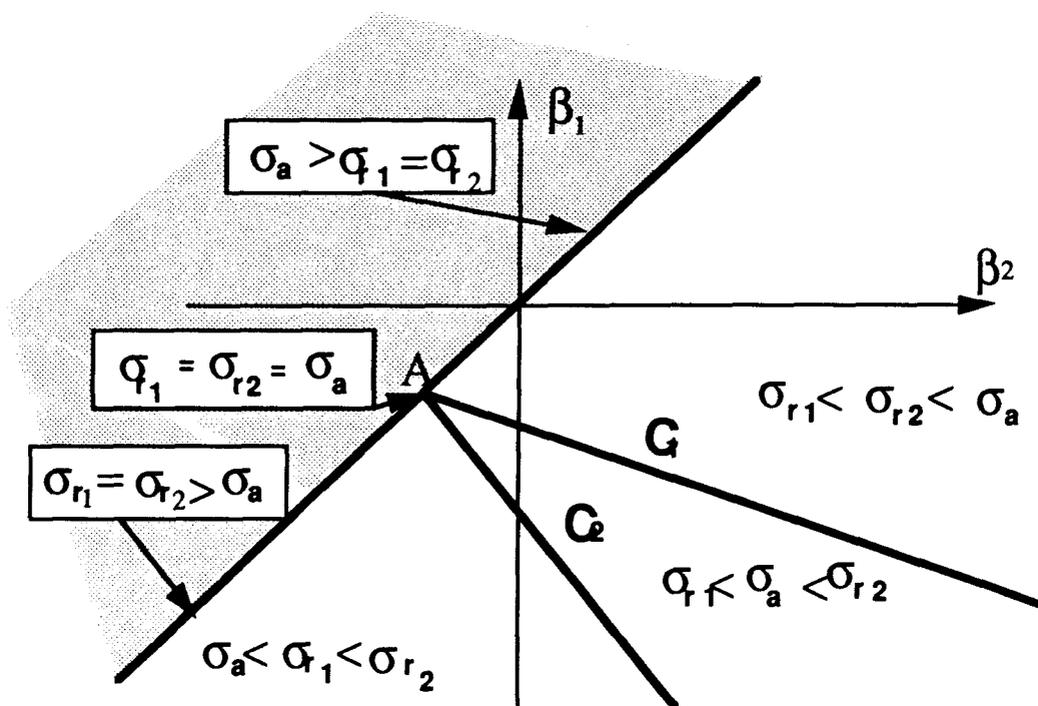


Figure 1.7 : Représentation de l'ordre des contraintes en fonction des angles β_1 et β_2

Une observation détaillée et précise des carottes disquées permet donc d'avoir rapidement des informations importantes sur les directions et l'ordre des contraintes principales $\sigma_A, \sigma_h, \sigma_H$ pour les puits verticaux.

1.3 RESULTATS DES DIFFERENTES APPROCHES EMPIRIQUES

1.3.1 Influence des caractéristiques géomécaniques du matériau.

A partir d'essais réalisés en symétrie de révolution ($\sigma_h = \sigma_H$) sur cinq roches différentes, Obert et Stephenson [38] ont observé que la contrainte radiale de disage varie linéairement en fonction de la contrainte axiale [5] [37] (fig. 1.8)

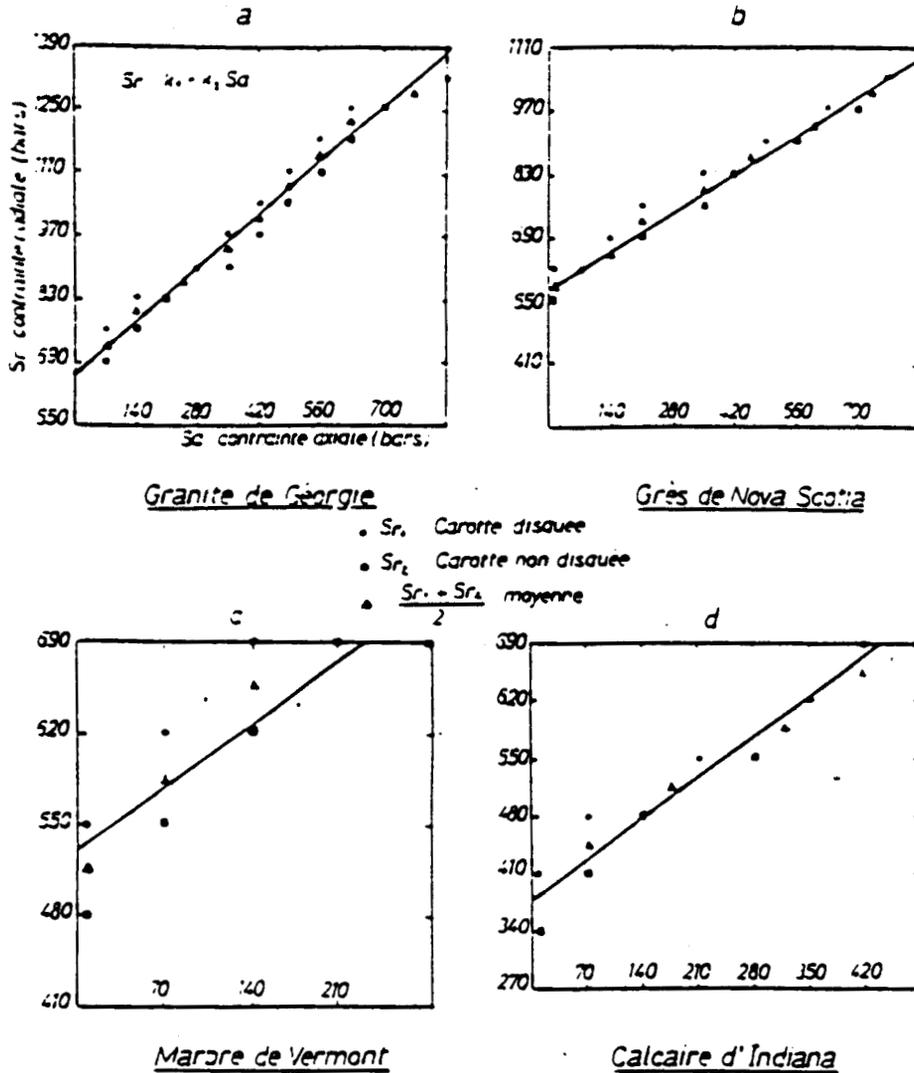


Figure 1.8 : Représentation des droites de disage d'Obert et Stephenson [38]

$$(1) \quad \sigma_R = k_1 + k_2 \sigma_A \quad (\text{MPa})$$

avec σ_R : contrainte radiale (MPa)
 σ_A : contrainte axiale (MPa)

Des corrélations entre k_1 et k_2 et les caractéristiques géomécaniques de la roche ont été effectuées. Moudafi [37] a remarqué, lors de ses essais sur la machine à disquer du CERCHAR, que k_1 varie linéairement en fonction de la résistance à la compression du matériau R_c . Il obtient les relations suivantes :

$$k_1 = 0.92 R_c + 2 \quad (\text{MPa}) \quad \text{pour une porosité élevée}$$

$$k_1 = 1.4 R_c \quad (\text{MPa}) \quad \text{pour une porosité faible (n < 1 \%)}$$

Donc, pour initialiser le discage, il faut que la contrainte radiale appliquée soit au moins égale à la résistance à la compression de la roche [23] [24].

Obert et Stephenson [38] ont relié de façon linéaire k_1 à la résistance au cisaillement τ_0 du matériau, cette relation s'écrit :

$$k_1 = 23 + 2 \tau_0 \text{ (MPa)}$$

Pour ces auteurs, le discage serait initialisé, ou totalement provoqué, par cisaillement [34].

Panet [40] a obtenu, à partir des données d'Obert et Stephenson [38], une relation linéaire liant k_2 (pente des droites d'Obert et Stephenson [38]) à la résistance à la traction de la roche R_t . On a :

$$k_2 = 0.25 + 0.65 \cdot 10^{-2} R_t \text{ (en MPa)}$$

L'influence de R_t sur les contraintes radiales de discage a été également relevée par Moudafi [37] et Hiltcher et Martna [29] lors de leurs expérimentations.

I.3.2 Variation de l'épaisseur des disques en fonction des contraintes appliquées.

Obert et Stephenson [38], Panet [40], Jaegger et Cook [23] ont observé que l'épaisseur des disques diminue lorsque la contrainte radiale augmente et ce, contrairement aux résultats présentés par Moudafi [37] et Boumadhi [5] qui n'ont remarqué, lors de leurs simulations, aucune influence de l'état de contrainte pour deux épaisseurs des disques (L) (fig. 1.9).

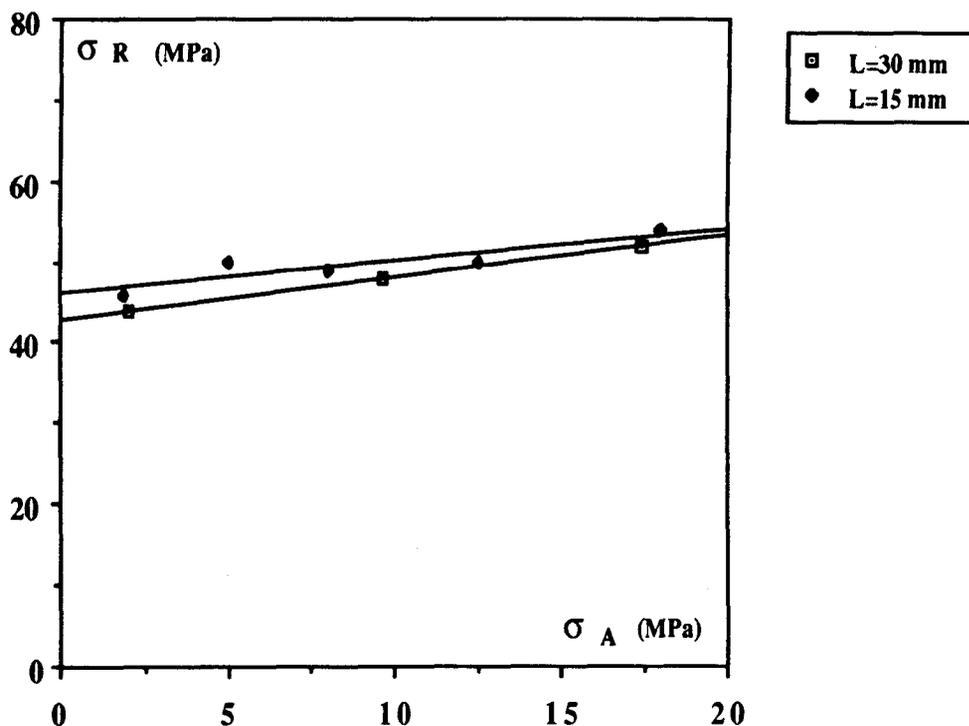


Figure 1.9 : Variation de la contrainte radiale de discage en fonction de la contrainte axiale (Boumadhi [5])

Cette contradiction semble être due à la différence des méthodes et modes opératoires employés. En effet, Boumadhi [5] a utilisé un système d'émission acoustique pour détecter correctement la contrainte radiale correspondant à l'initialisation du discage. Par contre, les valeurs données par les premiers auteurs semblent correspondre à celles du disque formé.

A partir des observations faites sur les carottes disquées du puits de Kola (profond de plus de 10 000 mètres), Basovich [1] a noté que l'épaisseur des disques (ou longueur moyenne des carottes) diminue quand la profondeur augmente (fig. 1.10) [19] [42].

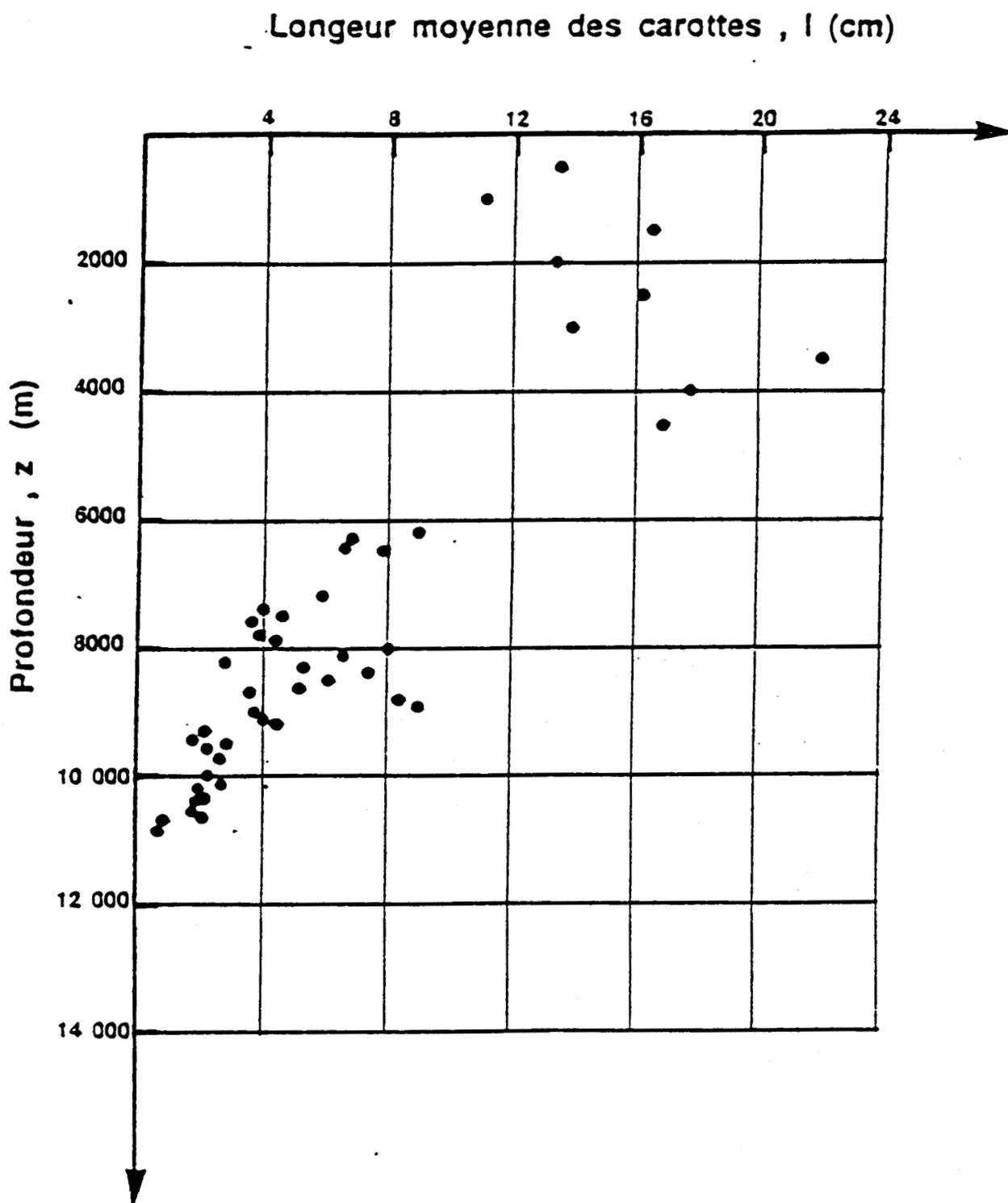


Figure 1.10 : Variation de la longueur moyenne des carottes en fonction de la profondeur

Zanon [51], en reportant sur un histogramme la fréquence d'apparition des disques en fonction de leurs épaisseurs (fig. 1.11) répertorie trois grandes classes de disque. Celle dont l'épaisseur est proche de 4 cm, celle correspondant à des disques de 8 cm, et la troisième regroupant des disques de 14 cm. Une analyse générale de ce phénomène ne peut être faite car nous ne disposons malheureusement pas d'informations sur la géométrie du carottier employée ou sur les caractéristiques géomécaniques de la roche.

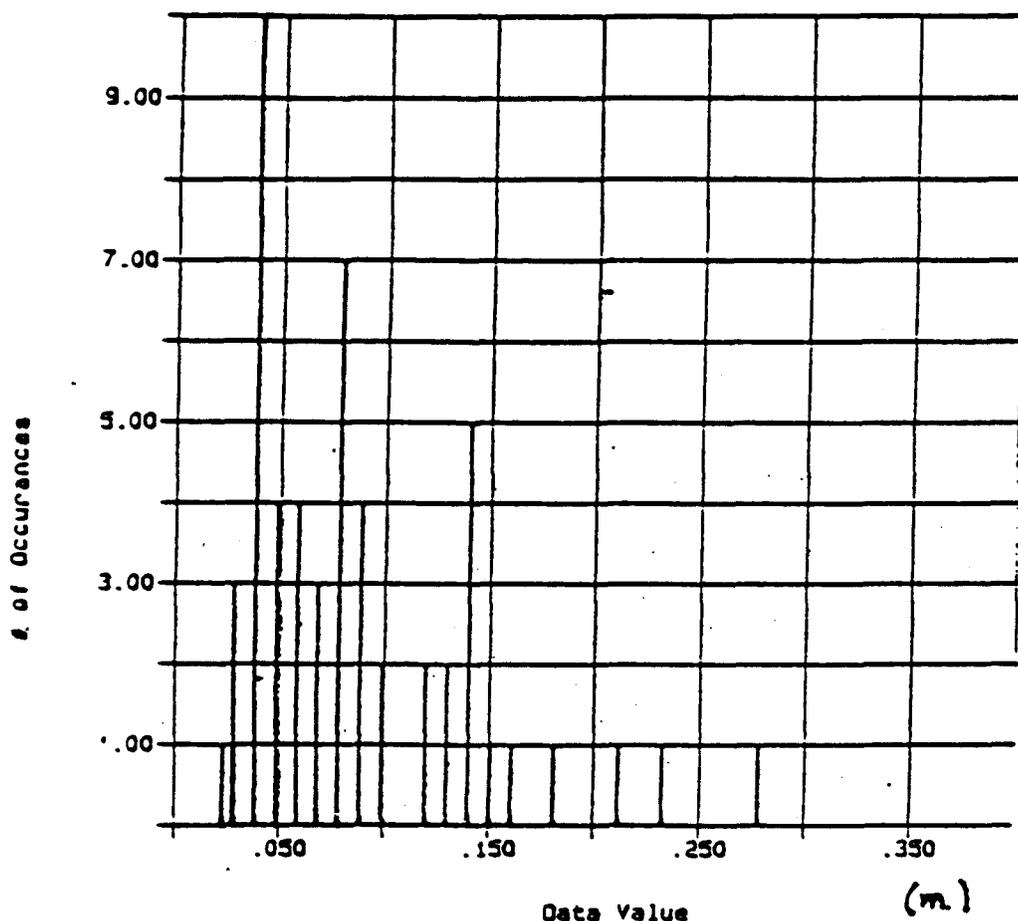


Figure 1.11 : Histogramme du nombre des disques observés en fonction de leurs épaisseurs.

On peut déjà remarquer qu'il existe une différence importante entre les contraintes radiales provoquant l'initialisation de la rupture et celles permettant la formation d'un disque complet. Dans le premier cas, l'épaisseur du disque n'influe pas sur l'état de contrainte engendrant la rupture. Par contre, si l'on considère les valeurs des contraintes obtenues lorsque le disque est achevé, il y a variation de l'épaisseur des disques en fonction de la contrainte radiale, et ce en utilisant des carottiers de laboratoire ou des carottiers pétroliers.

Isaev [22] a observé récemment que l'augmentation de la résistance de la roche augmente l'épaisseur des disques, et que l'augmentation du diamètre de la carotte augmente l'épaisseur des disques alors que le rapport épaisseur sur diamètre des disques diminue [37]. Cette influence du diamètre du carottier sur l'épaisseur des disques a été également soulignée par Zhu Li et Wang [52]. L'analyse des résultats obtenus sur plus de 200 forages montre que le rapport entre l'épaisseur du disque et le diamètre du carottier varie entre 1/3 et 1/4.

La géométrie du carottier semble donc être un paramètre important pour l'étude du discage.

1.3.3 Influence des contraintes sur la forme des disques

Lors des essais réalisés en Laboratoire, ou des observations faites sur les carottes pétrolières, trois formes de disques déjà répertoriées par Miguez [35] ont été décelées :

- la forme assiette due à une isotropie de l'état de contrainte dans le plan perpendiculaire à l'axe du forage [38],
- la forme gouttière dont l'axe correspond à la direction de la contrainte principale mineure pour des cas de chargements anisotropes dans le plan perpendiculaire au forage [30] [32] [33],
- la forme selle de cheval, uniquement observée sur les carottes pétrolières [42] [39].

L'idée d'utiliser la forme de la fracture pour obtenir des informations sur l'état de contraintes in-situ est employée par Wawersik et Stone [50] lors de leurs essais de fracturation hydraulique en milieu inélastique : ils ont pu ainsi observer du discage pour des champs de contraintes anisotropes.

1.3.4 Position du point d'initialisation du discage

Des différences importantes apparaissent sur la position de ce point selon les mécanismes de rupture retenus par les auteurs. On peut toutefois distinguer deux zones susceptibles de correspondre à la position du point d'initialisation de la rupture (fig. 1.12).

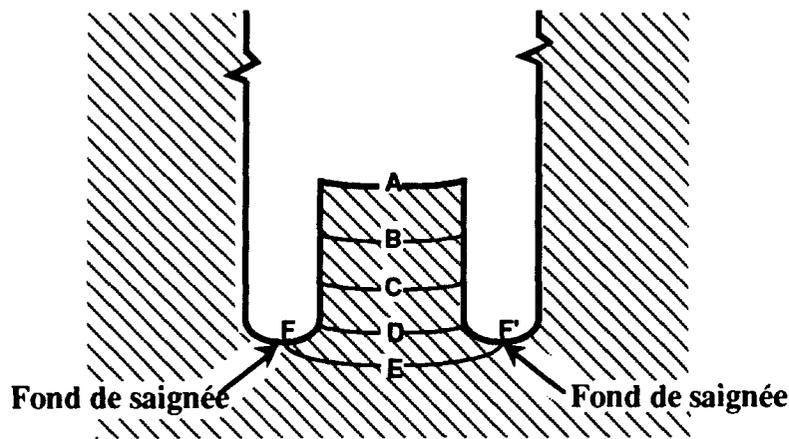


Figure 1.12 : Emplacement des points d'initialisation du discage

Selon Jaegger et Cook [23], ce point se situe sur l'axe de la carotte aux points A, B, C, D ou E, le mécanisme de la rupture est un mécanisme d'extension. Pour Obert et Stephenson [38] et Miguez [34], ce point est sous la saignée aux points F et F'. Le mécanisme de rupture est alors un mécanisme de cisaillement. Cette possibilité qu'a le discage de s'initialiser par l'un de ses deux mécanismes peut expliquer les contradictions quant aux résultats donnés par les différents auteurs.

1.3.5 Conclusions partielles

Une comparaison quantitative entre les différents résultats de laboratoire ne peut être entreprise correctement car les essais ont été réalisés à l'aide de procédures expérimentales variées, avec des carottiers non caractérisés et sur des matériaux différents. Cependant, qualitativement, il ressort que la contrainte radiale nécessaire pour disquer est fortement influencée par :

- les caractéristiques géomécaniques du matériau,
- la configuration géométrique du carottier.

On peut également rappeler le fait que le point d'initialisation du discage peut être situé en deux endroits distincts induisant des modes de rupture différents (ch. 1.3.4), et qu'il faut dissocier les valeurs de la contrainte radiale du disque formé de celles de la contrainte radiale d'initialisation du discage (ch. 1.3.2).

Des essais simulant la présence de boue dans le forage n'ont jamais été effectués dans le sens de l'étude, mais les pétroliers ont pu observer qu'en augmentant la densité de la boue de forage, on pouvait, soit augmenter, soit diminuer la stabilité des puits (Cheatham [6], Maury [33], Guenot [14]).

1.4 L'APPROCHE NUMERIQUE PAR CRITERE

Les simulations effectuées sont le plus souvent axées sur l'étude du mécanisme de rupture occasionnant le discage ainsi que sur la position du point potentiel d'initialisation de la rupture, plutôt que sur la détermination de l'influence de certains paramètres sur le discage.

Afin d'aborder le dernier aspect de ce phénomène, nous avons, outre la bibliographie, procédé à une étude numérique simplifiée. Le modèle utilisé est un modèle plan (déformation plane). L'organigramme du programme est représenté sur la figure 1.13.

Nous avons supposé le matériau linéaire, élastique, homogène et isotrope et un critère de rupture parabolique (parabole de Torre Léon). La méthode numérique de calcul est la méthode des discontinuités de déplacement [3] [8] [17] [18] [36] [48].

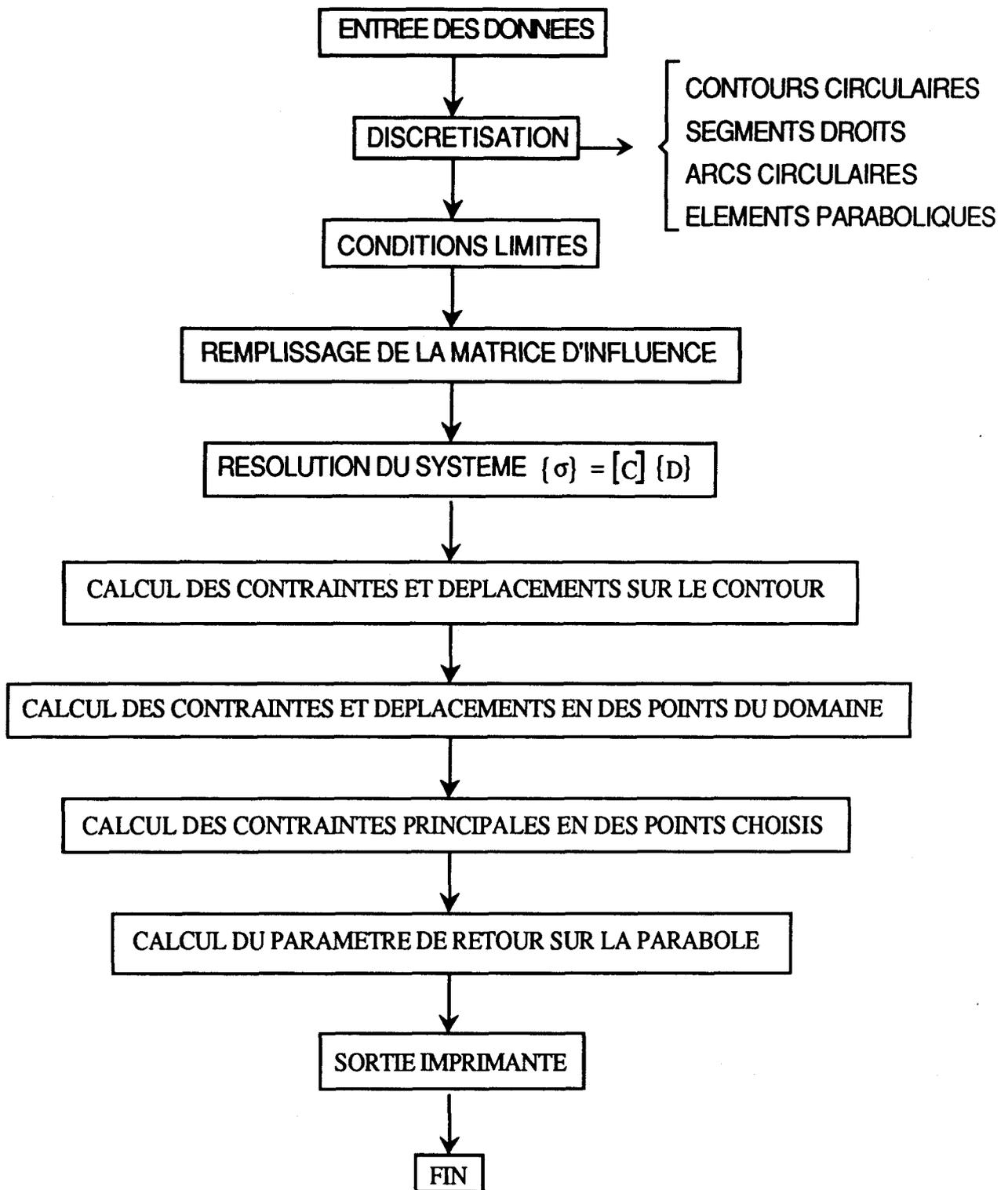


Figure 1.13 : Modèle utilisé dans la pré-étude

1.4.1 Influence des résistances mécaniques de la roche

En reprenant les résistances à la traction et à la compression utilisées par Obert et Stephenson [38], nous avons trouvé avec le modèle simplifié que les contraintes radiales de disage variaient linéairement en fonction des contraintes axiales (fig. 1.14).

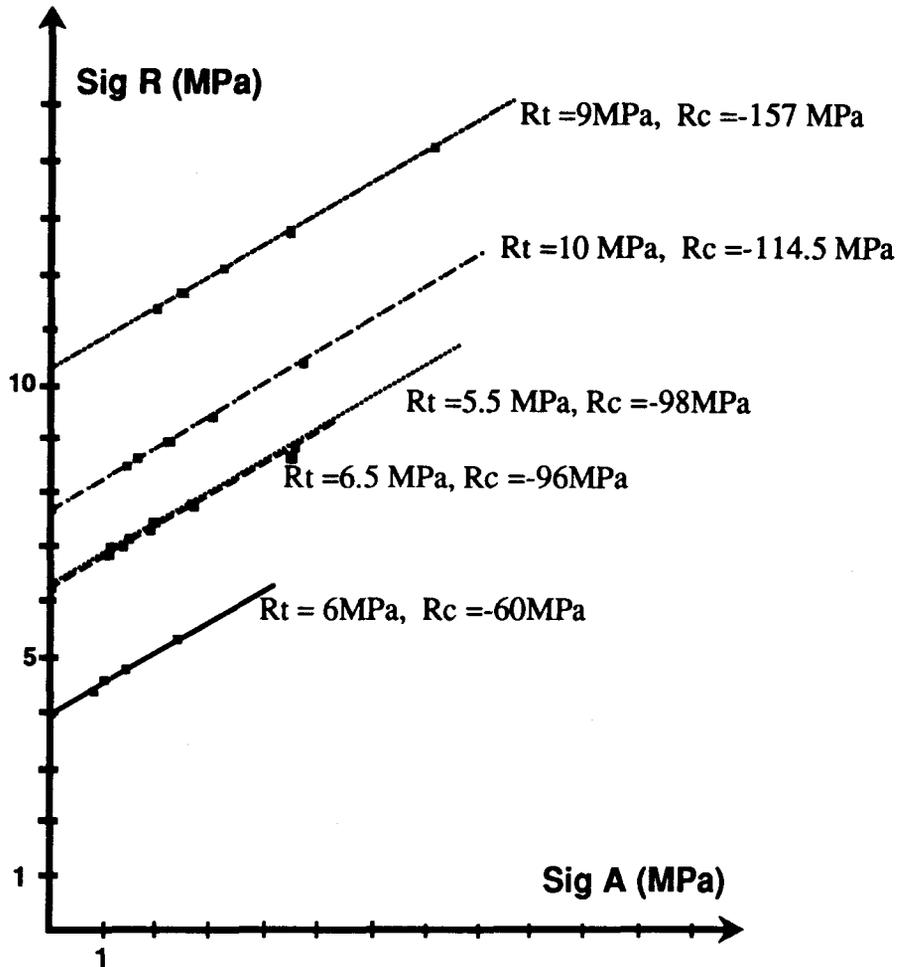


Figure 1.14 : Variation des contraintes de disage en fonction de R_c et R_t

On note que plus la résistance à la compression augmente, plus l'ordonnée à l'origine k_1 de ces droites augmente, par contre la pente k_2 semble être constante quelque soit le matériau. Les valeurs des contraintes de disage sont inférieures à celles obtenues par Obert et Stephenson [38]. Cette différence est due au fait que dans notre cas, on s'intéresse à l'initialisation de la rupture tandis que pour ces expérimentateurs, les valeurs relevées sont celles obtenues lorsque le disque est formé. Sugawara et al [44] obtiennent le même résultat à partir de leurs simulations faites par un programme éléments finis tridimensionnel, leur critère de rupture étant celui de Mohr.

Pour tous les cas étudiés, une relation linéaire relie la contrainte radiale de disage à la résistance au cisaillement de la roche, (τ_0) (pour $\sigma_A = \text{constante}$). Pour le type de carottier donnant les contraintes σ_R et σ_A de la figure 1.14, on obtient la relation $\sigma_R = 2 + 0.25 \tau_0$ (où $\sigma_A = 0 \text{ MPa}$) (fig. 1.15).

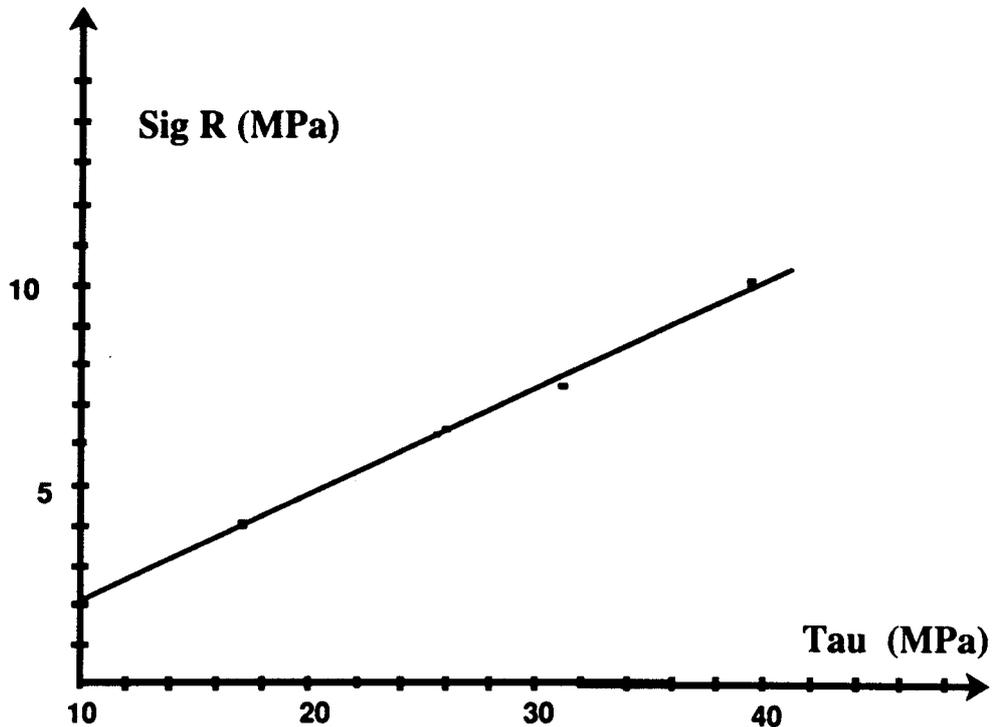


Figure 1.15 : Variation de σ_R en fonction de τ_0 pour obtenir le discage à σ_A constante

Cette constatation est à rapprocher de celle de Durelli et al [10] qui ont travaillé sur un modèle tridimensionnel photoélastique en utilisant le critère de rupture du cisaillement maximum. L'expression de la droite obtenue, pour leur géométrie de carottier, est :

$$\sigma_R = \frac{2 \tau_0}{5} + 0.3 \sigma_A \text{ (MPa)}$$

On peut également citer les travaux de Sugawara et al [44] qui, ayant supposé que le discage était dû à des contraintes de traction, ont représenté les variations des contraintes radiales de discage en fonction de la résistance à la traction de la roche. Pour un chargement isotrope $\sigma_R = \sigma_T$, ils obtiennent la relation linéaire suivante $\sigma_R = 4 R_t + \sigma_A$ (où σ_R , σ_A et R_t sont exprimés en MPa). Cette relation deviendrait en chargement anisotrope $(\sigma_R + \sigma_T)/2 = 4 R_t + \sigma_A$ (avec $\sigma_T < 0.4 \sigma_R$).

1.4.2 Influence des modules de la roche

Bauer [2] a testé l'influence du coefficient de Poisson ν et du module d'Young E sur la concentration de contrainte en fond de saignée. Son programme est construit en symétrie de révolution et utilise les éléments finis. Il a déterminé qu'à ν constant, le coefficient de concentration de contraintes en fond de saignée R est indépendant de E , mais qu'à E constant, R est une fonction croissante de ν (fig. 1.16).

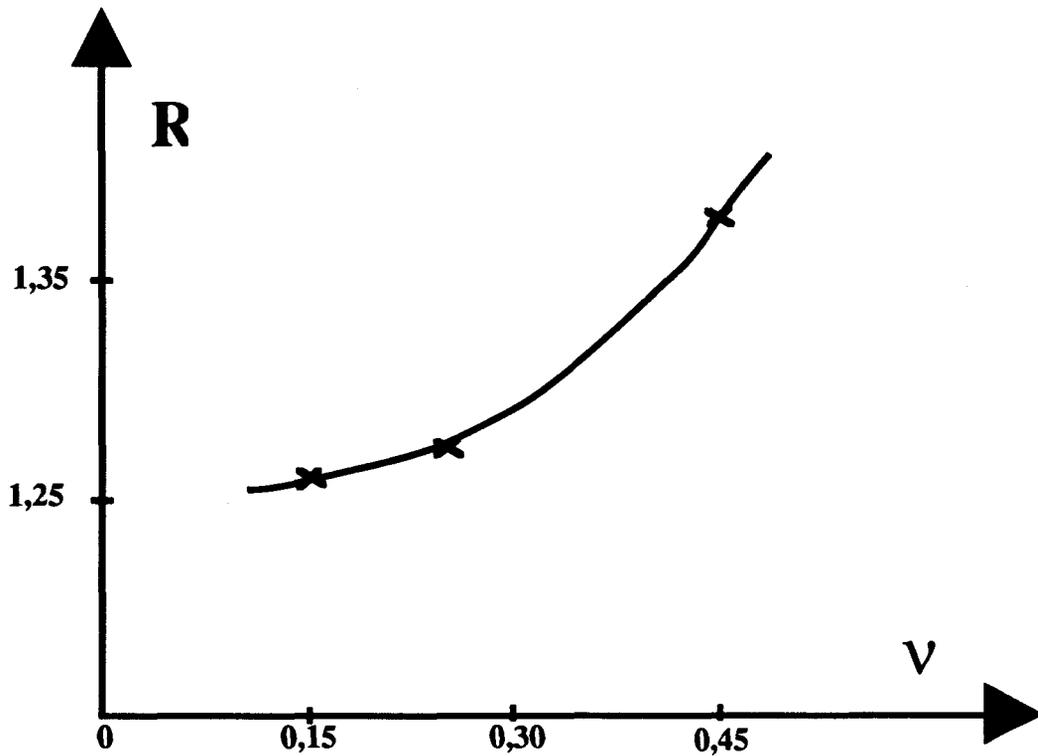


Figure 1.16 : Variation de la concentration des contraintes en fonction de v

1.4.3 Influence de la géométrie du carottier

Reprenons une partie des résultats que nous avons obtenu avec le "modèle simplifié". Pour un rapport rayon extérieur R_e sur rayon intérieur R_i fixe du carottier, plus le rayon intérieur diminue, plus la contrainte radiale d'initialisation du discage, diminue pour une saignée plate (figure 1.17 a), et pour une saignée circulaire (figure 1.17 b).

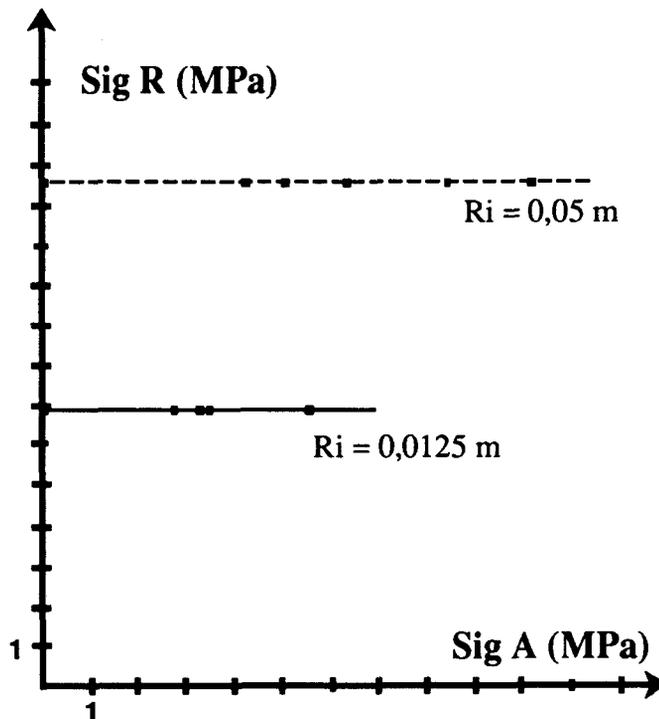


Figure 1.17(a) : Variation de σ_R en fonction de σ_A pour un carottier à fond plat

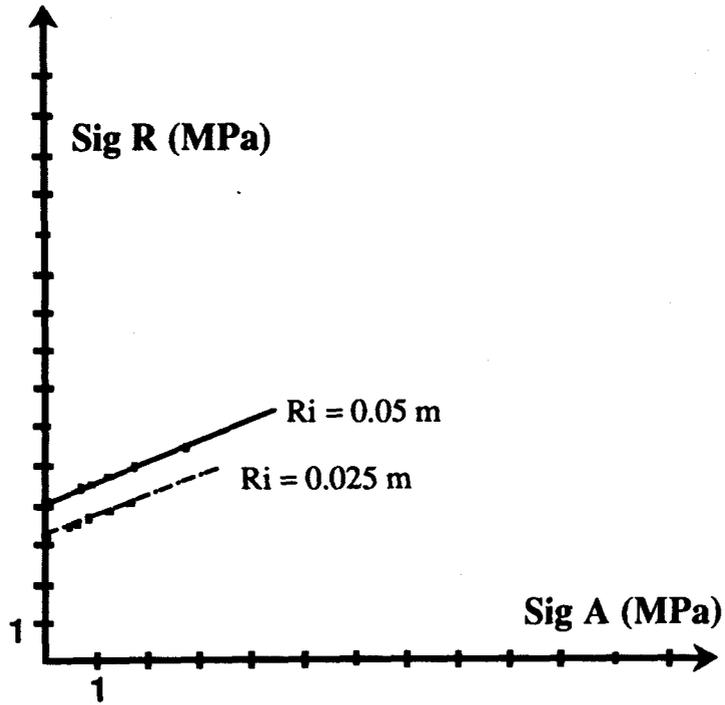


Figure 1.17 (b) : Variation de σ_R en fonction de σ_A pour un carottier à fond circulaire

Pour un rayon intérieur constant, plus le rayon extérieur diminue (plus R_e/R_i diminue), plus les contraintes radiales d'initialisation du disage diminuent (fig. 1.18).

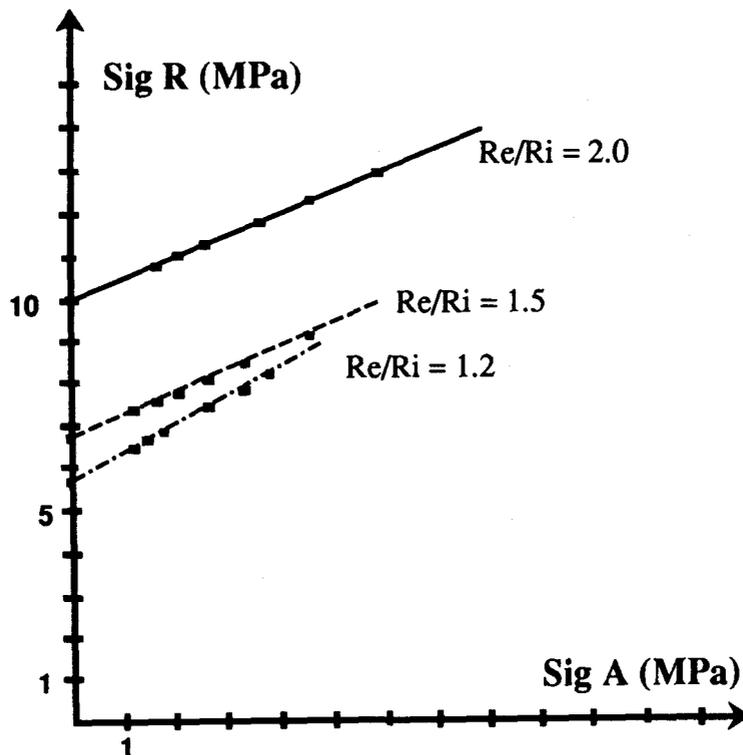


Figure 1.18 : Variation de σ_R en fonction de σ_A (carottier à fond plat) pour différents rapports R_e/R_i

Pour un rapport de rayon R_e/R_i du carottier de 1.5, les contraintes radiales d'initialisation de discage pour des saignées circulaires, sont plus faibles que pour un carottier à fond plat (fig. 1.19 a).

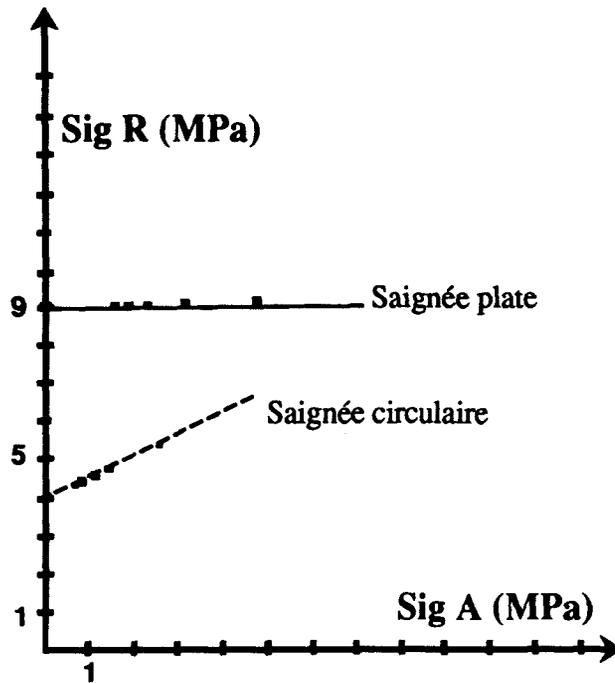


Figure 1.19 (a) : Variation de σ_R en fonction de σ_A pour deux formes du carottier ($R_e/R_i = 1.5$)

Par contre, pour un rapport R_e/R_i de 1.2, on obtient le phénomène inverse (fig. 1.19 b).

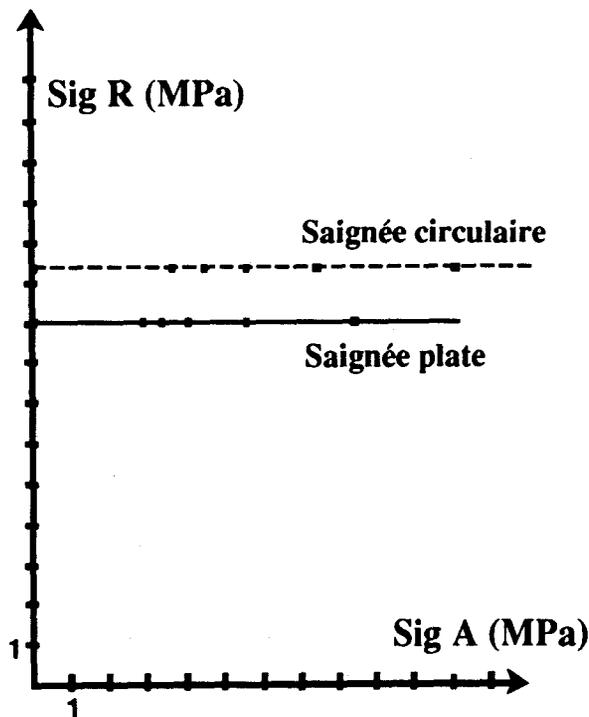


Figure 1.19 : Variation de σ_R en fonction de σ_A pour deux formes du carottier ($R_e/R_i = 1.2$)

On constate donc que la forme et la géométrie du carottier influent fortement sur les contraintes d'initialisation du discage. Les contradictions entre les résultats cités ci-dessus proviennent de deux phénomènes.

- Le premier est le facteur de concentration de contraintes (pour les faibles rapports R_e/R_i du carottier) qui s'additionne à celui produit par les "coins" (problèmes numériques) pour les fonds de saignées plates.
- Le second provient d'effets numériques liés à la méthode utilisée dans les méthodes intégrales : le calcul près de la frontière est difficile notamment lorsque les gradients sont importants.

Le couplage, entre le facteur de concentration de contrainte et la perturbation induite par la discrétisation (principalement pour des carottiers à fond plat de faible rapport de rayon), influe également sur la position du point potentiel d'initialisation du discage, notamment par l'approximation de calcul près du contour.

Les résultats obtenus pour certains types de carottiers sont donc discutables, et il est nécessaire de faire très attention à l'interprétation des résultats numériques.

L'influence de la géométrie du carottier sur la position du point d'initialisation du discage a été également observé par Stacey [43] en utilisant un modèle éléments finis en symétrie de révolution (le critère de rupture est celui de la déformation maximum).

Dyke [11] a constaté lors de ses analyses tridimensionnelles en élasticité (son critère de rupture étant celui de la déformation maximum) que pour un puits vertical soumis à un chargement anisotrope, l'augmentation de diamètre du forage favorise l'initialisation du discage et que, la forme des disques, pour un diamètre de carottier constant, ne dépend pas de la forme du fond de la saignée.

1.4.4 Influence de l'épaisseur de la carotte

Lors de nos simulations, aucune influence de l'épaisseur de la carotte sur les contraintes radiales d'initialisation de discage n'a pu être décelée. Les valeurs des contraintes autour de la saignée sont quasiment constantes. Cette constatation est à opposer à celle de Stacey [43] et de Chemaou [7]. Les résultats de leurs modélisations par la méthode d'éléments finis en symétrie de révolution montrent une forte variation de la zone à haute probabilité de rupture (donc des contraintes radiales d'initialisation de discage), selon l'épaisseur de la carotte (fig. 1.20 a, b).

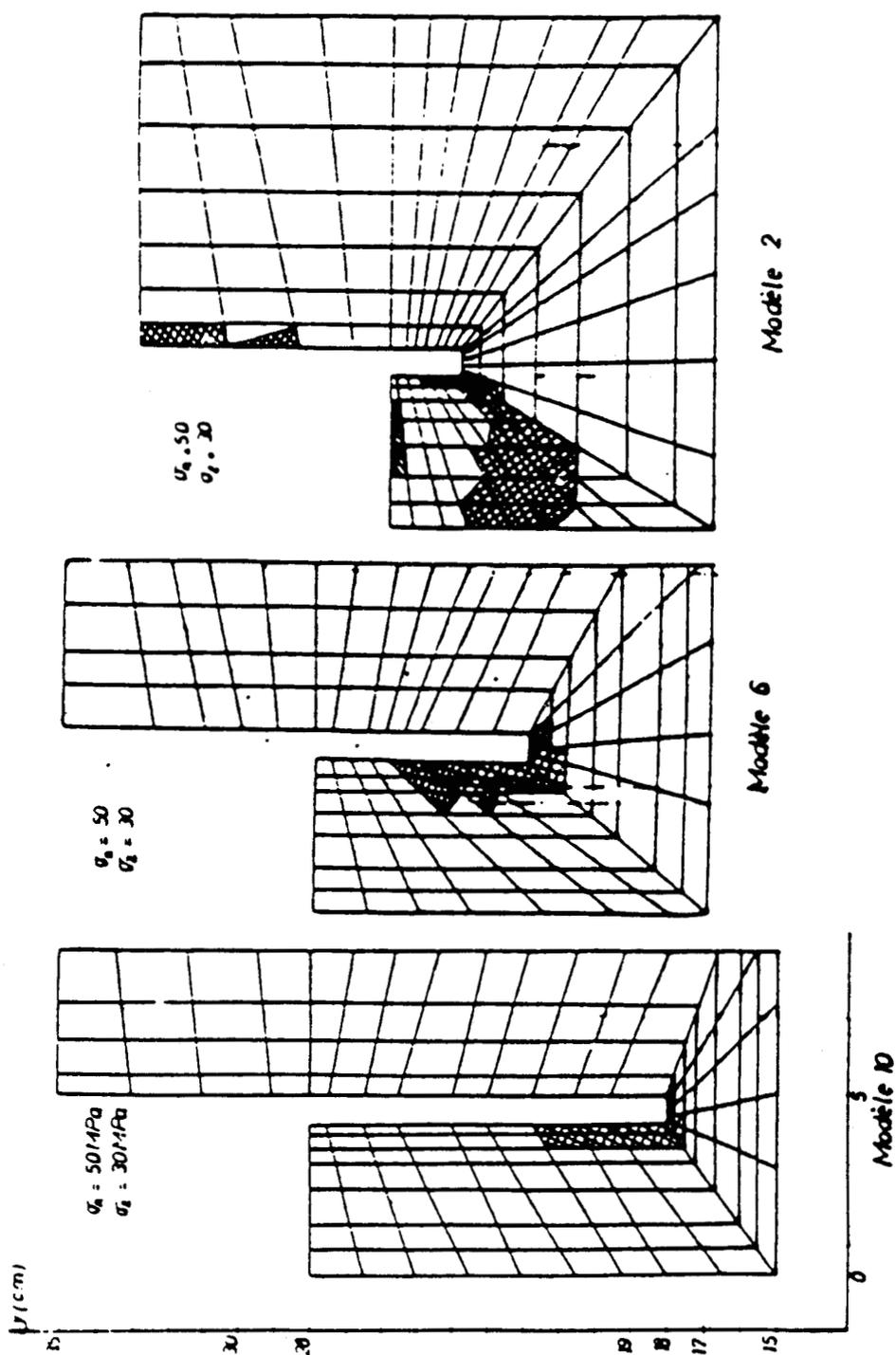
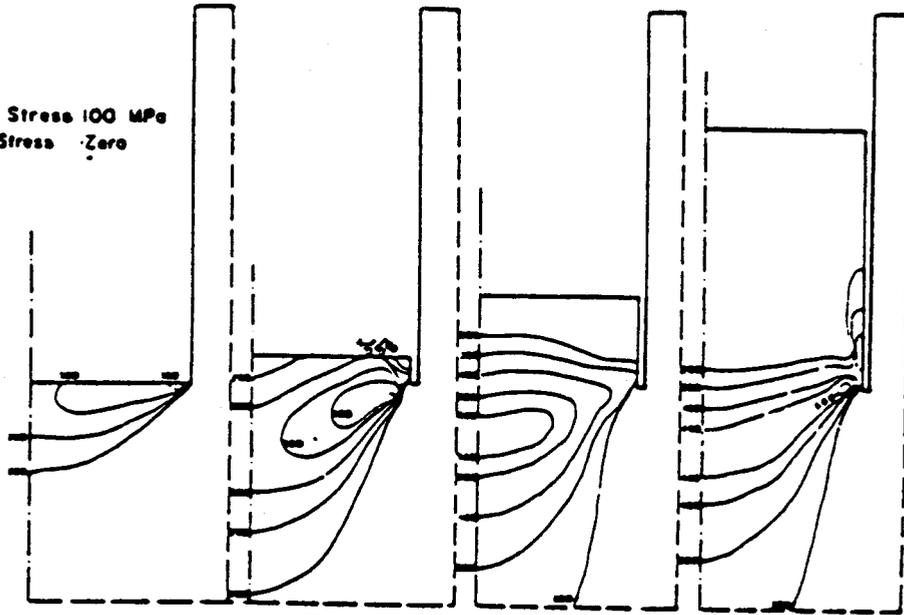
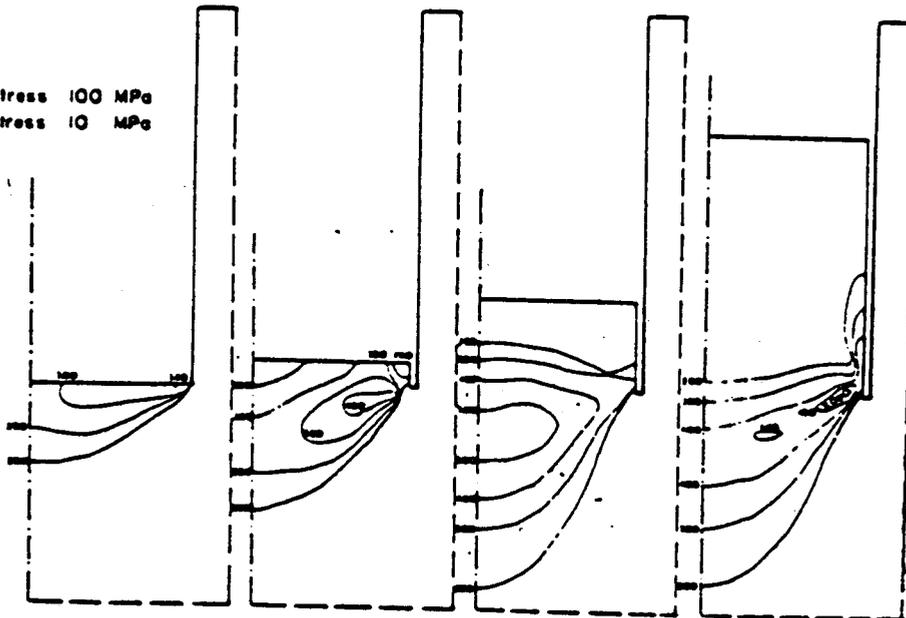


Figure 1.20.a : Variation de la zone à haute probabilité de rupture en fonction de l'épaisseur des disques (Chémaou [7])

(a) Radial Stress 100 MPa
Axial Stress Zero



(b) Radial Stress 100 MPa
Axial Stress 10 MPa



(c) Radial Stress 100 MPa
Axial Stress 30 MPa

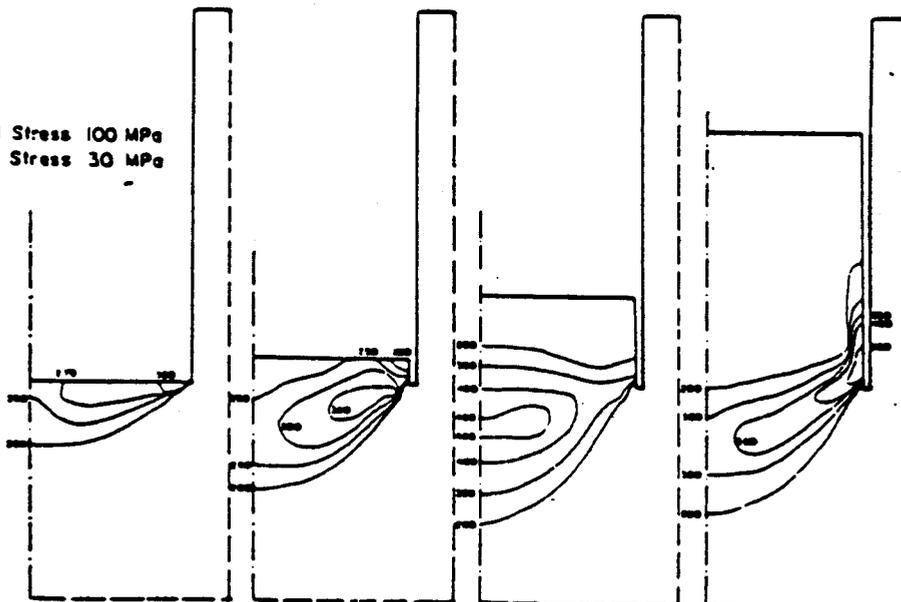


Figure 1.20.b : Variation des isocritères en fonction de l'épaisseur des disques (Stacey [43])

Bauer [2] et Sugawara et al [44] ont établi des corrélations entre l'état de concentration de contrainte, et le rapport épaisseur (P) des disques sur diamètre du carottier ϕ . A épaisseur de disque constante, le facteur de concentration de contrainte (R) sous la saignée croît de 1.25 à 1.55 lorsque ce rapport (P/ ϕ) passe de 2.5 à 20 (fig. 1.21).

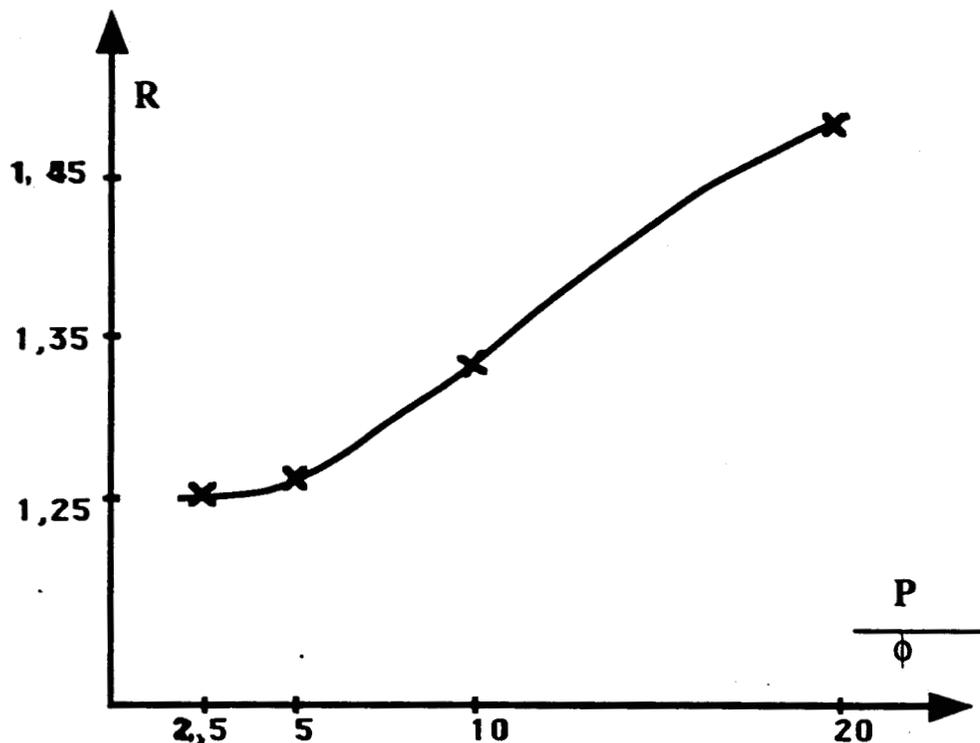


Figure 1.21 : Influence du rapport P/ϕ sur la concentration des contraintes [2].

Pour un diamètre de carottier constant, l'augmentation de l'épaisseur des disques augmente les contraintes de discage et ce jusqu'à un rapport épaisseur des disques (L) sur diamètre de carottier (D) (L/D) inférieur à 0.4 (fig. 1.22 [44]).

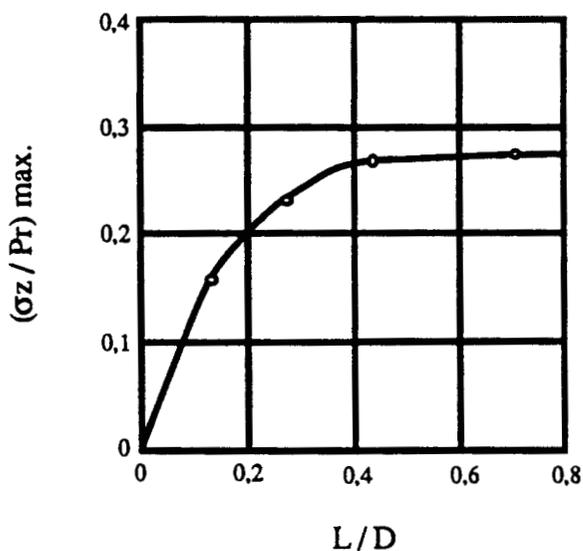


Figure 1.22 : Variation de la concentration de contrainte en fonction de L/D [44]

1.4.5 Indications sur la position du point d'initialisation du discage et sur l'état de contrainte pouvant provoquer la rupture

Lors de chaque simulation en saignée circulaire, le point potentiel d'initialisation du discage se trouve sous la saignée. Il se déplace le long du fond du carottier vers l'intérieur du domaine lorsque le rapport contrainte radiale sur contrainte axiale K (K : coefficient de poussée des terrains) augmente. Pour des saignées plates, on observe la même migration de ce point du coin externe du carottier au coin interne.

On a également noté que l'augmentation de K favorise l'extension de la zone à haute probabilité de rupture, du fond de la saignée à l'axe du carottier (fig. 1.23).

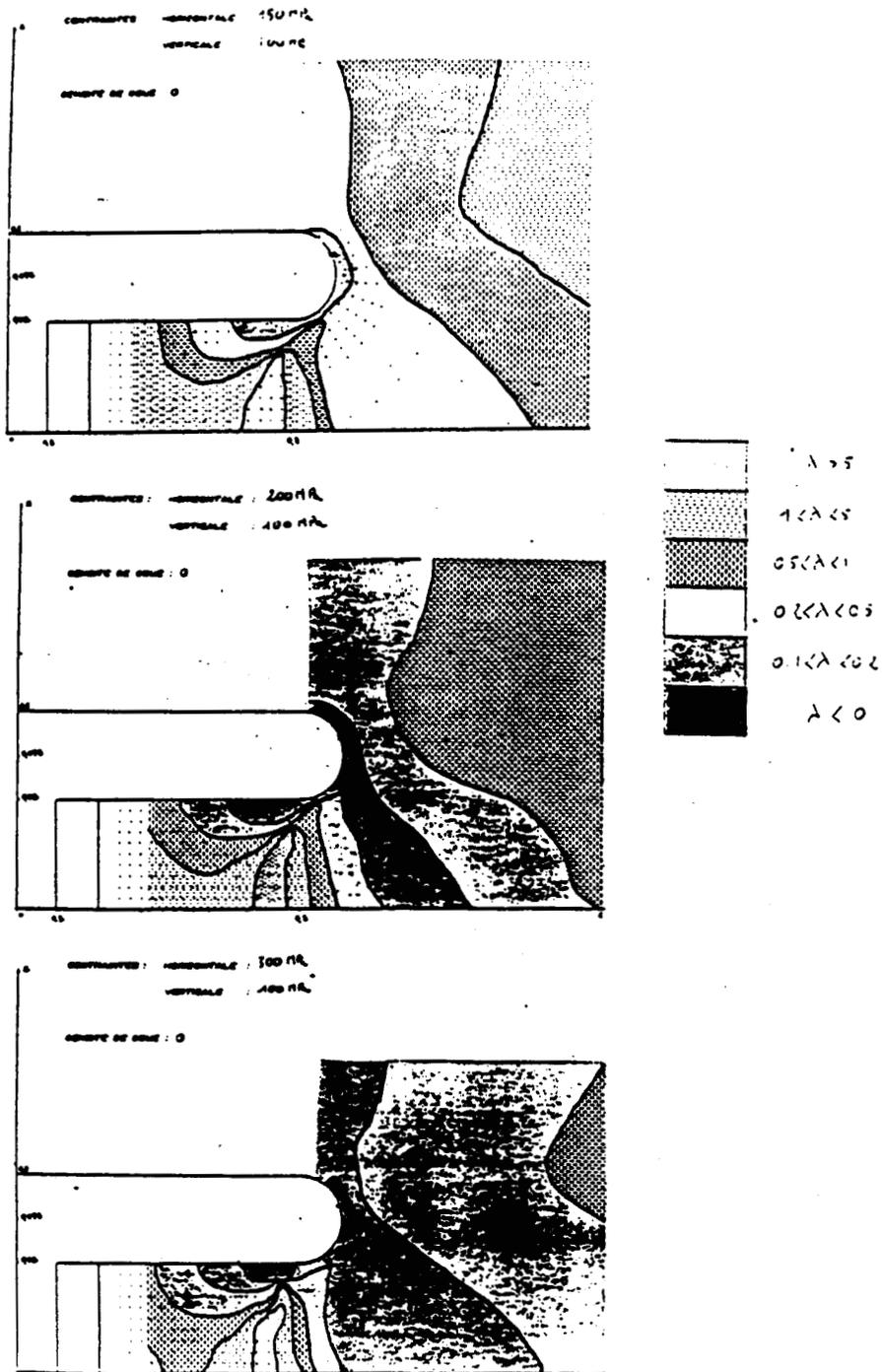


Figure 1.23 : Evolution des isocritères en fonction de K

L'examen de la distribution des contraintes obtenue dans nos simulations permet de découper le domaine en quatre zones principales (fig. 1.24).

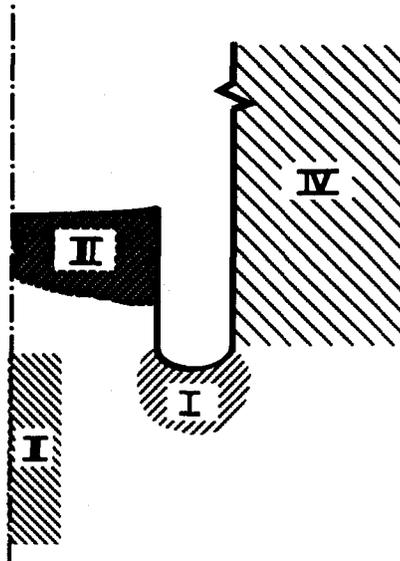


Figure 1.24 : Distribution des contraintes dans le domaine

La première zone (I) se trouve sous la saignée ; elle correspond à un fort cisaillement et abrite le point d'initialisation du disage. Durelli [10] et Stacey [43], pour de forts coefficients de poussée, obtiennent le même résultat. La seconde zone (II) qui se situe sous l'axe du carottier est un domaine de fortes compressions et faibles tractions. Le point d'initialisation du disage se situe à cet endroit pour Sugawara et al [44] (la rupture étant amorcée par traction) et pour Stacey [43] (pour des contraintes radiales faibles). Le côté interne de la saignée (zone III) est en traction, tandis que le côté externe (zone IV) est en compression pure. Les résultats des différentes simulations effectuées à partir de notre "modèle simplifié" semblent impliquer que l'initialisation de la rupture est provoquée par un fort cisaillement et ce, contrairement aux interprétations de Dyke [11] qui estime que le mécanisme qui initialise la rupture est un mécanisme de traction ; la contrainte de cisaillement n'intervient qu'après l'amorçage du disage.

1.5 CONCLUSIONS

Les variations des contraintes radiales de disage σ_r en fonction des contraintes axiales, obtenues sur le grès de Vouters et sur un calcaire par l'intermédiaire des différentes relations exposées ci-dessus (ch. 1.2, 1.3) montre une forte dispersion des résultats (Miguez [35], fig. 1.25) rendant vaine toute comparaison quantitative.

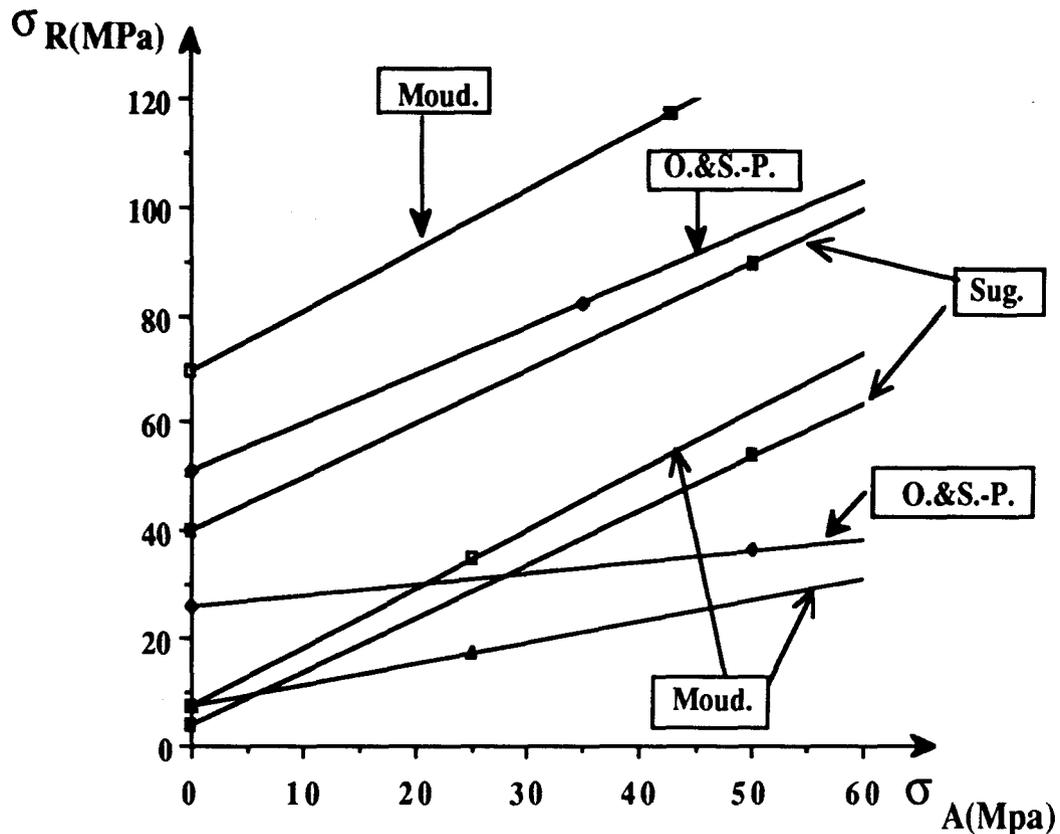


Figure 1.25 : Variation des contraintes de discage selon différents auteurs

On constate ainsi que les valeurs des contraintes obtenues dépendent du moyen d'analyse et du mode opératoire suivis (sous chargement statique ou dynamique), des caractéristiques géomécaniques du matériau et géométriques du carottier. L'écart entre les résultats numériques et expérimentaux correspond à la formation du disque, c'est-à-dire que la méthode d'approche par critère donne les valeurs des contraintes radiales d'initialisation du discage, tandis que la méthode d'approche empirique fournit les contraintes radiales correspondant au disque formé.

Qualitativement, on a remarqué pour les différentes études que les contraintes radiales d'initialisation ou de formation du disque varient linéairement en fonction des contraintes axiales et des caractéristiques géomécaniques du matériau (R_c , τ_0). On a également noté une influence de la forme du fond de la saignée et du rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier (selon le type du carottier). Quelques contradictions existent cependant au niveau de :

- **L'initialisation du discage :**

Elle peut se produire sous la saignée, selon un mode de rupture en cisaillement ou sous l'axe de la carotte selon un mécanisme de rupture en traction,

- **L'influence de l'épaisseur des disques :**

Les résultats numériques et expérimentaux montrent :

- soit une diminution de l'épaisseur des disques lorsque l'état de contrainte augmente,
- soit une non variation de ces contraintes de discage en fonction de l'épaisseur des disques.

Aucune étude complète du discage n'ayant été réalisée (expérimentation - modélisation - validation), on ne peut confirmer l'une ou l'autre de ces hypothèses.

Nous nous sommes donc fixés comme objectif, la mise au point d'un logiciel, plutôt axé sur les problèmes pétroliers, permettant l'étude de l'influence de certains paramètres sur le discage en présence de boue en fond de saignée. Ce logiciel sera décrit au chapitre II. Le modèle sera en symétrie de révolution et le calcul des contraintes s'effectuera par la méthode des éléments finis qui est la plus adaptée à ce problème. Cette modélisation s'appuiera sur des essais réalisés au CERCHAR (machine à disquer de Moudafi [37]) et au Laboratoire de Mécanique de Lille (triaxial vrai [5]) afin d'être validée (chapitre III).

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DU LOGICIEL DISCAGELF

2.1 OBJECTIFS

Afin de définir les paramètres les plus influents sur les redistributions de contraintes et de percevoir la façon dont peuvent se mettre en place les conditions menant au processus de rupture par discage (en le favorisant ou en le retardant), un logiciel DISCAGELF offrant le maximum de possibilités quant à la géométrie du domaine a été conçu. Son but principal n'étant pas de déterminer exactement les contraintes in-situ mais plutôt d'obtenir des indications sur le rôle de certains paramètres sur les contraintes de discage, les hypothèses de travail seront simplifiées. Pour effectuer de nombreuses simulations en conservant un faible coût de calcul, le matériau est supposé élastique linéaire homogène et isotrope. Le modèle est en symétrie de révolution ce qui semble le plus proche des conditions moyennes de "terrain". La méthode de calcul est celle des éléments finis.

Lors de l'élaboration de ce logiciel, trois objectifs principaux ont été visés :

- DISCAGELF doit pouvoir être utilisé facilement et être accessible à une personne ne connaissant pas la méthode de calcul. Un pré-processeur (module) de **maillage automatique du domaine** est donc nécessaire quelque soit le type de carottier qui entrera dans le modèle. Pour ce faire, l'utilisateur doit disposer d'un menu répertoriant les principaux types de fond de saignée. Le nombre d'entrées pour la discrétisation est ainsi limité au numéro correspondant à la géométrie de l'outil de forage souhaité (IMAIL), à l'épaisseur des carottes et au degré de raffinement du maillage.
- DISCAGELF doit pouvoir répondre à certaines exigences des ingénieurs pétroliers "sur un site précis" soumis à certaines conditions de prospection : "Quelle densité de boue choisir ? Quel type de carottier doit être utilisé pour ne pas provoquer de rupture ? ... Il doit donc pouvoir être implanté sur des micros (type PC), de moyenne capacité. Une possibilité de **loupe** doit être offerte à l'utilisateur afin de réduire le domaine d'étude sur la zone à haute probabilité de rupture sans augmenter exagérément le nombre d'éléments et de noeuds du maillage : une discrétisation trop importante pouvant mener à un dépassement de la place mémoire de l'ordinateur.

- Tous les résultats doivent pouvoir être exploités facilement par l'intermédiaire de sorties graphiques. Un post processeur (ISOVAL) permettant d'obtenir des courbes d'isovaleurs du paramètre de discage (§ 2.2), des contraintes principales (valeurs et directions) est donc employé. On pourra ainsi essayer de relier la forme des disques à un état de contrainte donné.

Ce logiciel sera donc peu sophistiqué du point de vue de la modélisation de comportement du matériau (comportement élastique linéaire), mais il doit avoir les avantages d'être d'utilisation facile, de répondre à des problèmes précis et de donner une bonne approximation des contraintes en place.

2.2 PRESENTATION DU CRITERE DE RUPTURE

Un critère de type Lade [26] n'étant pas indispensable au vu de nos hypothèses de travail (non influence de la contrainte intermédiaire), nous avons retenu le critère de la parabole de Torre Léon, plus aisé d'utilisation, et qui, contrairement au critère de Mohr-Coulomb, présente l'avantage de ne pas trop surestimer les contraintes principales de rupture dans une zone en forte compression (cette situation pouvant se présenter lorsque l'on injecte de la boue à grande profondeur).

L'équation de la parabole (courbe enveloppe des plus grands cercles de Mohr (fig. 2.1)) est [17] :

$$(2.1) \quad \tau^2 + B.C \sigma - C^2 = 0$$

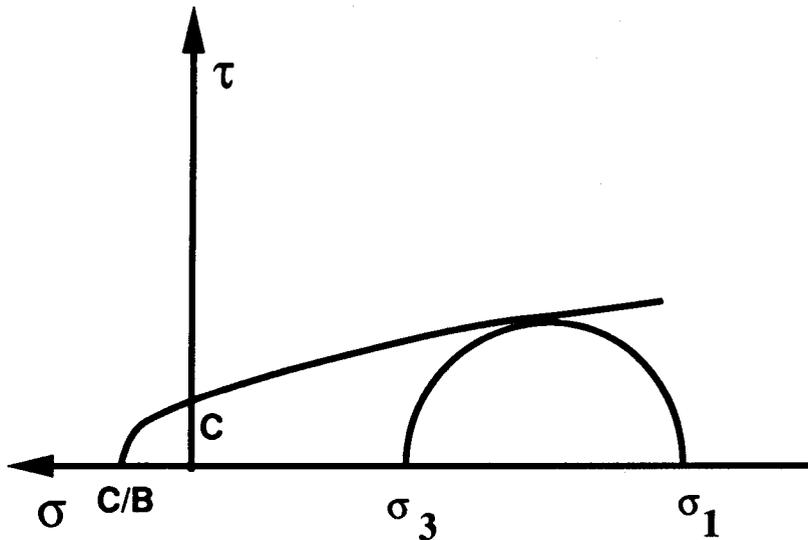


Figure 2.1 : Représentation du critère de Torre Léon

En écrivant cette équation dans l'espace des contraintes principales avec $\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$; on obtient :

$$(2.2) \quad (\sigma_3 - \sigma_1)^2 - (R_t + R_c) (\sigma_1 + \sigma_3) + R_t R_c = 0$$

R_t : Résistance à la traction du matériau > 0

R_c : Résistance à la compression du matériau < 0

Soit $\sigma_1^0, \sigma_2^0, \sigma_3^0$ les contraintes principales calculées pour un chargement donné en un point du domaine, le grand cercle de Mohr résultant peut être différent du grand cercle tangent à la parabole (fig. 2.2).

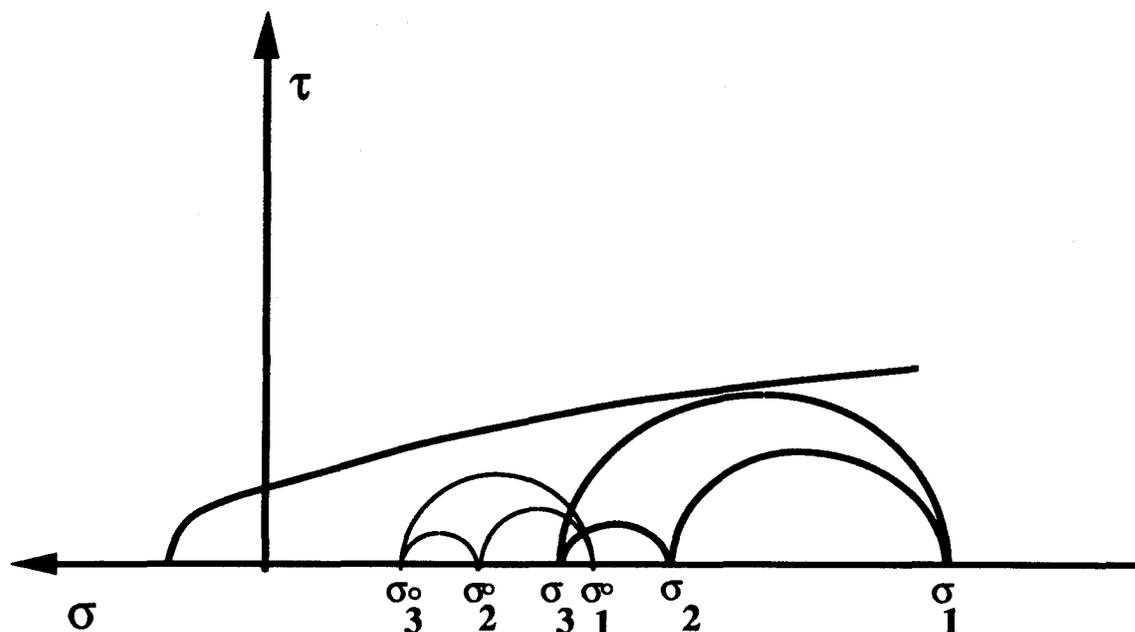


Figure 2.2 : Représentation des contraintes principales calculées par rapport aux contraintes principales de rupture

En désignant par λ le paramètre de retour sur le critère et par, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ les contraintes principales correspondantes à la rupture, on pose :

$$(2.3) \quad \begin{aligned} \sigma_1 &= \lambda \sigma_1^0 \\ \sigma_2 &= \lambda \sigma_2^0 \\ \sigma_3 &= \lambda \sigma_3^0 \end{aligned}$$

En introduisant ce système dans l'équation (2.2), on obtient (2.4) :

$$(2.4) \quad \lambda^2 (\sigma_3^0 - \sigma_1^0)^2 - \lambda(R_t + R_c) (\sigma_1^0 + \sigma_3^0) + R_t R_c = 0$$

Les solutions de cette équation sont :

$$(2.5) \quad \lambda = \frac{(R_t + R_c) (\sigma_1^0 + \sigma_3^0) \pm \sqrt{(\sigma_1^0 + \sigma_3^0)^2 (R_t - R_c)^2 + 16 R_t R_c \sigma_1^0 \sigma_3^0}}{2 (\sigma_3^0 - \sigma_1^0)^2}$$

Nous ne retiendrons que les valeurs positives de λ afin de ne pas transformer des contraintes de traction en contraintes de compression (et inversement), ce qui revient à prendre :

$$\lambda = \frac{(R_t + R_c) (\sigma_1^0 + \sigma_3^0) + \sqrt{(\sigma_1^0 + \sigma_3^0)^2 (R_t - R_c)^2 + 16 R_t R_c \sigma_1^0 \sigma_3^0}}{2 (\sigma_3^0 - \sigma_1^0)^2}$$

$(R_t + R_c) (\sigma_1^0 + \sigma_3^0)$ étant inférieur à $\sqrt{(\sigma_1^0 + \sigma_3^0)^2 (R_t - R_c)^2 + 16 R_t R_c \sigma_1^0 \sigma_3^0}$

Lorsque λ est supérieur à 1, le grand cercle de Mohr lié à l'état de contrainte $(\sigma_1^0, \sigma_2^0, \sigma_3^0)$ est à l'intérieur de la parabole : l'état de rupture n'est pas atteint. Si λ est inférieur à 1, le grand cercle de Mohr coupe la parabole : la rupture s'est déjà produite. La tangence au critère est obtenue pour λ égal à 1.

2.3 DETERMINATION DES CONTRAINTES DE DISCAGE

L'idée de base de la méthode de calcul, étant donné que l'on travaille en élasticité linéaire, est liée au principe de la superposition de l'état de contrainte. Cette technique permet, pour une géométrie du domaine fixée, d'effectuer de nombreuses combinaisons de paramètres pour un faible coût de calcul.

Pour chaque type de carottier et d'épaisseur de disques, les contraintes $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}, \sigma_{rz}$ sont calculées aux points de Gauss du maillage et sont stockées sur des fichiers pour quatre modes de chargements différents. On notera :

$\sigma(R)$	les contraintes résultant d'un chargement radial seul	$(\sigma_R = 100 \text{ MPa})$
$\sigma(A)$	les contraintes résultant d'un chargement axial seul	$(\sigma_A = 100 \text{ MPa})$
$\sigma(B)$	les contraintes résultant d'un chargement dû à la pression de boue	$(\sigma_B = 100 \text{ MPa})$
$\sigma(O)$	les contraintes résultant d'un chargement dû au poids sur l'outil	$(\sigma_O = 100 \text{ MPa})$

Lors de la phase de calcul des contraintes de discage, l'utilisateur sélectionne le nombre ainsi que les valeurs de la profondeur du puits, des caractéristiques géomécaniques de différentes roches, de la densité de boue, du poids sur l'outil et de la densité du terrain susjacent.

Les contraintes totales σ^T correspondant à chaque combinaison de ces paramètres sont déterminées par superposition des contraintes obtenues en chaque point de Gauss pour chaque chargements de base tels qu'ils ont été définis auparavant. On a :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{rr}^T &= c_v \sigma_{rr}(A) + c_o \sigma_{rr}(O) + c_r \sigma_{rr}(R) + c_b \sigma_{rr}(B) \\
 \sigma_{zz}^T &= c_v \sigma_{zz}(A) + c_o \sigma_{zz}(O) + c_r \sigma_{zz}(R) + c_b \sigma_{zz}(B) \\
 \sigma_{\theta\theta}^T &= c_v \sigma_{\theta\theta}(A) + c_o \sigma_{\theta\theta}(O) + c_r \sigma_{\theta\theta}(R) + c_b \sigma_{\theta\theta}(B) \\
 \sigma_{rz}^T &= c_v \sigma_{rz}(A) + c_o \sigma_{rz}(O) + c_r \sigma_{rz}(R) + c_b \sigma_{rz}(B)
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

c_v, c_o, c_b sont les coefficients correcteurs connus grâce aux jeux de paramètres d'entrée (profondeur - densité de boue et du terrain). En les multipliant respectivement par les contraintes $\sigma_{ij}(A), \sigma_{ij}(O), \sigma_{ij}(B)$, on obtient le chargement en place.

c_r , égal à $K c_v$, est le coefficient correcteur relatif au chargement radial. K , coefficient de poussée des terrains, est l'inconnue du problème. Pour une valeur de K fixée, le système 2.6 peut être résolu. Les contraintes principales et le paramètre de retour sur la parabole sont alors calculés.

En partant d'une valeur élevée de K ($K = 10$), le paramètre de retour sur la parabole minimum (λ_{\min}) sera inférieur à 1. On procède par itération, en diminuant K jusqu'à ce que λ_{\min} soit égal à 1 (avec une erreur de 10^{-4}). L'état de contrainte correspondant sera celui qui déclenchera la rupture (tangence au critère). L'organigramme de cette partie du programme est représentée sur la figure 2.3.

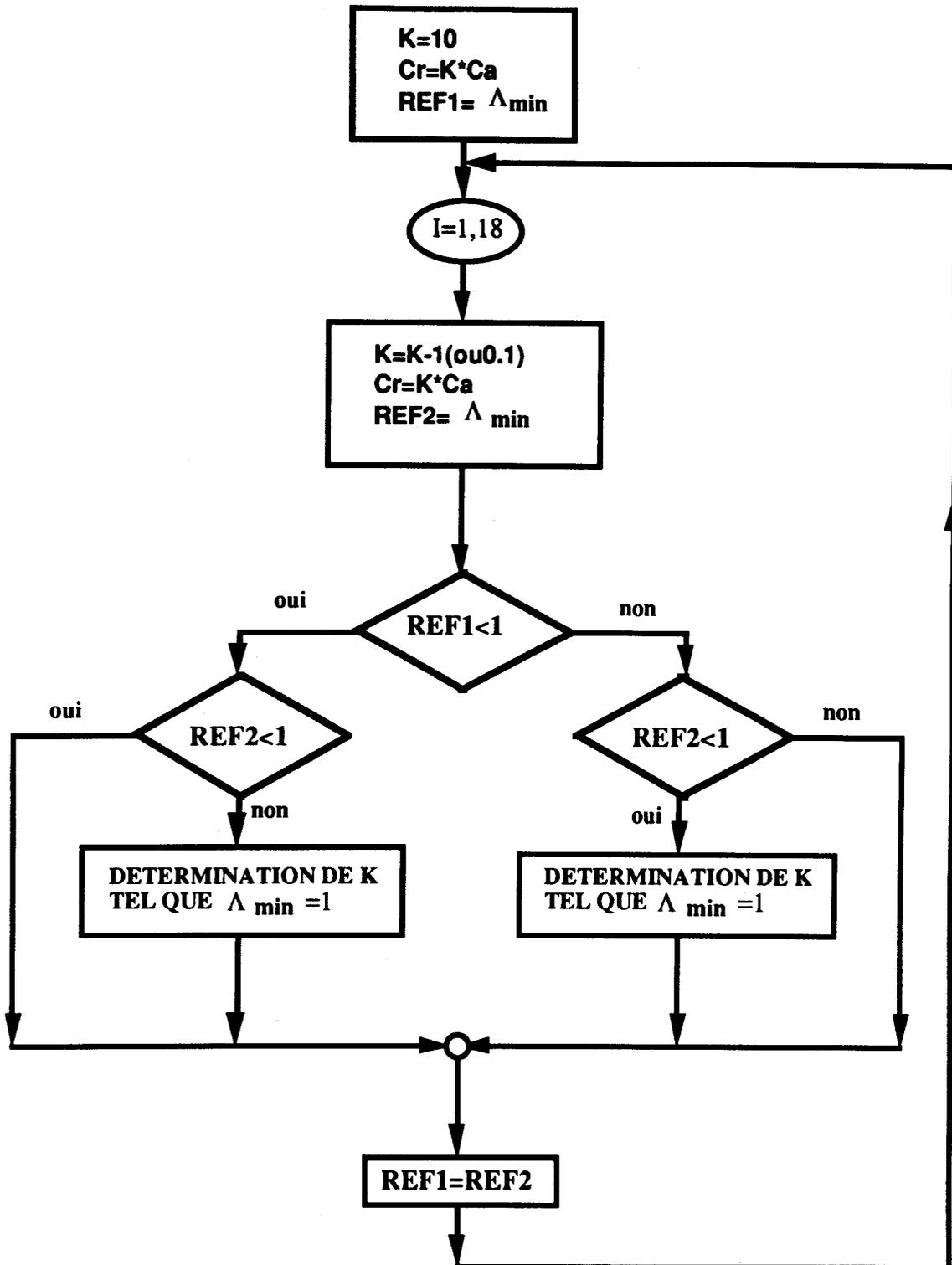


Figure 2.3 : Organigramme du sous-programme de détermination de K

On détermine ainsi, pour chaque jeu de données, (pression de boue, poids sur l'outil, type de matériau et de carottier), sans repasser dans le sous-programme de calcul (§ 2.4), le coefficient de poussée des terrains K, les valeurs et les directions des contraintes principales pour qu'il y ait amorce de rupture, ainsi que la position du point potentiel d'initialisation du discage.

Ces résultats pourront alors être représentés sous forme de courbes isovaleurs en utilisant le post-processeur ISOVAL.

2.4 DESCRIPTION DU LOGICIEL DISCAGELF

Comme l'indique l'organigramme représenté sur la figure 2.4, le logiciel se décompose en plusieurs sous-programmes principaux.

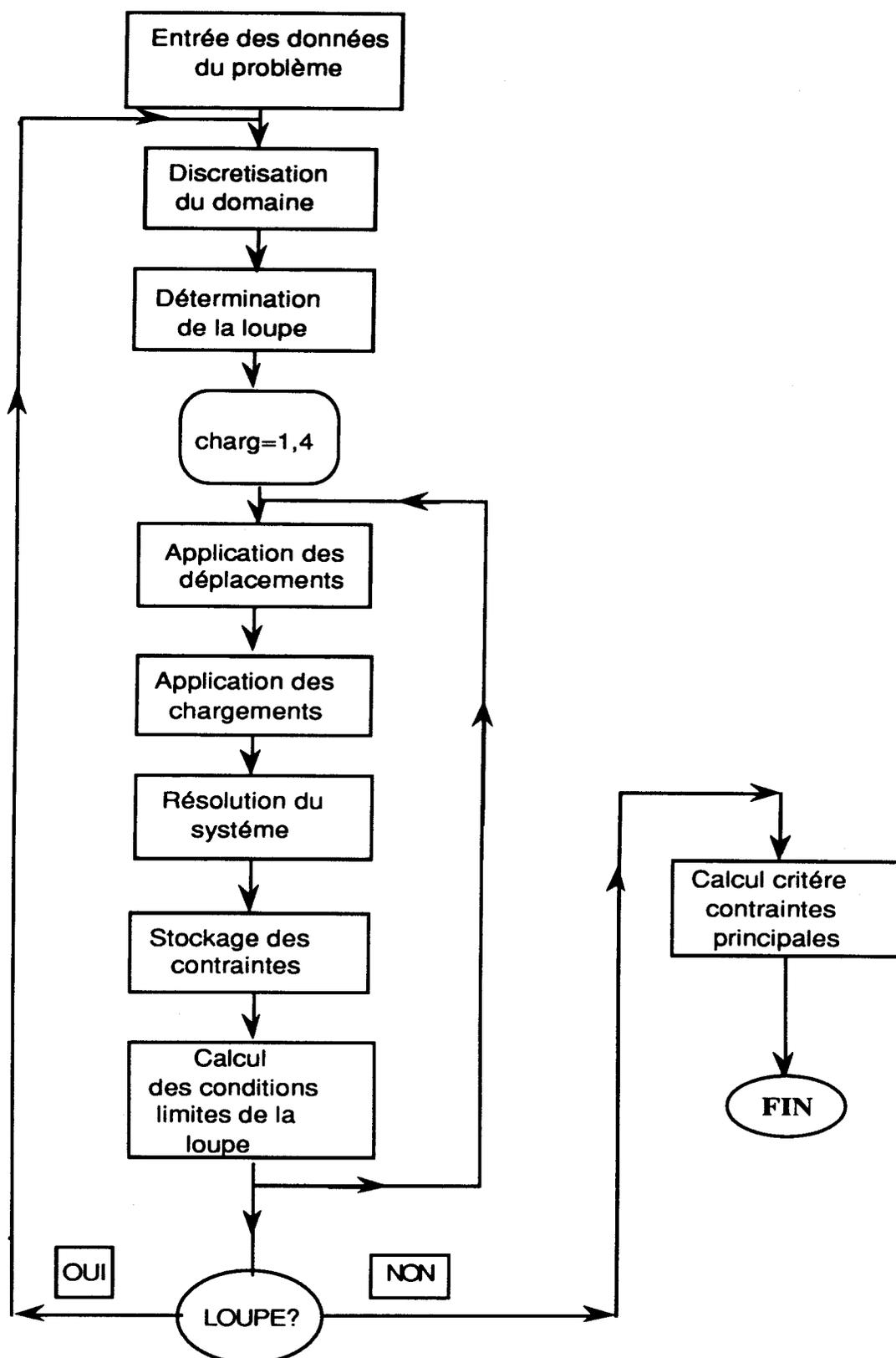


Figure 2.4 : Organigramme général de DISCAGELF

Après l'analyse des données entrées par l'utilisateur, le maillage du domaine se fait automatiquement (§ 2.4.1) et le dispositif de la loupe est amorcé (§ 2.4.2). Les conditions aux limites ainsi que les différents chargements sont ensuite imposés selon que l'on se situe dans la loupe ou non (§ 2.4.3). On abordera ainsi la phase de calcul des contraintes σ_{rr} , σ_{zz} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{rz} qui sera répétée pour chaque mode de chargement (§ 2.4.4) et permettra de déterminer le paramètre de retour sur la parabole de Torre-Léon, ainsi que les valeurs et directions des contraintes principales de discage. La sortie de ces résultats sous forme de courbes isovaleurs sera évoquée au paragraphe 2.4.5.

2.4.1 Sous programme de maillage

La figure 2.5 représente les différents types d'outils accessibles à l'utilisateur.

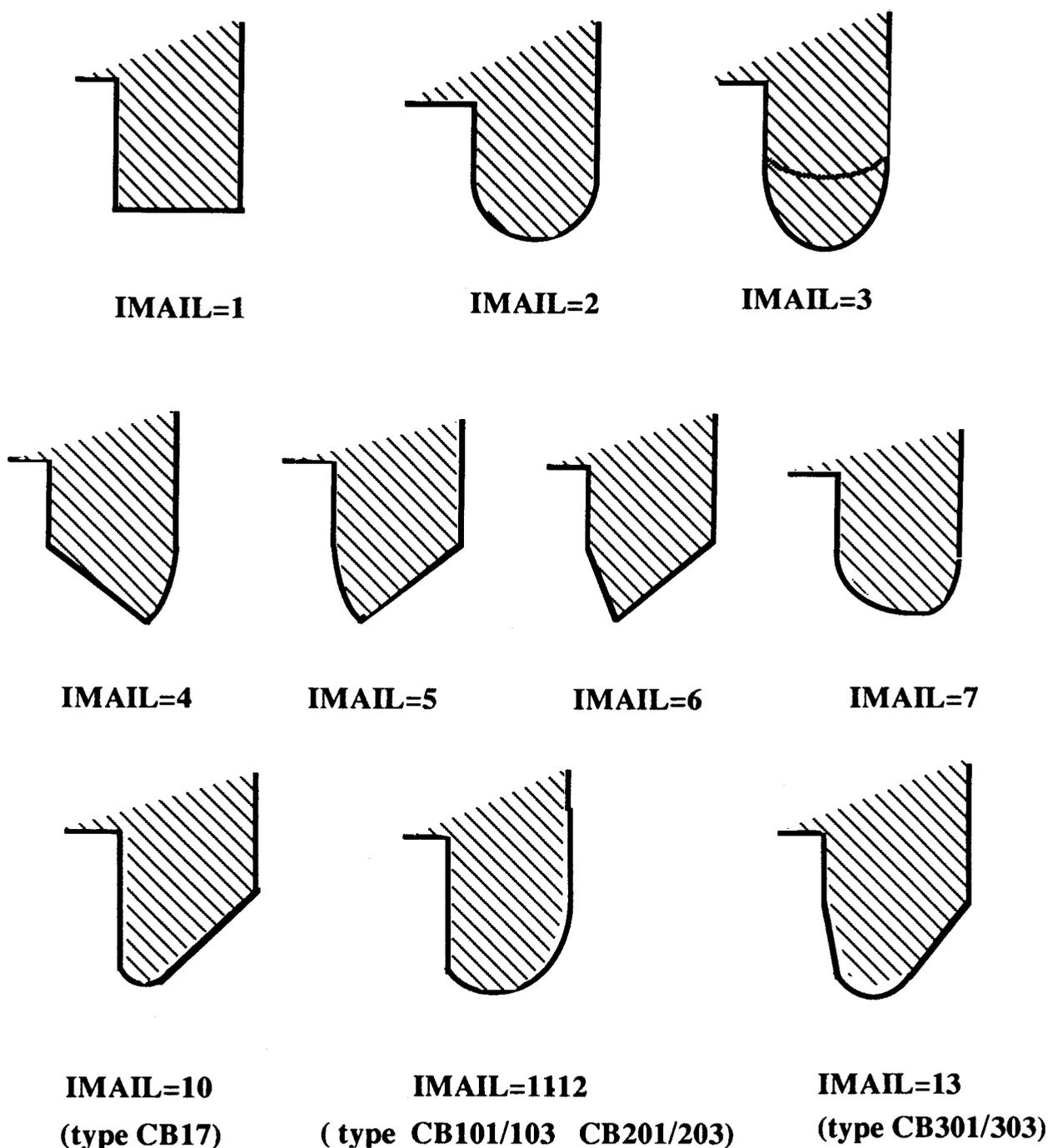


Figure 2.5 : Formes des carottiers incorporées dans DISCAGELF

Les formes que peut prendre le fond de la saignée sont répertoriées ; le paramètre d'appel est noté IMAIL. Selon le numéro affecté à IMAIL, le mailleur dispose de toutes les informations nécessaires à la bonne description de la forme du carottier.

Un repère local, à l'intérieur de l'outil, est utilisé afin de définir les paramètres essentiels nécessaires au calcul des dimensions de l'élément de base de la discrétisation. Son origine O' correspond à l'intersection de la droite parallèle à l'axe Y (repère global) contenant le point le plus "bas" de la figure, avec la droite, parallèle à l'axe X (repère global) passant par les points où le rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier est maximum (fig. 2.6).

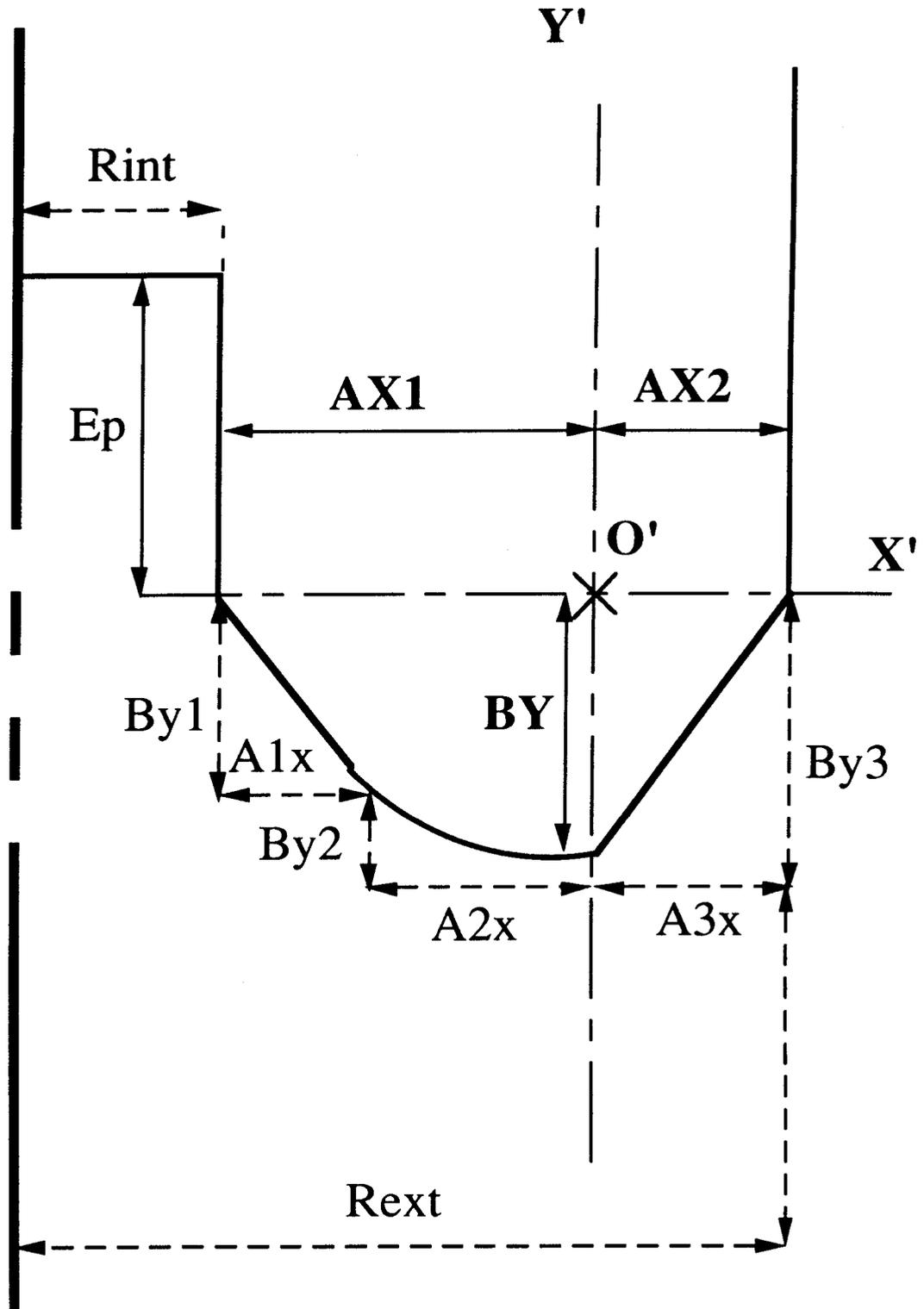


Figure 2.6 : Définition des paramètres servant à la détermination de l'élément de base du maillage

Les axes du repère local sont X' , parallèle à X et Y' , parallèle à Y .

La taille du plus petit élément de la discrétisation (élément de base), qui se situe en fond de saignée, dépend:

- de l'épaisseur du disque (E_p),
- du rayon intérieur du carottier (R_{int}),
- de la plus grande longueur verticale
(BY = élanement du carottier - plus grande longueur verticale par rapport à l'origine du repère local)
- de la plus petite longueur horizontale AX
(On notera $AX1$ ou $AX2$ = excentricités par rapport à Y' - longueurs horizontales par rapport à l'origine du repère local O')
- du degré de raffinement du maillage
(K_d) désiré

Pour une saignée plate : $IMAIL = 1$ et $BY = 0$

Pour une saignée circulaire : $IMAIL = 2$ et $BY = AX1 = AX2$

Pour une saignée correspondant à $IMAIL$ supérieur à 3, BY est le maximum des 2 ou 3 valeurs BY_i et AX est le minimum des 2 valeurs AX_i .

Afin de pouvoir étudier l'influence d'un maximum de paramètres sur le discage, une possibilité d'accès à ces valeurs est aménagée, ce qui permettra de les modifier (notamment BY_i et AX_i) afin de tester différents types de géométrie du carottier.

Le maillage du domaine se fait en deux étapes. Dans un premier temps, tout le fond de la saignée est discrétisé, ceci évite au maximum la formation d'éléments singuliers. En fonction des coordonnées des noeuds ainsi obtenues, le reste du domaine est ensuite maillé. La taille des éléments augmente avec une raison d'ordre 2 quand on s'éloigne de la saignée.

Lorsque l'on effectue une loupe, les dimensions verticales et horizontales de l'élément de base sont automatiquement divisées par deux (la taille du nouveau domaine étant déterminée dans le sous-programme de la loupe).

La suite de ce sous-programme de maillage consiste au remplissage des matrices de coordonnées des noeuds et de liaison entre les éléments.

2.4.2 Les sous-programmes de la loupe

Ils apparaissent à deux stades dans le logiciel :

- avant d'effectuer la loupe pour définir les frontières du prochain domaine que l'on appellera le sous domaine, en fixant ses bornes selon les axes X et Y du repère global,
- pendant l'utilisation de la loupe, pour mailler ce sous-domaine et imposer les conditions aux limites.

Dans la première phase, le nombre total d'éléments qui sera utilisé pour la loupe est calculé à partir du nombre d'éléments restant dans le sous domaine. Si ce nombre est trop important par rapport au dimensionnement des matrices, une autre frontière plus petite est définie. Le nouveau domaine résultant contient le fond de la saignée et s'étend vers l'axe du carottier (fig. 2.7).

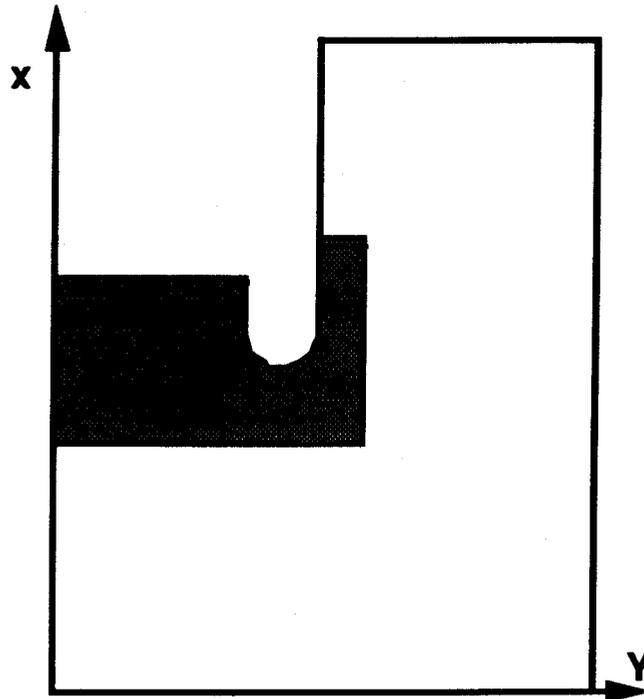


Figure 2.7 : Domaine de la loupe

Puis, les numéros et les coordonnées des noeuds délimitant ce sous-domaine sont déterminés ce qui permet de ne stocker que les déplacements relatifs à ces points (lors de la phase de calcul, et ce, pour chaque mode de chargement § 2.4.4). Ces valeurs seront appliquées sur la nouvelle frontière comme conditions aux limites (§ 2.4.3) grâce à un tableau de correspondance entre les numéros des noeuds de l'ancien maillage et du nouveau sous-domaine.

La deuxième phase intervient pendant la loupe. Elle consiste au maillage automatique du sous domaine. Les dimensions de l'élément de base et les bornes de la zone d'étude étant déjà connues, on suit le même processus que celui indiqué au paragraphe 2.4.1. Pour les fonds de carottiers plats, le mode de maillage est légèrement différent car il n'est pas besoin de passer par les deux stades de la discrétisation (fond de saignée - reste du domaine).

2.4.3 Les conditions aux limites

Lors du premier passage dans le logiciel, les déplacements sont nuls sur les axes X et Y du domaine et l'on impose successivement les quatre chargements de base définis au paragraphe 2.3 :

- un chargement axial seul $\sigma_A = 100 \text{ MPa}$
- un chargement radial seul $\sigma_R = 100 \text{ MPa}$
- un chargement dû à la pression de boue $\sigma_B = 100 \text{ MPa}$
- un chargement dû au poids sur l'outil $\sigma_0 = 100 \text{ MPa}$

Si une loupe est effectuée, on impose aux noeuds de la nouvelle frontière les déplacements correspondant (selon les quatre modes de chargement), ces valeurs étant stockées lors du passage précédent dans le sous-programme de calcul.

2.4.4 Le sous programme de calcul

La méthode de calcul est celle couramment utilisée en élasticité linéaire. Après l'initialisation des différents paramètres intervenant dans le logiciel, les matrices de rigidité $[K]$ et de force $[F]$ sont définies. Une fois le système $[K] [u] = [F]$ résolu par la méthode de Choleski, les contraintes σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} , σ_{rz} sont calculées en chaque point de Gauss, et stockées dans des fichiers. Si une loupe est prévue, on stocke également les déplacements calculés aux points équivalents correspondant aux noeuds frontières du sous-domaine.

2.4.5 Les sous programmes de détermination des contraintes de discage et de sortie graphique

La méthodologie de recherche du coefficient de poussée nécessaire pour obtenir la tangence au critère, et donc l'amorce de rupture pour un jeu de paramètres donné, a été exposée au paragraphe 2.3. A la fin de cette phase, on dispose des valeurs du coefficient de poussée des terrains, des contraintes principales (et de leur direction) et du paramètre de retour sur la parabole en tout point du domaine pour un état de contrainte permettant l'initialisation du discage. Ces résultats peuvent être représentés sous forme de courbes d'isovaleurs pour essayer de visualiser la forme probable du disque. Pour accéder à ces modes de sorties et pour éviter les problèmes de compatibilité entre les données de DISCAGELF et du post-processeur ISOVAL, une procédure de remaillage est nécessaire. Les éléments de cette discrétisation sont triangulaires à trois noeuds ; les coordonnées de ces noeuds étant celles des points de Gauss où sont effectués les calculs.

2.5 VERIFICATION DE LA LOUPE ET DETERMINATION DE LA TAILLE MINIMALE DES ELEMENTS DE LA DISCRETISATION

Les tests ont été effectués sur des saignées plates et circulaires avec (ou sans) présence de boue dans le puits. Le rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier est égal à 1.2 ou à 2, les autres paramètres sont maintenus constants. Les résultats seront reportés sur des graphes représentant les variations des contraintes radiales d'initialisation de discage σ_R en fonction des contraintes axiales σ_A .

2.5.1 Vérification de la loupe - Influence du maillage

On appellera passage simple, le calcul effectué sans loupe. Le nombre d'éléments en fond de saignée est noté K_d . Il correspond au degré de raffinement de la discrétisation. Plus il est élevé, plus le maillage est fin ; la taille de l'élément de base de la discrétisation diminuant. Afin de tester le fonctionnement de la loupe, on ne comparera que les résultats obtenus à partir d'une discrétisation globalement identique du domaine, c'est-à-dire à K_d égal. Par exemple, si après la i ème loupe K_d est égal à 8, on étudiera la variation de contrainte entre ce i ème passage dans le code de calcul et le passage simple comportant 8 éléments en fond de saignée.

Pour un rapport de rayon du carottier de 1.2, le fond de la saignée étant plat ou circulaire, les contraintes calculées par loupe ne diffèrent pas de celles que l'on obtient pour le passage simple correspondant. Les figures 2.8(a) et 2.8(b) illustrent cette constatation dans le cas de carottier à fond plat.

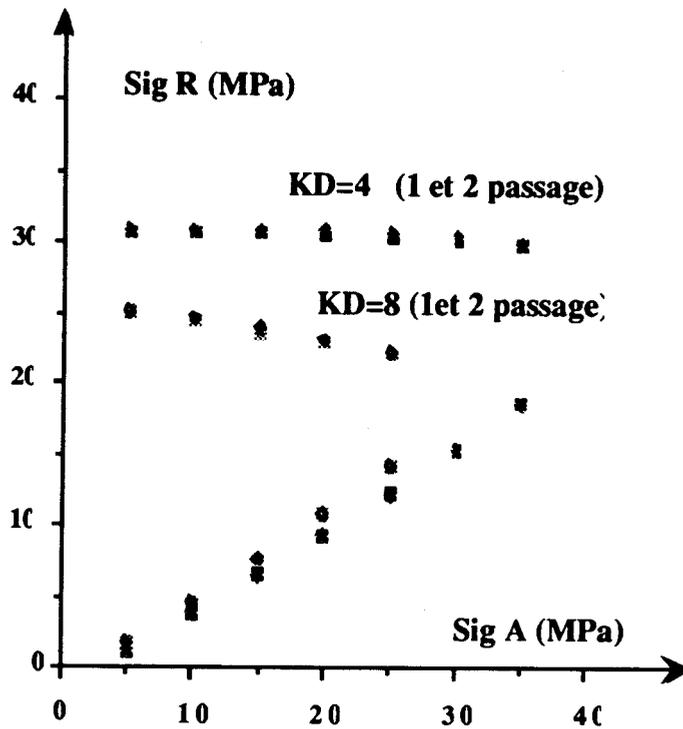


Figure 2.8(a) : Variation des contraintes en fonction de la loupe sans présence de boue dans le carottier

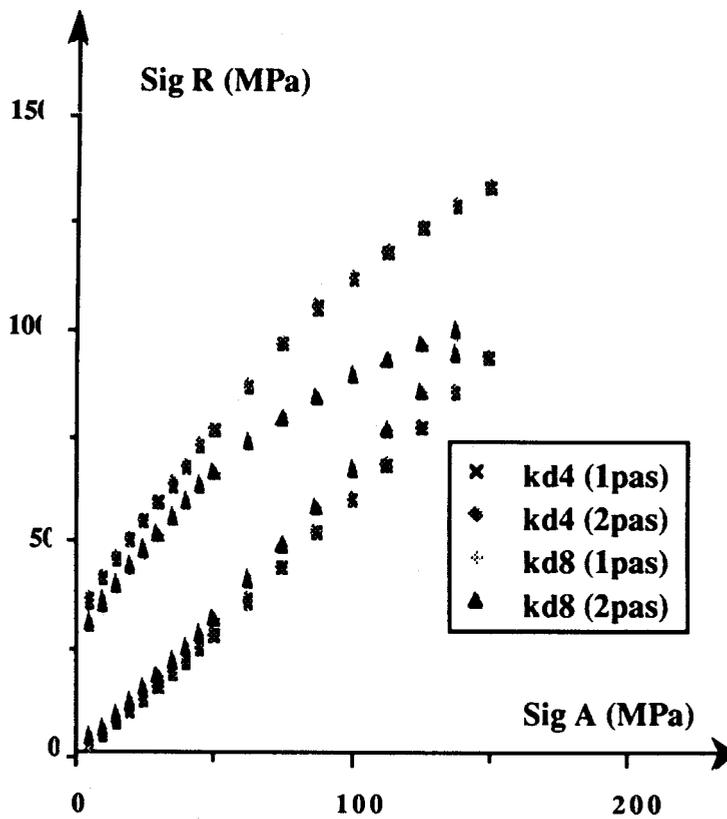


Figure 2.8(b) : Variation des contraintes en fonction de la loupe la densité de boue = 1,5 g/cm³

La position du point d'initialisation de disage ne change pas lors du passage dans la loupe.

Pour un rapport de rayon du carottier de 2, le fond de la saignée étant circulaire (avec ou sans présence de boue), on ne note également aucune différence entre les contraintes calculées à l'aide de la loupe et celles obtenues pour un passage simple (fig. 2.9).

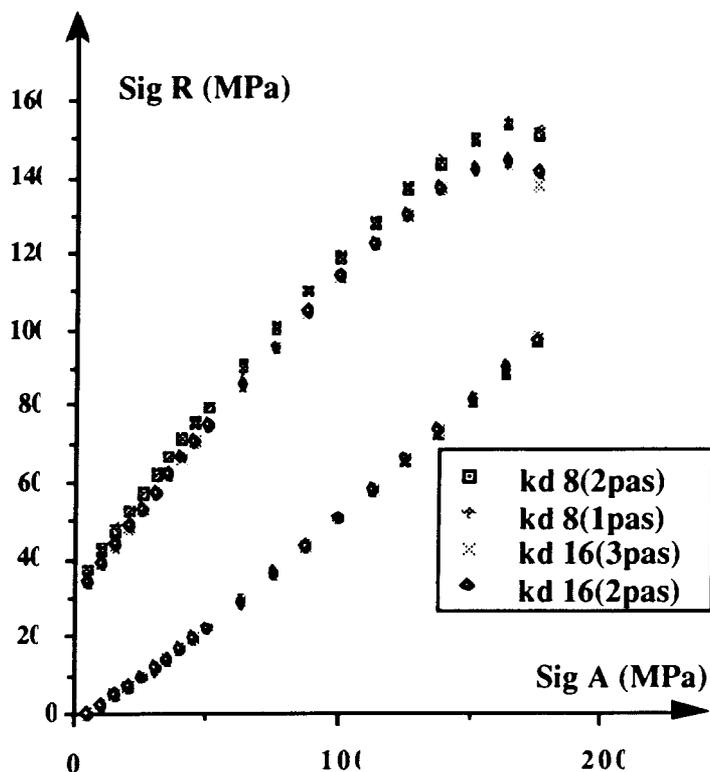


Figure 2.9 : Variation des contraintes en fonction de la loupe - carottier circulaire

Par contre, pour des formes de saignée plates, les contraintes radiales d'initialisation du discage diminuent, pour un même nombre d'éléments en fond de saignée, en fonction du nombre de loupes après lesquelles elles sont calculées. La figure 2.10 montre un exemple de cette variation : pour 8 éléments en fond de saignée, les contraintes obtenues après un troisième passage sont très inférieures à celles que l'on aurait lors d'un passage simple.

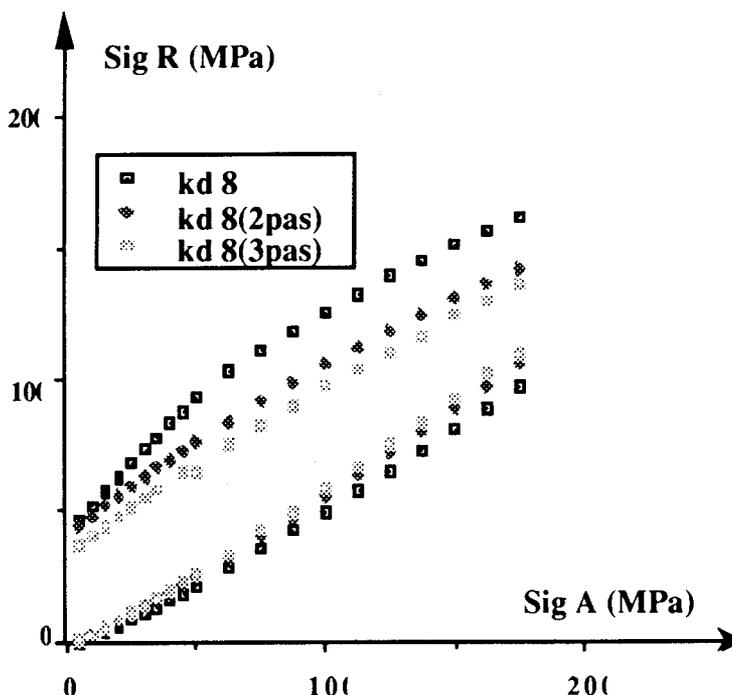


Figure 2.10 : Variation des contraintes en fonction de la loupe - carottier plat

La position du point potentiel d'initialisation du discage évolue en fonction du nombre de loupes effectué.

Cette différence de résultat est due à la discrétisation automatique du domaine.

Pour des carottiers à fond non plat, le maillage est conçu de façon à ce que la taille des éléments qui le composent ne dépende pas de la loupe ; c'est-à-dire que les dimensions horizontales et verticales de l'élément de base (ou de référence) du passage simple sont identiques à celles que l'on obtient en utilisant la loupe (et ce, toujours pour un même nombre d'éléments en fond de saignée).

Par contre, pour un fond de carottier plat, la discrétisation au voisinage du fond de la saignée est influencée par le nombre de loupes effectué. La figure 2.11 représente la configuration du maillage utilisant quatre éléments en fond de saignée sans et avec une loupe.

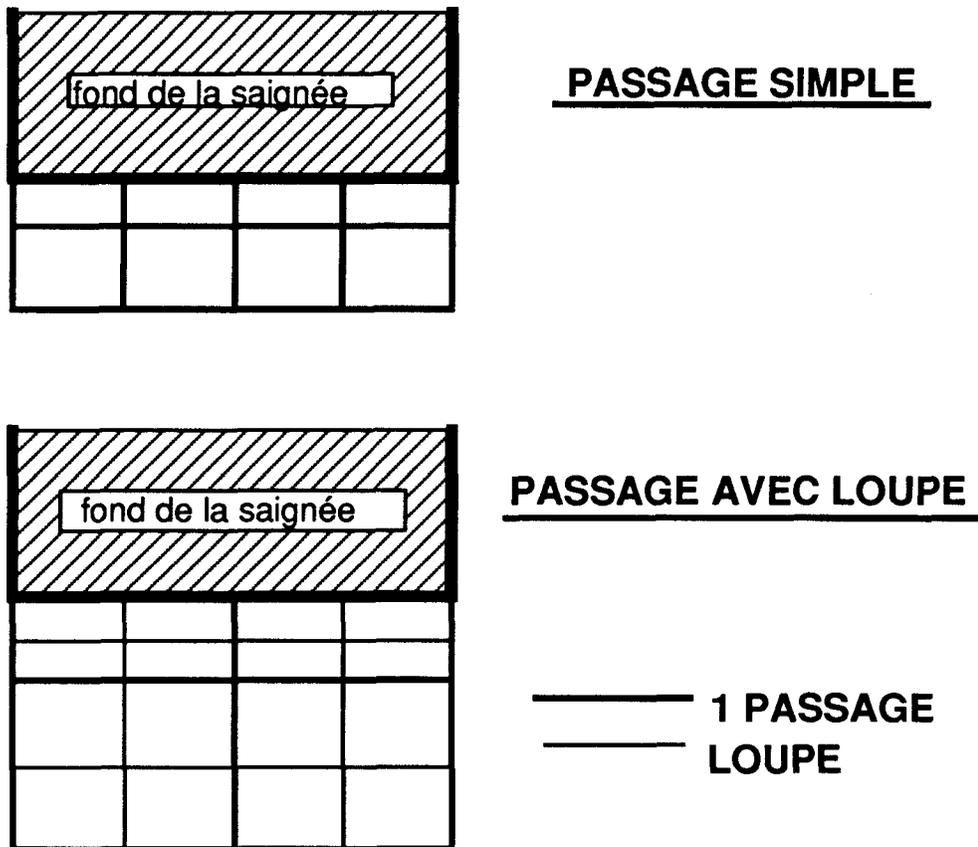


Figure 2.11 : Représentation du maillage utilisé avec ou sans loupe pour un carottier à fond plat

On remarque, lors de l'utilisation de la loupe, que le deuxième rang d'éléments est composé de quadrilatères deux fois moins hauts que pour un passage simple. Par ailleurs, lorsque le rapport rayon extérieur sur rayon intérieur est élevé (de l'ordre de 2), la taille de l'élément de base utilisée lors du passage simple (et conditionnée par ce rapport), est importante. Les résultats obtenus semblent donc être influencés par cette variation de la hauteur des éléments. Ceci explique le changement dans la position du point d'initialisation du discage, qui, bien que restant dans la même zone (en coin de saignée), se déplace plus ou moins loin du bord de la saignée. Dans cette configuration du domaine, les contraintes radiales d'initialisation de discage relevées, ne correspondent pas au même point de calcul.

Ce phénomène est très important car il montre l'influence du maillage sur les résultats. Ceci nous obligera, lors de l'étude paramétrique (chapitre 4) à ne comparer que les valeurs obtenues à partir de discrétisations semblables du domaine.

Nous nous proposons donc de définir dans le paragraphe suivant le nombre d'éléments maximum à utiliser en fond de saignée.

2.5.2 Détermination du nombre limite d'éléments en fond de saignée

La taille des éléments de la discrétisation agissant sur les résultats obtenus (§ 2.5.1), nous imposerons l'utilisation d'un même nombre d'éléments K_d en fond de saignée pour le maillage des différents domaines à simuler dans l'étude paramétrique. La détermination du K_d limite est effectuée à partir des essais suivants :

- pour un carottier de forme circulaire de rapport de rayon égal à deux, on note une diminution des contraintes radiales d'initialisation de disage lorsque K_d augmente (donc lorsque la taille des éléments diminue) (fig. 2.12(a)).

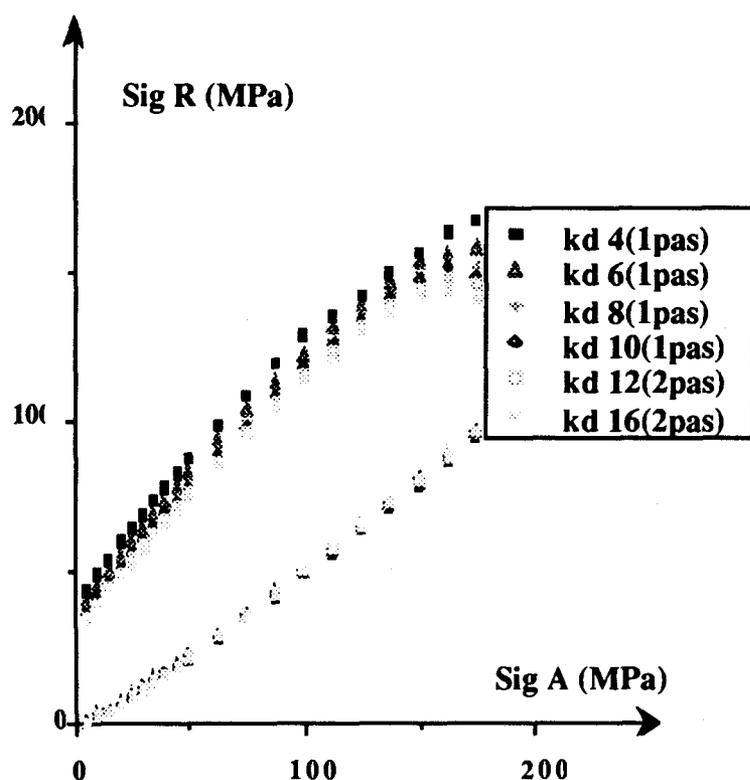


Figure 2.12 (a) : Variation des contraintes radiales d'initialisation du disage en fonction de K_d (carottier circulaire de rapport de rayon = 2)

A partir de 8 éléments en fond de saignée, cette variation de contrainte est négligeable : lorsque l'on double le nombre d'éléments K_d , la contrainte radiale d'initialisation du disage ne chute au plus que de 10 MPa, soit une différence de l'ordre de 6 % (fig. 2.12 (b)).

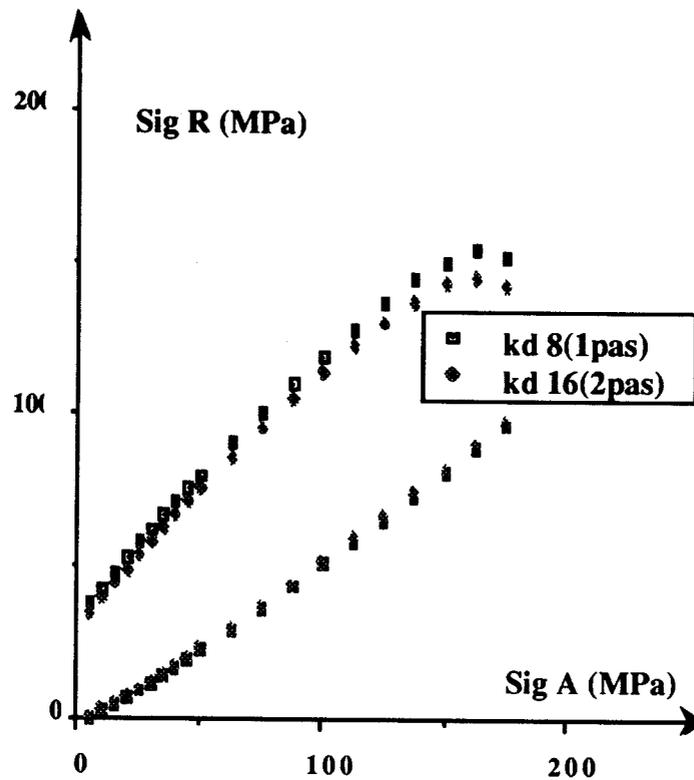


Figure 2.12 (b) : Variation des contraintes radiales d'initialisation du discage en fonction de K_d (carottier circulaire de rapport de rayon = 2)

- Pour des carottiers circulaires de rapport de rayon 1.2, la variation des contraintes radiales σ_R en fonction de K_d est plus forte, la concentration de contrainte en fond de saignée étant plus importante (fig. 2.13) :

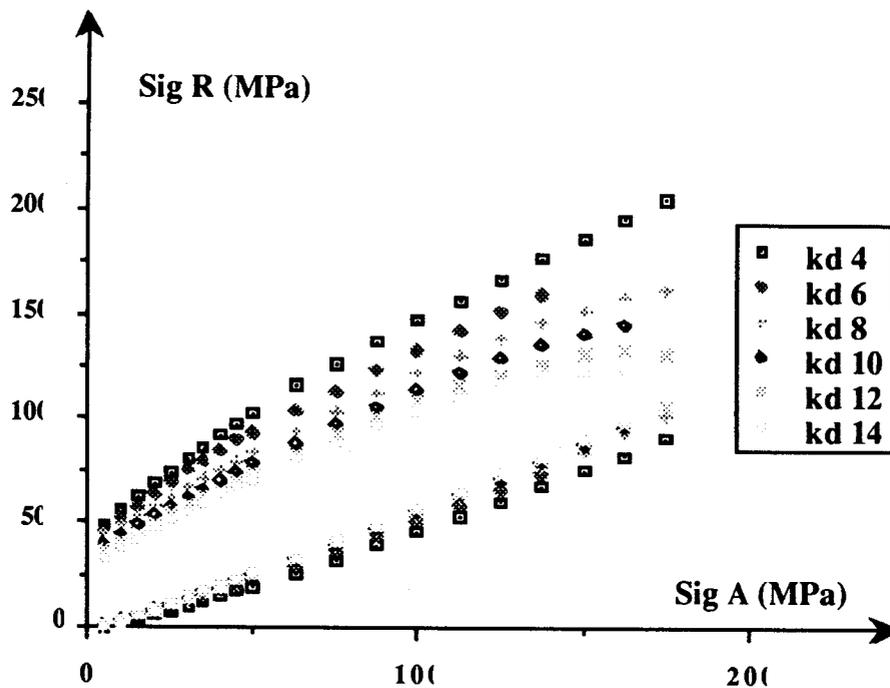


Figure 2.13 : Variation des contraintes radiales d'initialisation du discage en fonction de K_d (carottier circulaire de rapport de rayon 1.2)

Au-delà de K_d égal à 8 éléments, la taille de l'élément de base est inférieure au millimètre ce qui donne des dimensions de système à résoudre très importantes (d'où un fort coût de calcul), mais également des problèmes dans l'analyse des résultats.

- Pour des carottiers à fond plat de rapport de rayon 2 (fig. 2.14 (a)) et 1.2 (fig. 2.14 (b)), on retrouve ce même phénomène :

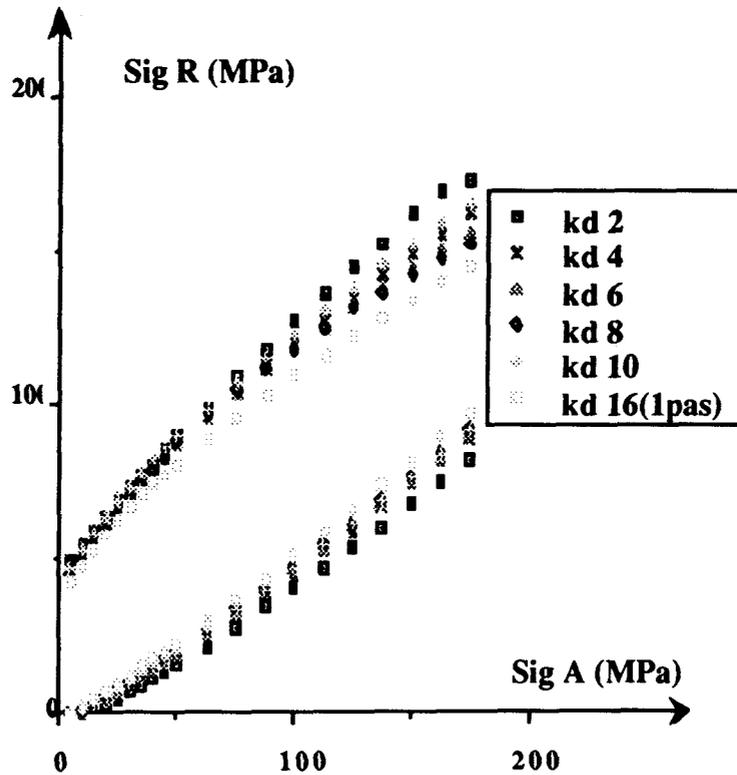


Figure 2.14 (a) : Variation des contraintes radiales d'initialisation de disage en fonction de K_d (carottier plat de rapport de rayon 2)

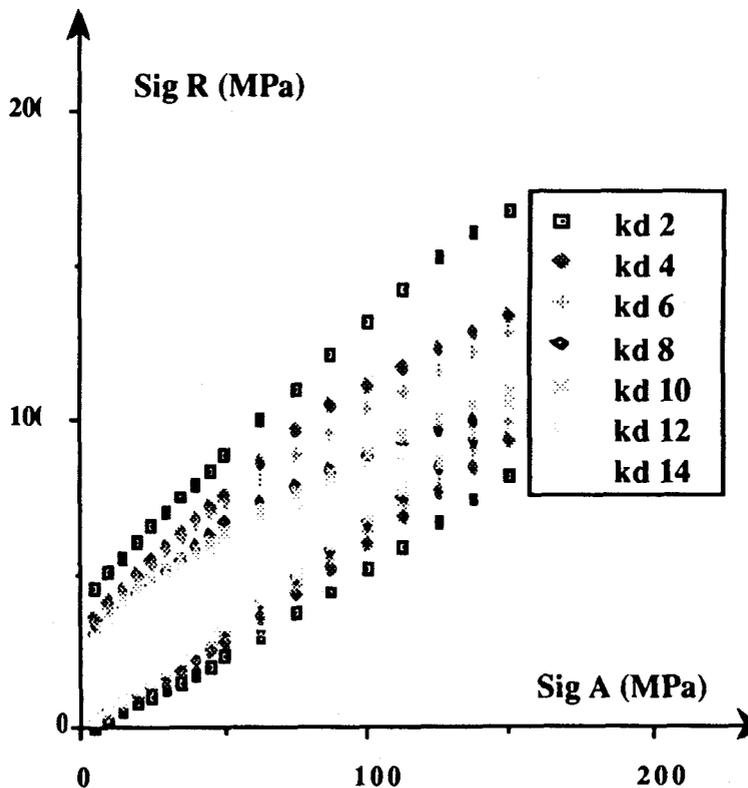


Figure 2.14 (b) : Variation des contraintes radiales d'initialisation de disage en fonction de K_d (carottier plat de rapport de rayon 1.2)

On remarque que les contraintes radiales d'initialisation de discage diminuent fortement lorsque K_d varie de 2 à 8 éléments. Au-delà de cette valeur, la variation de contrainte est beaucoup plus faible (fig. 2.15).

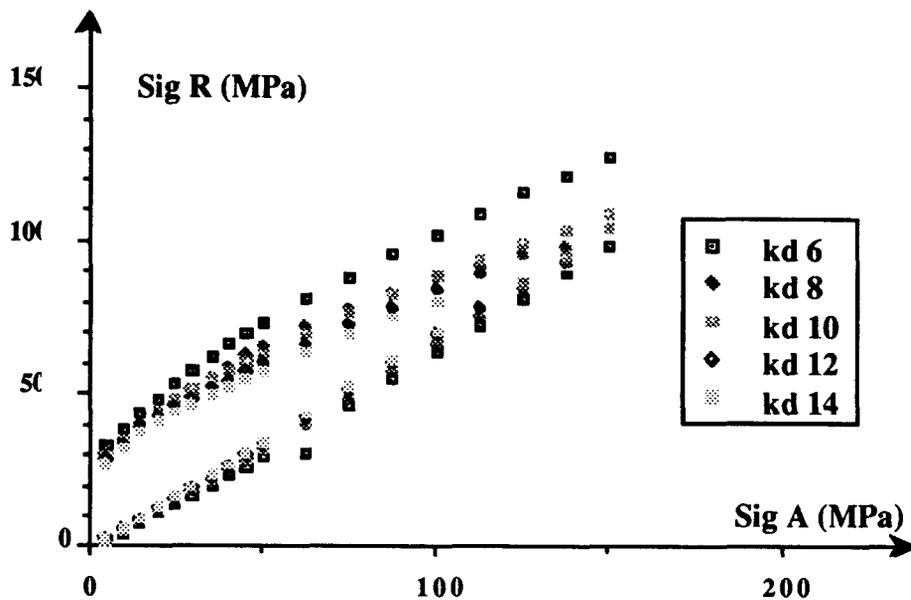


Figure 2.15 : Variation des contraintes radiales de discage pour $K_d \geq 6$ (carottier plat de rapport de rayon 1.2)

Pour l'étude paramétrique du discage, nous utiliserons huit éléments de base en fond de saignée pour chaque discrétisation. Ceci afin d'obtenir une bonne précision sur l'évolution de la position du point potentiel d'amorce de discage ainsi que sur les valeurs des contraintes de discage.

2.6 REPRESENTATION GENERALE DES COURBES DE DISCAGE

Au paragraphe 2.3, nous avons souligné que pour déterminer la contrainte radiale suffisante pour qu'il y ait discage, on doit faire varier K (coefficient de poussée des terrains). Les contraintes dues au poids sur l'outil, à la pression de boue et au poids des terrains susjacents sont constantes pour une configuration géométrique donnée du carottier.

Lorsque K est tel que les contraintes principales obtenues permettent d'avoir la tangence au critère, l'état de contrainte in-situ correspond à l'initialisation du discage. Lors de la variation de K de 10 à 0, deux états de contraintes distincts peuvent occasionner le discage. Les itérations sur K commencent pour $K = 10$, le paramètre de retour sur la parabole (λ) est inférieur à 1 (ce qui correspond à une position du grand cercle de Mohr au-dessus du critère de rupture (§ 2.2)). Lorsque l'on atteint K_1 (voir figure 2.16), on obtient une première contrainte radiale d'initialisation de discage σ_{R1} ; λ étant égal à 1 à 10^{-4} près.

En continuant à faire diminuer K , λ devient supérieur à 1. Par rapport au critère, on se situe en-dessous de la parabole de Torre Léon. K continue à décroître jusqu'à une valeur K_2 correspondant à la deuxième contrainte radiale d'initialisation de discage σ_{R2} ($\lambda = 1$ à 10^{-4} près). En-dessous de ce seuil, le discage peut s'amorcer car λ est inférieur à 1. La représentation graphique de ce phénomène est donnée par la figure 2.16.

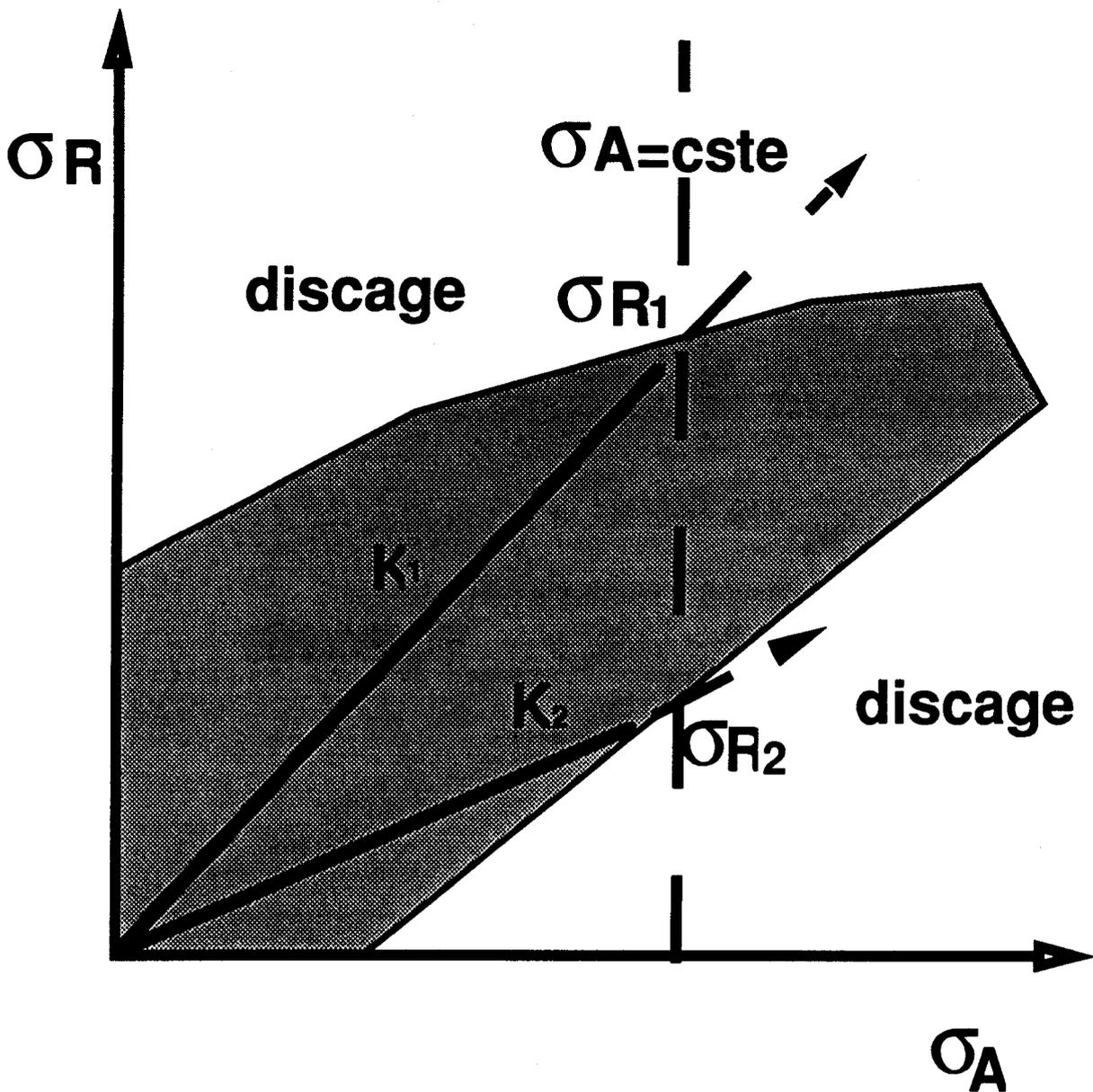


Figure 2.16 : Représentation graphique des courbes de discage

On remarque (ainsi que Bauer [2]) que les contraintes radiales d'initialisation de discage varient linéairement par intervalles en fonction de la contrainte axiale. En reliant entre elles ces différentes portions de droites, on obtient un domaine à l'intérieur duquel il ne peut y avoir de discage.

Chaque changement de pente de ces droites correspond à un changement dans la position du point potentiel d'initialisation de discage. Pour une contrainte axiale donnée, deux coefficients de poussée des terrains K_1 et K_2 ou deux contraintes radiales d'initialisation de discage σ_{R1} et σ_{R2} peuvent provoquer le discage. A chacune de ces valeurs sont associées deux positions totalement différentes du point potentiel d'amorce du discage. Le mécanisme de rupture engendrant ces deux valeurs diffère ; il est principalement en traction pour σ_{R2} et en cisaillement provoqué par compression pure pour σ_{R1} selon la valeur de la profondeur (ou de la contrainte axiale) (σ_A) où l'on se situe.

2.7 CONCLUSIONS

Nous avons retracé dans ce chapitre les différentes étapes suivies pour la conception du logiciel DISCAGELF en explicitant les différents sous-programmes qui le composent.

L'évaluation des erreurs commises lors de l'utilisation de la loupe a été effectuée. Les résultats obtenus par l'intermédiaire de la loupe sont identiques à ceux qui découlent d'un passage simple en utilisant un nombre plus important d'éléments (sauf pour des carottiers plats de rapport de rayon égal à 2).

Nous avons également déterminé quel type de maillage ou quel nombre maximum d'éléments en fond de saignée (K_d) doit être utilisé pour l'étude paramétrique.

Il faut souligner le fait que **deux contraintes radiales d'initialisation de discage σ_{R1} et σ_{R2}** peuvent engendrer le discage pour la même contrainte axiale. Ces contraintes sont atteintes en **des points différents du domaine avec des mécanismes de rupture différents**. Ces résultats sont à relier à ceux que nous avons obtenus à l'aide de la méthode des discontinuités de déplacement en champ complexe [36] [49]. On avait déjà observé des changements et des ruptures de pente dans les graphes représentant les variations des contraintes radiales de discage en fonction des contraintes axiales.

Contrairement à Obert et Stephenson, on n'obtient pas des droites de discage, mais plutôt **des segments de droite de discage qui définissent un domaine de non discage**.

CHAPITRE 3 : VALIDATION DE L'HYPOTHESE "ELASTICITE"

Cette validation se décompose en trois parties. Une comparaison est réalisée entre les résultats obtenus d'une part par DISCAGELF, et d'autre part par :

- un autre logiciel de calcul qu'on qualifiera de référence (Bauer [2]) (chap. III.1),
- une série d'essais effectués sur le triaxial vrai du Laboratoire de Mécanique de Lille (Boumadhi [5]) sans simulation de la présence de boue en fond de saignée (chap. III.2),
- une série d'essais exécutés sur la machine à disquer de Moudafi [37] au CERCHAR sous pression de boue (chap. III.3).

3.1 ETUDE NUMERIQUE : COMPARAISON DISCAGELF-LOGICIEL BAUER

Le logiciel de référence doit travailler en symétrie de révolution pour effectuer une comparaison correcte avec DISCAGELF. Les résultats de Bauer [2] de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ont été retenus, les données relatives à la géométrie du fond de la saignée, aux caractéristiques géomécaniques du matériau et à la discrétisation du domaine étant connues. Le critère de rupture est tangent au cercle de compression simple, et tangent en son sommet au cercle de traction simple. Il s'écrit :

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 20 \sigma_3^{0,76} + 1\,200 \quad (\sigma_1, \sigma_3 \text{ en bars})$$

L'emploi d'un tel critère implique que l'on ne tienne pas compte de certaines ruptures résultant de la combinaison de phénomènes de traction et de compression (correspondantes aux cas où σ_3 est négative). La discrétisation du domaine nécessite 300 noeuds, les éléments du maillage sont triangulaires. L'allure générale des courbes de discage $\sigma_R = f(\sigma_A)$ obtenues par cette méthode est représentée sur la figure 3.1.

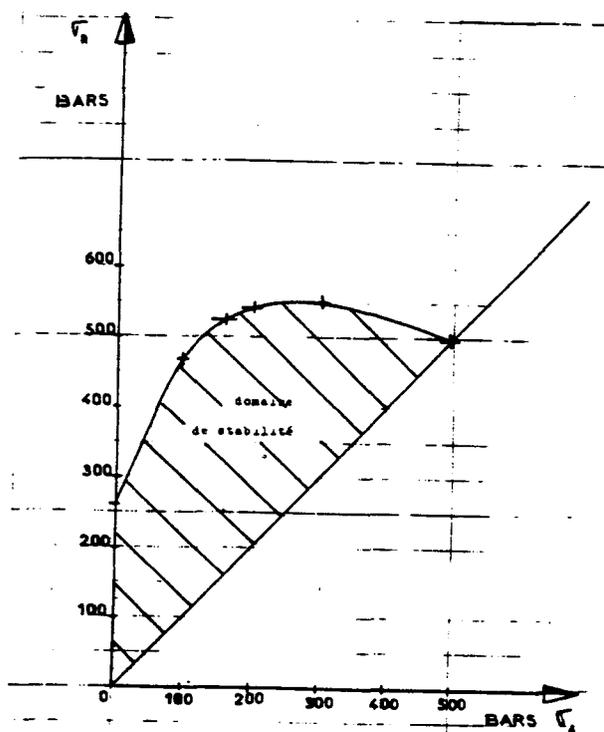


Figure 3.1 : Représentation des courbes de discage de Bauer

On peut noter que les contraintes radiales de discage varient linéairement par intervalles en fonction de la contrainte axiale. Ceci confirme qualitativement les résultats obtenus au chapitre II.

L'utilisation d'un mailleur automatique, relativement autonome dans notre logiciel, n'a permis que la comparaison des contraintes de discage relatives à un carottier à fond plat et à une épaisseur de disque de 5 mm. Le nombre d'éléments de discrétisation ainsi que leurs tailles, pour les deux logiciels, sont, dans ce cas de figure, comparables entre eux (quoique dans notre cas les éléments sont des quadrilatères et dans l'autre cas des triangles).

La variation des contraintes radiales d'initialisation de discage en fonction des contraintes axiales pour les deux logiciels est représentée sur la figure 3.2.

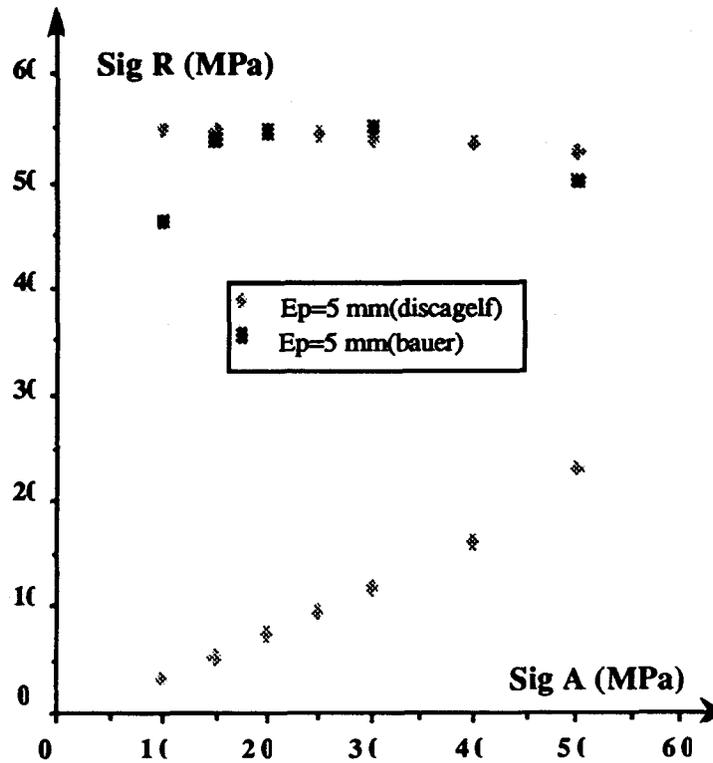


Figure 3.2 : Comparaison des résultats Bauer - DISCAGELF

Pour un nombre d'éléments et de noeuds du maillage identique, la différence entre les contraintes ainsi calculées est de plus ou moins 3 MPa (soit 2 %). La position du point potentiel d'initialisation du discage est la même sous la saignée du côté externe du carottier.

A titre d'indication, les résultats obtenus pour un domaine comportant une saignée plate et une épaisseur de disque de 2,5 mm sont reportés sur la figure 3.3.

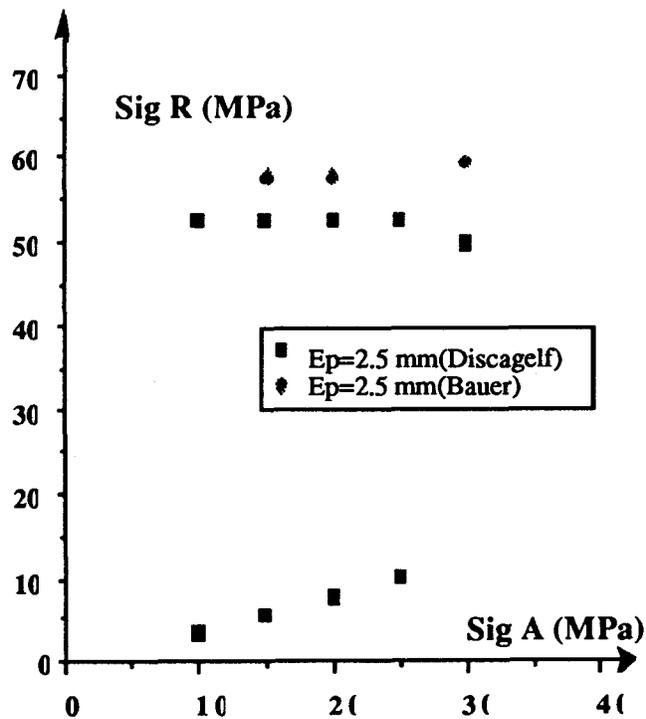


Figure 3.3 : $\sigma_R = f(\sigma_A)$ pour un carottier plat
Épaisseur des disques de 2,5 mm

La différence entre les contraintes radiales d'initialisation de disage est de 10 MPa (plus ou moins 3 MPa) (20 %). Cet écart est dû à la discrétisation. En effet, le mailleur automatique de notre logiciel est très sensible à l'épaisseur des disques pour des carottiers à fond plat (chap. 2.5.1, 2.5.2). En désirant conserver le même nombre d'éléments en fond de saignée que Bauer, on a multiplié par deux le nombre total de noeuds dans le domaine. Notre discrétisation est donc plus fine, et l'on assiste à un déplacement du point d'initialisation de la rupture vers le coin externe de la saignée. Dans la figure 3.3, on compare ainsi des contraintes obtenues en deux points voisins mais différents.

Nous pouvons donc conclure, qu'à discrétisation identique, les deux logiciels donnent le même emplacement du point potentiel d'amorce du disage, et les mêmes valeurs des contraintes radiales d'initialisation du disage.

3.2 VALIDATION EXPERIMENTALE "SIMPLIFIEE"

Cette étude nous a permis :

- d'observer la différence existant entre les contraintes radiales d'initialisation de disage (σ_{Ri}) et les contraintes radiales de disage (σ_{Rd}) correspondant au disque formé (chap. 3.2.1),
- de valider nos calculs sur des essais réalisés sans pression de boue en fond de saignée (chap. 3.2.3).

3.2.1 Résultats expérimentaux

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes cubiques ($50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$) de calcaire d'Anstrude sur le triaxial vrai du Laboratoire de Mécanique de Lille (Boumadhi [5]). L'échantillon est placé dans le triaxial, puis, on carotte à l'air comprimé jusqu'à obtenir l'épaisseur de carotte désirée (un chargement isotrope de 2 MPa étant appliqué sur le bloc).

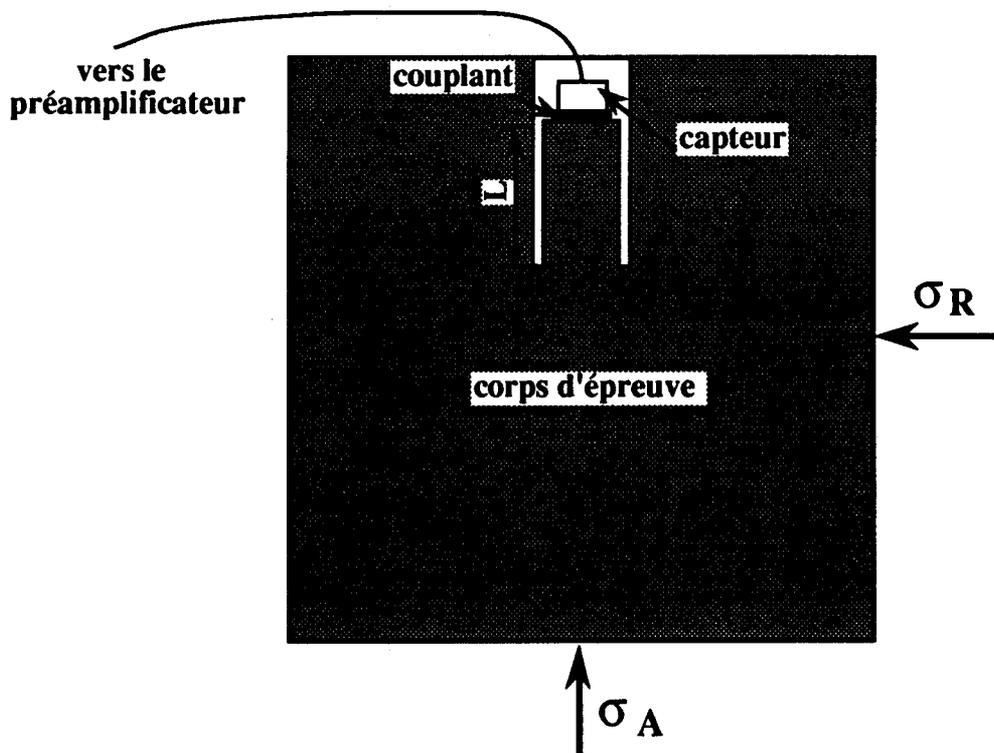


Figure 3.4 : Dispositif expérimental - Montage de l'essai

Les deux contraintes horizontales appliquées sont identiques, le coefficient de poussée des terrains K (rapport de la contrainte radiale σ_R sur la contrainte axiale σ_A) est fixé pour chaque essai.

On augmente la contrainte axiale, K étant constant, jusqu'à l'obtention du décollement de la carotte de l'échantillon. Les valeurs des contraintes radiales, à cet instant donné, correspondent aux valeurs des contraintes radiales de discage σ_{Rd} .

La même procédure expérimentale est utilisée pour déterminer les valeurs des contraintes radiales d'initialisation de discage σ_{Ri} . Une chaîne d'émission acoustique est employée afin de détecter le début de l'amorce de la rupture (les valeurs des contraintes radiales seront relevées à cet instant).

Ce capteur détecte les ondes émises par le matériau et transforme leurs énergies élastiques en signal électrique qui sera analysé par la chaîne d'émission acoustique Locan.

La figure 3.5 représente les variations de σ_{Ri} (avec émission acoustique (EA)) et de σ_{Rd} (sans émission acoustique) en fonction de l'épaisseur des disques (L).

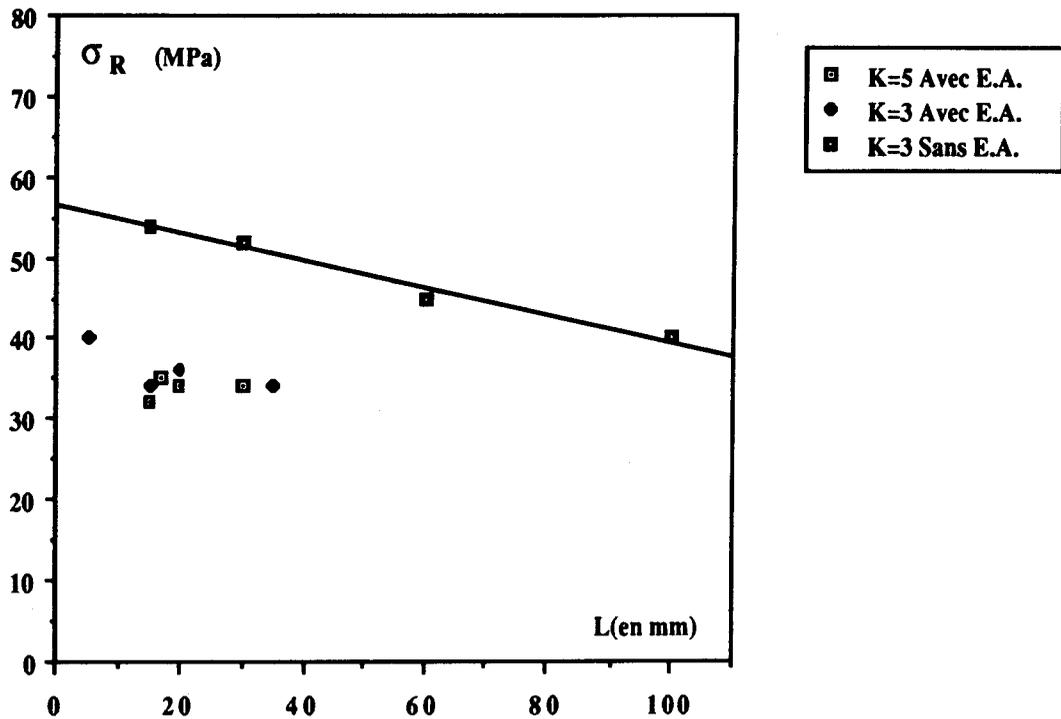


Figure 3.5 : Comparaison entre les contraintes radiales d'initialisation et de rupture

Nous remarquons que l'épaisseur des disques :

- ne dépend pas des contraintes radiales d'initialisation du discage (σ_{Ri}),
- croît linéairement lorsque les contraintes radiales de discage σ_{Rd} diminuent.

L'écart moyen entre σ_{Rd} et σ_{Ri} est de 15 MPa (± 5 MPa). Ces résultats sont intéressants car ils expliquent quelques contradictions relevées dans la bibliographie quant à l'analyse de l'influence de certains paramètres sur le phénomène de discage (notamment sur l'épaisseur des disques). Les différences d'interprétation sont principalement dues à la méthode d'approche employée qui fournit, lorsqu'elle est empirique seule, les contraintes de discage σ_{Rd} , et lorsqu'elle est numérique, les contraintes d'initialisation du discage σ_{Ri} .

3.2.2 Résultats numériques

Le jeu de données à introduire dans le logiciel doit d'abord être complété. Les caractéristiques géométriques du carottier utilisé pour les essais sont connues : le fond de la saignée est plat, les rayons extérieur et intérieur sont respectivement de 21 mm et de 18 mm. L'épaisseur des disques varie de 0,5 cm à 10 cm. Le calcaire d'Anstrude a un module d'Young (E) de 25 000 MPa et un coefficient de Poisson (ν) de 0,2. Les résistances à la traction R_t et à la compression R_c ont été obtenus à partir d'essais Brésiliens et de compressions simples à l'I.R.I.G.M. ($R_t = 3$ MPa et $R_c = -50$ MPa). Par la suite, nous les noterons $R_t(C)$ et $R_c(C)$. Les caractéristiques géomécaniques du matériau influant fortement sur les contraintes radiales d'initialisation du discage (chap. 1.4.1), une seconde détermination de ces paramètres par l'intermédiaire d'une autre méthode nous a semblé indispensable. Une série d'essais triaxiaux a été réalisée au Laboratoire de Lille. Les contraintes principales σ_1 et σ_3 correspondant à chaque essai, sont "injectées" dans l'équation de la parabole de Torre Léon (chap. 2.1) $(\sigma_3 - \sigma_1)^2 - (R_t + R_c)(\sigma_3 + \sigma_1) + R_t R_c = 0$. On obtient un système à deux inconnues R_t et R_c comportant autant d'équations que de nombre d'essais effectués. On pose :

$$\begin{cases} Y^i = (\sigma_3^i - \sigma_1^i)^2 \\ X^i = (\sigma_1^i + \sigma_3^i) \\ A = R_t + R_c \\ B = R_t R_c \end{cases}$$

- i = numéro de l'essai triaxial
- σ_1, σ_3 = contraintes principales en MPa
- R_t, R_c = résistance à la traction et à la compression en MPa.

Le système à résoudre, pour N essais triaxiaux, est de la forme :

$$\begin{cases} Y^1 = A X^1 + B \\ Y^2 = A X^2 + B \\ \cdot \\ \cdot \\ Y^N = A X^N + B \end{cases}$$

En reportant sur un graphique les variations des Y^i en fonction des X^i , les inconnues A et B sont rapidement déterminées (droite des moindres carrés). La figure 3.6 représente la variation de $(\sigma_1^i - \sigma_3^i)^2$ ou (Y^i) en fonction de $(\sigma_1^i + \sigma_3^i)$ ou (X^i) pour le calcaire d'Anstrude.

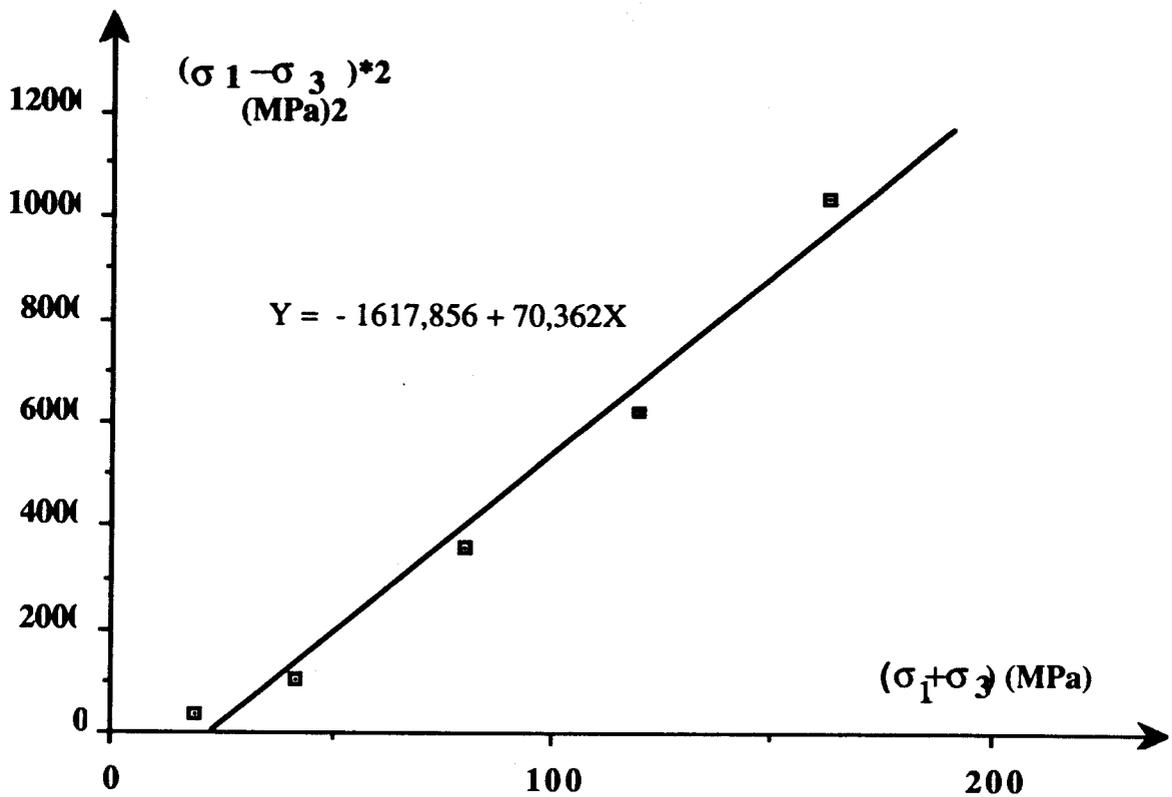


Figure 3.6 : Détermination des coefficients A et B

La résolution du système $\begin{cases} A = R_t + R_c = 70.362 \text{ MPa} \\ B = R_t R_c = -1617.856 \text{ MPa}^2 \end{cases}$ donne les résistances à la traction et à la

du matériau. Elles seront notées $R_t(N)$ et $R_c(N)$. Pour notre roche $R_t(N) = 18,3 \text{ MPa}$ et $R_c(N) = -88,66 \text{ MPa}$. Ces valeurs sont très supérieures à celles obtenues à l'aide des essais conventionnels.

Les deux jeux de caractéristiques géomécaniques $R_t(N)$ $R_c(N)$ et $R_t(C)$ $R_c(C)$ sont introduits dans les données d'entrée du logiciel.

On constate que les contraintes radiales d'initialisation de discage (σ_{Ri}) obtenues à partir des valeurs de $R_t(N)$ et $R_c(N)$ donnent un domaine de non discage plus important que celui correspondant à $R_t(C)$ et $R_c(C)$ (figure 3.7), ce qui est normal.

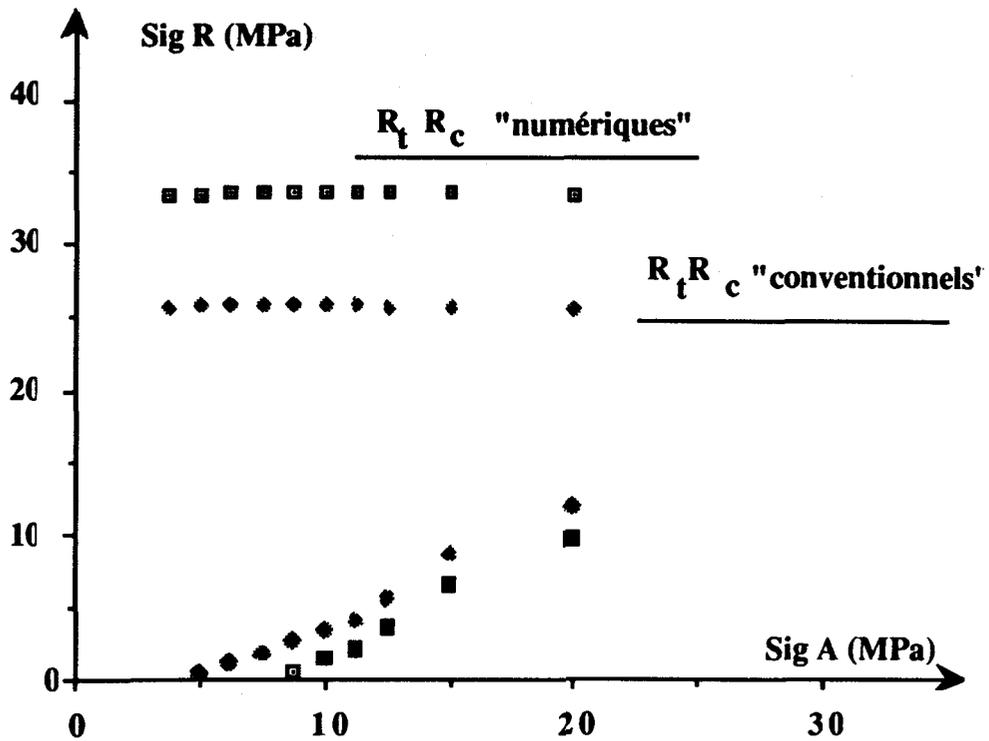


Figure 3.7 : Variation de σ_{Ri} en fonction de σ_A

Il n'existe aucune influence de l'épaisseur des disques sur σ_{Ri} dans les deux cas de figure de R_t et R_c (fig. 3.8.a , fig. 3.8.b)

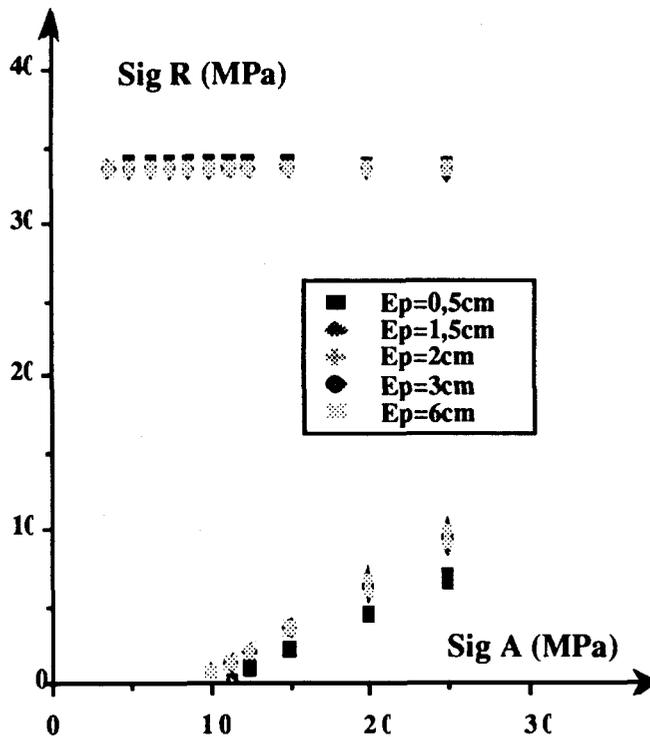


Figure 3.8.a : Variation de σ_{Ri} en fonction de σ_A pour $R_t(N)$ $R_c(N)$

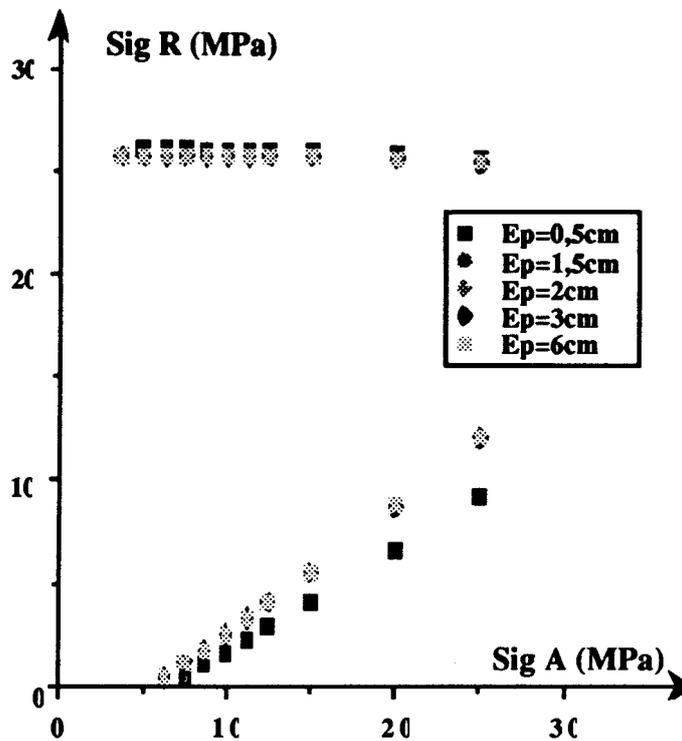


Figure 3.8.b : Variation de σ_{Ri} en fonction de σ_A pour $R_t(C) R_c(C)$

3.2.3 Analyse et validation

Les deux contraintes σ_{Ri} calculées précédemment sont comparées aux contraintes radiales d'initialisation de disage expérimentales (correspondant aux essais réalisés avec la chaîne d'émission acoustique).

Les figures 3.9.a et 3.9.b représentent les variations de σ_{Ri} en fonction de l'épaisseur des disques (E_p) pour les deux coefficients de poussée des terrains K testés par Boumadi [5] ($K = 3$ et $K = 5$).

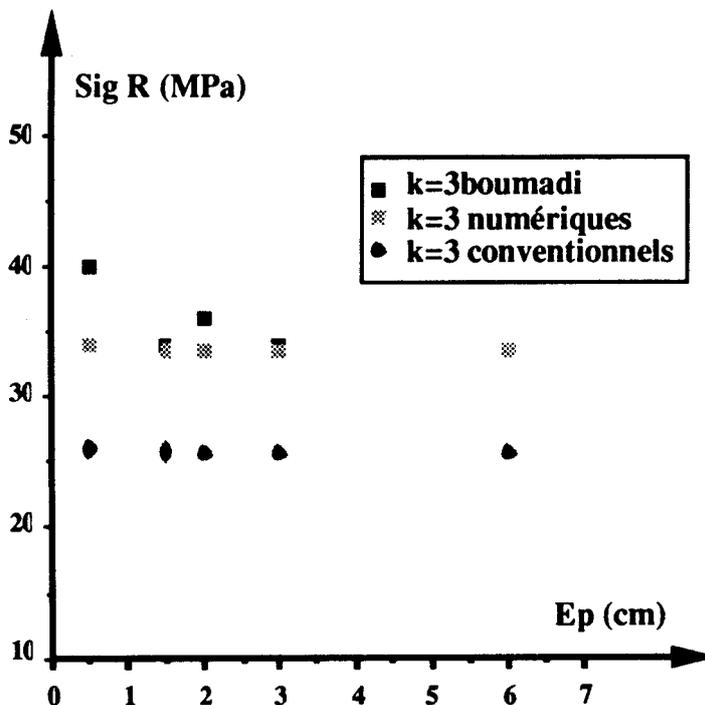


Figure 3.9.a : $\sigma_{Ri} = f(E_p) K = 3$

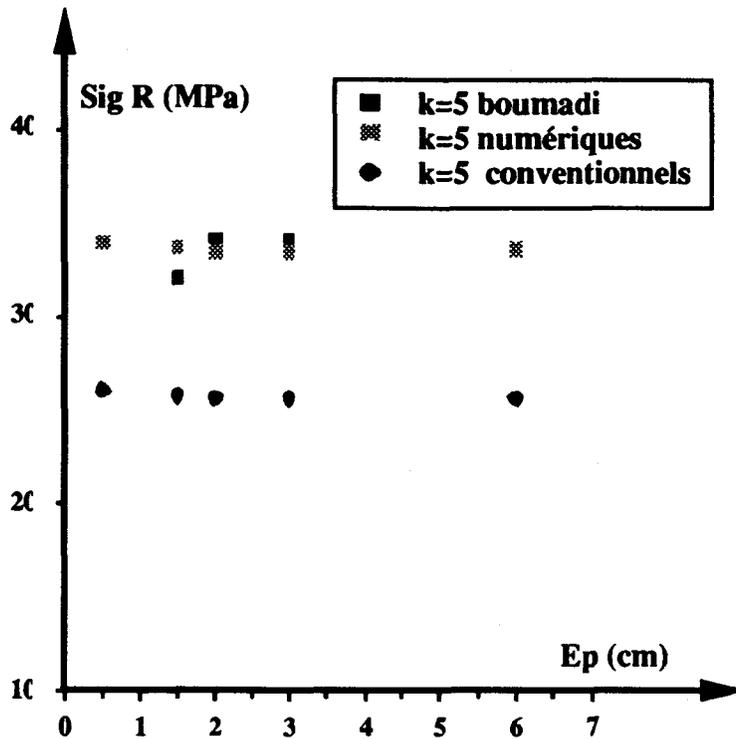


Figure 3.9.b : $\sigma_{Ri} = f(E_p)$ K = 5

Les valeurs des contraintes radiales σ_{Ri} obtenues empiriquement sont identiques (plus ou moins 2 MPa) à celles obtenues par le jeu de données incluant $R_t^{(N)}$ $R_c^{(N)}$ et très nettement supérieures à celles correspondant à $R_t^{(C)}$ et $R_c^{(C)}$, la différence est de 10 MPa (soit une erreur de 20 %). Ceci montre l'importance que revêt une bonne détermination des résistances à la traction et à la compression de la roche. L'utilisation d'essais triaxiaux réalisés à de fortes pressions de confinement, ainsi que du critère de rupture permet de mieux simuler le comportement du matériau (notamment sous de fortes compressions).

Cette étude a permis :

- de confirmer que l'épaisseur des disques n'exerce aucune influence sur les contraintes radiales d'initialisation du discage,
- de valider notre calcul à partir de résultats expérimentaux.

Les résistances à la traction et à la compression du matériau sont calculées à l'aide du critère de rupture de Torre-Léon. Les contraintes principales utilisées proviennent d'essais triaxiaux à faibles et fortes pressions de confinement.

3.3 VALIDATION EXPERIMENTALE AVEC PRESSION DE BOUE

Les essais se sont déroulés au CERCHAR ; la machine à disquer de Moudafi [37] se révélant être plus facilement adaptable à nos expérimentations que le triaxial vrai. L'emploi du système d'émission acoustique permet d'obtenir les contraintes radiales d'initialisation du discage (σ_{Ri}). Le matériau retenu pour simuler la boue de forage sera défini et décrit dans un premier temps. Puis nous expliciterons la procédure expérimentale suivie, et nous indiquerons les résultats obtenus par cette méthode. La comparaison et l'analyse de ces valeurs seront ensuite effectuées.

3.3.1 Choix et définition du matériau de substitution

Afin de travailler en contraintes totales et d'éviter l'influence due à la pénétration de liquide dans la roche (qui a, dans notre cas, une perméabilité importante), le choix d'une poudre plutôt que d'un fluide s'est imposé (l'aspect "mud cake" en fond de forage sera ainsi rendu).

L'emploi d'un système de détection acoustique pour les mesures implique que cette poudre ne présente pas de gros grains et soit homogène. Lors de la montée en pression, un frottement intergranulaire trop important produirait des informations parasites qui pourraient masquer celles permettant d'identifier l'apparition d'une fracture.

Après plusieurs tests sur différents produits (sable, farine, etc. ...) le talc s'est révélé être le mieux adapté à notre problème car il émet peu de signaux lors de sa compaction. Les essais oedométriques réalisés pour déterminer le degré de compressibilité du talc sont inadaptés à ce type de matériau (difficulté de compactage). Des essais de compression simple, sous presse Instron de 10 tonnes, sont nécessaires pour obtenir les courbes contraintes déformations dont l'allure générale est donnée par la figure 3.10.

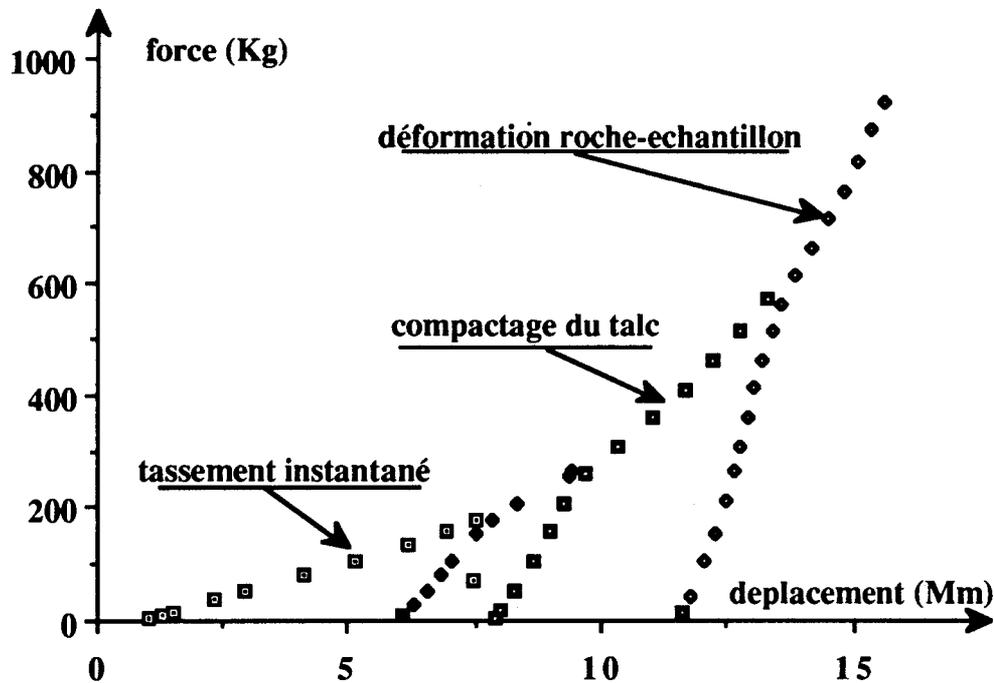


Figure 3.10 : Courbe de "compressibilité" du talc

Trois phases de comportement peuvent être distinguées. La première représente le "tassement instantané" ou la mise en place du talc (la déformation augmente sans grande variation de contrainte), la deuxième phase est due au compactage de la poudre seule jusqu'à une contrainte axiale de l'ordre de 5 MPa (force axiale de 300 kg). La troisième partie de la courbe correspond à la déformation de l'ensemble roche-talc jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Une précompactation du talc avant les essais est donc nécessaire. La pression axiale limite (P_{AL}) à appliquer est estimée, à partir des courbes précédentes, à 4 MPa. Cette valeur est suffisamment faible pour empêcher la production de microfissures dans la roche lors du précompactage, et, suffisamment élevée pour obtenir une bonne mise en place du talc dans l'échantillon. La description complète de la phase de précompactation avant les essais sera effectuée au chapitre 3.3.3. La densité de talc correspondant à cette pression axiale limite est de 1,5 (plus ou moins 0,1).

Une étude visant à déterminer comment s'effectue la transmission de pression jusqu'au fond de la saignée a été réalisée. Le mode opératoire suivi pour les essais ainsi que l'analyse des résultats obtenus sont décrits dans l'Annexe A.

Les variations du **coefficient de transmission de la pression** (C_{TP}) en fonction de la **pression axiale finale appliquée** (P_{AF}) ou de la **précompaction** et du **préchargement** (nombre de cycles effectués) du talc, nous ont permis de réaliser trois types d'essais :

- les essais de discage sans pression de boue,
- les essais de discage à "faible densité de boue" ou à précompactage et préchargement faibles,
- les essais de discage à "forte densité de boue" ou à faible précompactage et fort préchargement.

3.3.2 Description du montage expérimental

Le schéma reproduit sur la figure 3.11 représente la machine à disquer de Moudafi [37] qui a dû être adaptée à nos travaux.

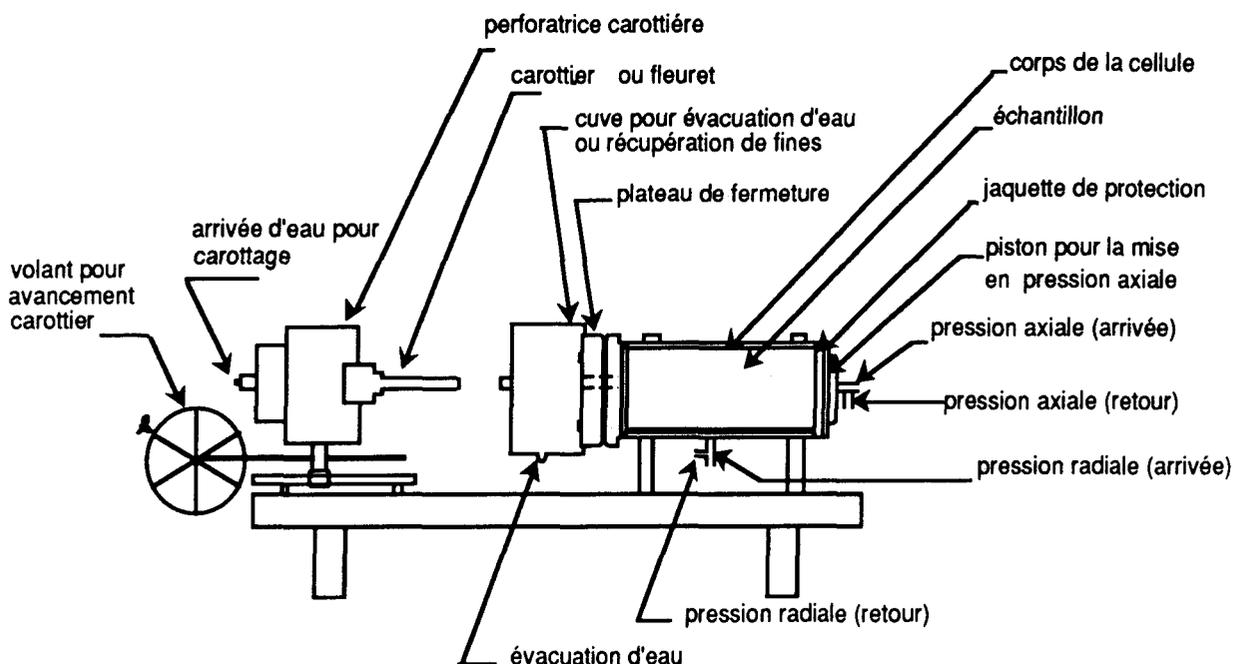


Figure 3.11 : Machine à disquer de Moudafi

Cette cellule est composée d'un corps cylindrique possédant à une de ses extrémités un piston qui imposera la pression axiale, et à l'autre extrémité, un plateau de fermeture permettant de bloquer l'éprouvette cylindrique contre le piston. Le plateau est percé en son centre par un orifice de 35 mm de diamètre afin d'avoir accès à l'échantillon pour le carottage.

L'éprouvette a un diamètre de 120 mm et une longueur de 240 mm. Elle est glissée dans une jaquette en caoutchouc. L'ensemble est introduit dans un guide composé de deux anneaux reliés entre eux par trois broches afin de protéger le corps intérieur de la cellule par la jaquette et de rendre l'ensemble éprouvette-jaquette rigide.

La pression radiale est appliquée par une arrivée d'huile normale au corps de la cellule. Les pressions axiales et radiales développées par le système peuvent atteindre 100 MPa.

Le carottier utilisé pour nos essais a un diamètre extérieur de 30 mm et un diamètre intérieur de 26 mm.

Pour simuler la pression de boue, un bâti dans lequel peut se déplacer un piston de 30 mm de diamètre maximum est fixé sur le plateau de fermeture de la cellule à disquer (figure 3.12).

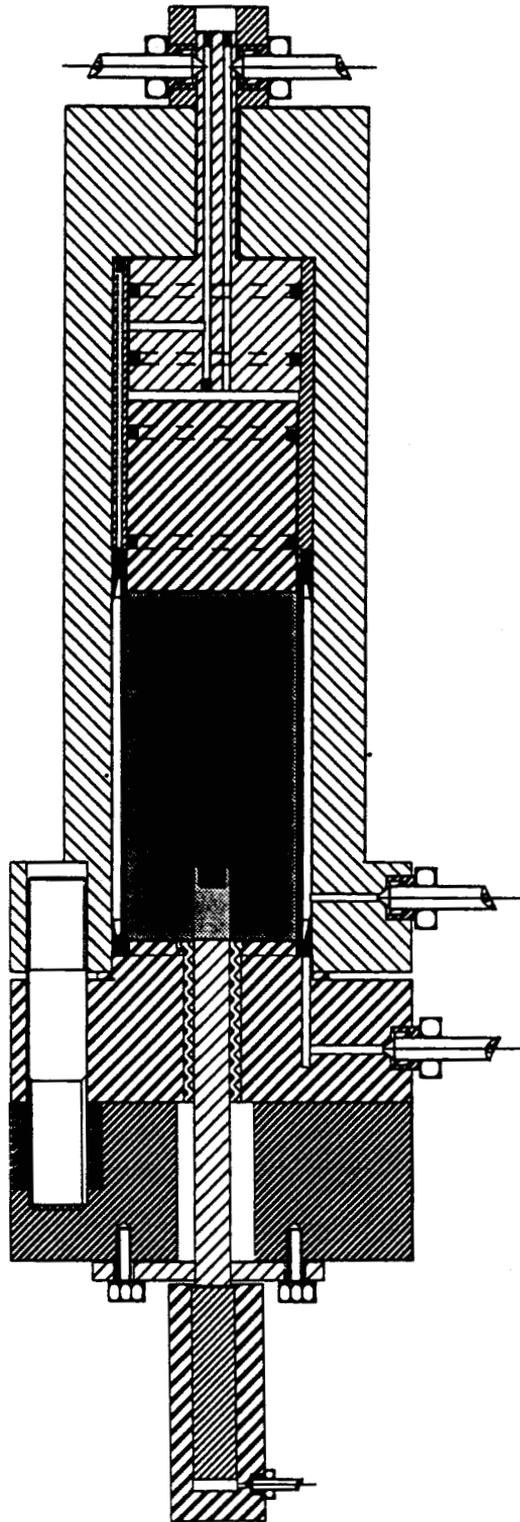


Figure 3.12 : Schéma de la machine à disquer sous pression de boue

Pour empêcher la remontée du talc sur les bords de la paroi, un manchon en téflon, de 30 mm de diamètre intérieur dans lequel peut coulisser le piston, obture le haut de l'échantillon.

Le groupe de mise en pression de la cellule est constitué de deux vérins servant chacun la voie axiale et la voie radiale. Les pressions ainsi développées sont commandées à partir du rack électronique et contrôlées par deux servo-valves qui, en cas d'anomalie, déclenchent l'arrêt automatique de la montée en pression.

Une pompe hydraulique annexe, reliée au piston, permet de réguler la pression appliquée au talc.

Afin de détecter la contrainte radiale d'initialisation du discage, un capteur piézo-électrique est fixé sur le bâti. Ce capteur permettra, par l'intermédiaire d'une chaîne d'émission acoustique [Boumadhi], de détecter chaque bruit "suspect" lors de l'essai. Pour chaque évènement survenant dans le corps de la cellule, un relevé automatique de la pression axiale, de la pression radiale, de l'amplitude et de l'énergie du signal est effectué. Ces données peuvent être stockées et reproduites sous forme de graphes sur table traçante.

3.3.3 Description de la méthodologie

Le mode opératoire suivi se décompose en trois grandes phases :

- la préparation de l'échantillon,
- la précompaction et le préchargement du talc,
- la réalisation des essais.

La roche utilisée est le grès des Vosges. Les principales caractéristiques géomécaniques sont les suivantes :

- Module d'Young $E = 25\,000$ MPa
- Coefficient de Poisson $\nu = 0.2$
- Résistance à la compression simple $R_c = -27,6$ MPa
- Sa porosité totale de 15,3 %

Après avoir surfacé les éprouvettes de 120 mm de diamètre et de 240 mm de longueur, un premier carottage de 5 cm est effectué. La carotte résultante est extraite. On recarotte sur une longueur de 1 cm. Cette valeur correspond à l'épaisseur des disques choisie constante pour tous les essais.

Le piston ne doit jamais pénétrer à l'intérieur de l'échantillon pour empêcher :

- l'émission de signaux parasites due aux frottements que son déplacement engendrerait sur la paroi de la roche,
- la création d'une zone dure, à fort potentiel de rupture, le long de son périmètre lors de la montée en pression radiale (le piston serait alors bloqué dans l'échantillon).

Afin d'éviter ces problèmes et d'assurer la répétabilité de nos essais, le talc doit être mis en place selon un processus identique avant chaque expérimentation.

Le précompactage et le préchargement du talc se déroulent en quatre étapes :

- Le préremplissage de la couronne interne est effectué. Six couches de talc (d'un poids total de 25,2 g) sont tassées à l'aide d'un piston et d'une masse de 10 kg afin d'assurer une bonne répartition de la poudre en fond de saignée. L'ensemble est soumis à une force de 100 kg ($\cong 1$ MPa) ne permettant pas la création de microfissures induites par compaction,
- La partie vide du trou carotté est alors remplie. Deux couches de 9 g chacune puis deux autres couches de 3,6 g sont tassées sous les chargements de $\cong 50$ kg, 200 kg et 300 kg (4,2 MPa). La densité du talc est alors de 1,5.

- L'échantillon est ensuite préchargé dans la machine à disquer afin d'empêcher le compactage du talc pendant l'essai de discage.

Les contraintes axiales et radiales sont augmentées isotropiquement par pas de 2 MPa. Pour chaque palier, la pression exercée sur le talc est augmentée selon un rapport $\sigma_{\text{talc}} = K_1 \sigma_{\text{axiale}}$ (K_1 est déterminé avant chaque manipulation et reste constant pendant le déroulement de l'essai). Après un laps de temps de 10 secondes, les informations reçues par le capteur piézoélectrique sont enregistrées. On peut ainsi contrôler tout "accident" pendant la phase de préchargement. Les "accidents" peuvent survenir à cause :

- d'un montage défectueux,
- d'une jaquette de protection défectueuse,
- d'un mauvais positionnement du piston sur le talc,
- d'une amorce de rupture.

Le chargement est arrêté lorsque la contrainte exercée sur le talc est égale à celle qui sera développée durant l'essai de discage (voir chapitre 3.3.1). Le même chemin est utilisé pour la décharge de l'échantillon.

- Après cette troisième phase, le talc s'étant compacté, un espace vide de 4 à 6 mm subsiste en haut de la carotte (cette variation est due à la valeur finale de la contrainte appliquée sur la poudre (P_{AF})). On réeffectue une adjonction de talc sous une force de 300 kg pour atteindre les bords de la carotte. Le poids total de poudre utilisée est alors noté.

Le déroulement des essais se fait en deux temps :

- le premier correspond à la remise sous pression de l'échantillon. Le chemin du chargement est le même que celui servant au préchargement du talc,
- le second consiste, à pression axiale et de talc constante, à augmenter la pression radiale par paliers de 20 bars, jusqu'à l'obtention de l'initialisation du discage.

Tous les essais seront réalisés à pression axiale de 16 MPa. L'épaisseur des disques est égale à 1 cm. Pour chaque palier, le recueil des informations (de durée 3 secondes) est réalisé après une pause de 10 secondes. Ce laps de temps est nécessaire pour stabiliser la pression radiale et l'arrivée de signaux dus à la circulation d'huile dans la machine à disquer. Le contrôle des "bruits" perçus par le capteur (énergie et fréquence) est effectué en permanence sur écran.

Lorsque le nombre d'informations par palier est inférieur à 30, on a ce que l'on appellera un **défilement normal ou stable**. Par contre, si la fréquence de signaux reçus s'accélère, (plus de 60 informations), on aura un **défilement anormal ou instable**. Dans ce cas, deux situations peuvent se présenter : l'initialisation et la propagation de la fissure (A), la rupture (B).

On enregistre les informations pendant trois secondes (à intervalles de 10 secondes) :

- jusqu'à ce que le défilement redevienne normal. Si ce défilement anormal est suivi d'un autre lorsque l'on réaugmente la pression radiale, on peut affirmer que l'on a initialisation d'une rupture. Plus le défilement augmente, plus on aura une instabilité due à la propagation de la fissure (A).
- jusqu'à ce que la pression radiale chute. On a alors rupture de l'échantillon (B).

Après chaque essai, on vérifiera si le piston n'est ni enfoncé dans le talc, ni en butée sur la partie supérieure de l'échantillon.

La durée de chaque expérimentation est d'environ d'une journée. Une douzaine d'essais ont été réalisés.

3.3.4 Résultats expérimentaux

L'essai sans talc :

Il a été interrompu lors du décollement brutal du disque pour une pression radiale de 78 MPa. Les figures 3.13.a et 3.13.b représentent en fonction de la contrainte radiale, les signaux perçus par le capteur selon leur énergie et leur nombre.

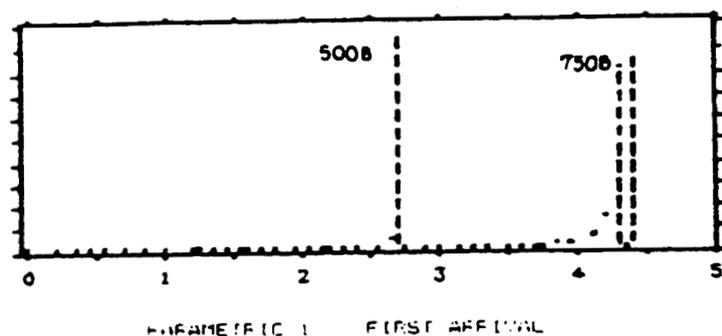


Figure 3.13.a : Variation des contraintes radiales en fonction de l'énergie des signaux

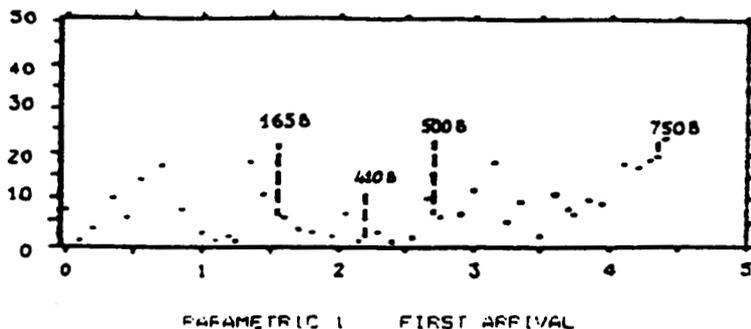


Figure 3.13.b : Variation des contraintes radiales en fonction du nombre de signaux perçus

Les pics à 16,5 MPa, 41 MPa et 50 MPa ne sont suivis d'aucun défilement anormal d'informations, et sont plus certainement dus à des bruits extérieurs qu'à une amorce de rupture dans le grès. Par contre, à partir de 67 MPa, la montée en pression radiale a dû être interrompue plusieurs fois pour causes de défilements anormaux et successifs d'informations. On peut donc, à partir des résultats obtenus, estimer la contrainte radiale d'initialisation de la rupture à 67 MPa, et la contrainte radiale de disage à 78 MPa.

Les essais à "faible densité de talc"

La densité de talc en fin de préchargement est de 1,5. Les pressions finales de préchargement sont de 6 MPa et de 10 MPa. Les figures 3.14.a et 3.14.b donnent les résultats des essais interrompus après le recueil des défilements anormaux et successifs de l'information lorsque la pression finale de préchargement est de 6 MPa.

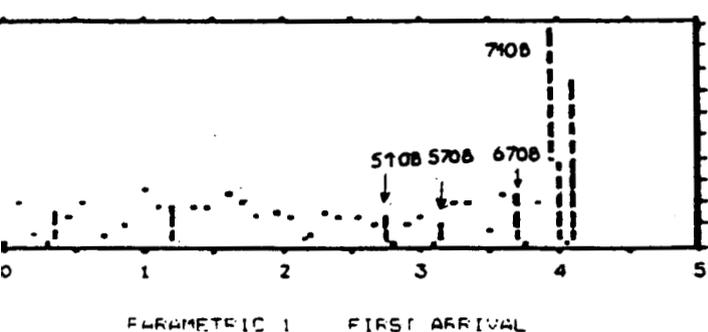


Figure 3.14.a : Variation des contraintes radiales en fonction de l'énergie des signaux

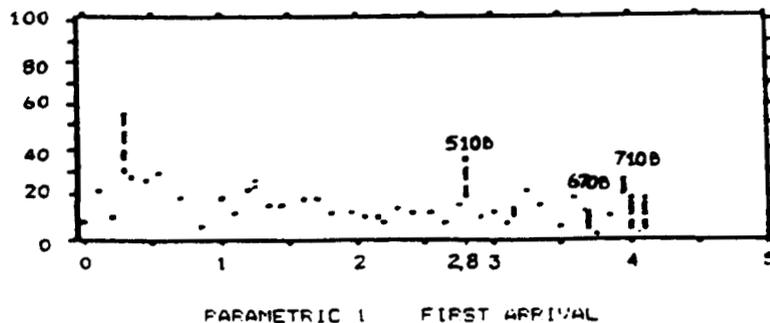


Figure 3.14.b : Variation des contraintes radiales en fonction du nombre de signaux

Le défilement anormal des informations débute vers 67 MPa, et atteint son maximum à 71 MPa.

La découpe de l'échantillon a révélé la présence d'un disque de 1 cm d'épaisseur. L'initialisation du discage a lieu vers 71 MPa de contrainte radiale. Les figures 3.15.a et 3.15.b correspondent aux résultats obtenus sur des échantillons soumis à une pression finale de préchargement de 10 MPa.

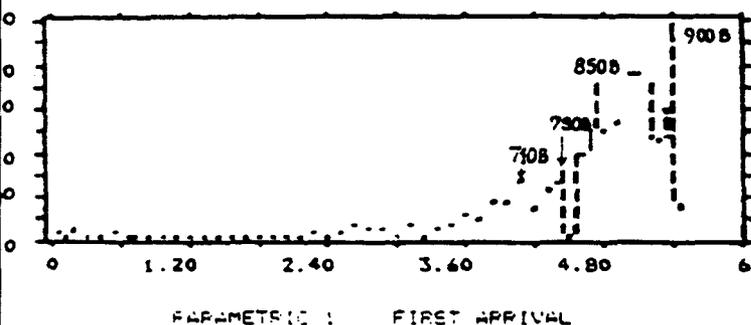


Figure 3.15.a : Variation des contraintes radiales en fonction de l'énergie des signaux

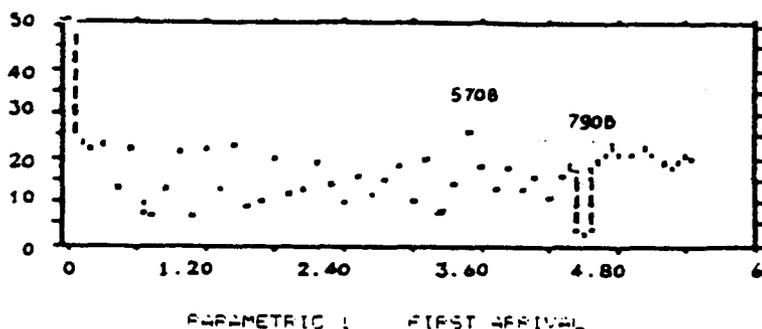


Figure 3.15.b : Variation des contraintes radiales en fonction du nombre de signaux

Vers 71 MPa, on détecte un premier pic d'informations. Mais ce n'est qu'à partir de 79 MPa que le défilement devient de moins en moins "contrôlable". Nous sommes en présence d'une ou de plusieurs propagations de fissures. Le nombre d'évènements enregistré pendant les trois secondes est supérieur à 100 et continue à croître jusqu'à la rupture qui survient vers 93 MPa de contrainte radiale. Le disque est décollé de l'échantillon.

L'essai à forte densité de talc

La pression finale de préchargement est de 10 MPa (sous trois cycles, chap. 3.3.1). Le pic d'informations sur la figure 3.16.b à 57 MPa correspond à un bruit provenant de l'extérieur, de la machine. Un premier défilement anormal intervient vers 71 MPa (figure 3.16.a).

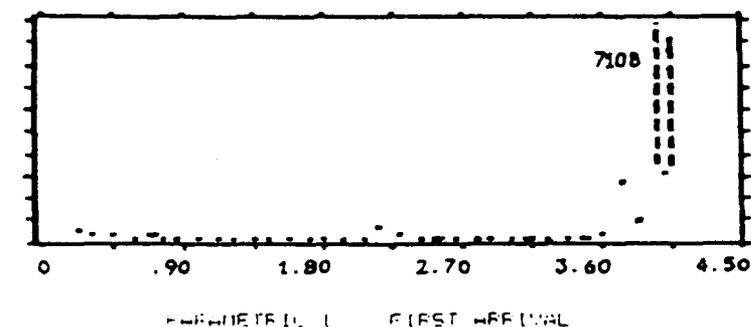


Figure 3.16.a : Variation des contraintes radiales en fonction de l'énergie des signaux

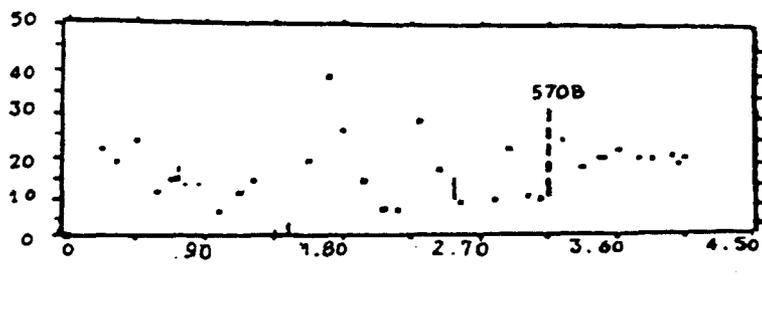


Figure 3.16.b : Variation des contraintes radiales en fonction du nombre de signaux reçus

En raison de problèmes techniques, les essais n'ont pu être menés à leur terme. Aucun défilement anormal répété n'ayant pu être enregistré, nous avons conclu qu'à 73 MPa de pression radiale (pression d'arrêt de l'essai), aucun disque n'était formé ou initialisé. De fait, lors de la découpe de l'échantillon, la carotte est intacte.

3.3.5 Résultats numériques - Validation

Les caractéristiques géomécaniques du grès sont déterminées à partir d'essais triaxiaux et du critère de la parabole (figure 3.1.7).

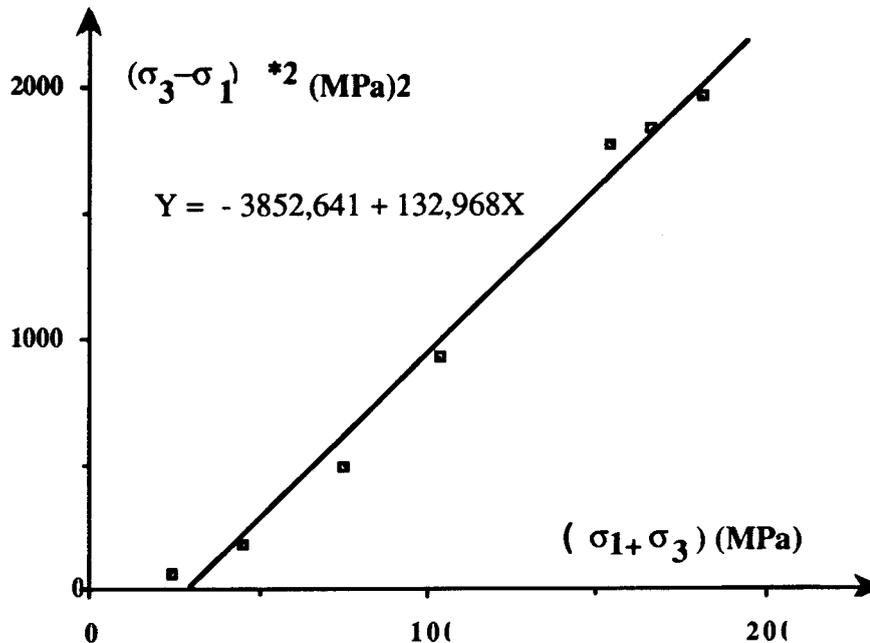


Figure 3.17 : Détermination de R_t et R_c à partir des coefficients A et B de la roche
 $(\sigma_3 - \sigma_1)^2 = A (\sigma_1 + \sigma_3) + B$

$R_t = 20,9 \text{ MPa}$ et $R_c = -124,5 \text{ MPa}$

La géométrie du domaine est définie par un carottier à saignée circulaire de 30 mm de diamètre extérieur et de 26 mm de diamètre intérieur. L'épaisseur des disques est de 1 cm. Les densités de boue à simuler numériquement sont estimées à partir des valeurs du coefficient de transmission de pression du talc (C_{TP}) (chapitre 3.3). Le montage utilisé pour déterminer le C_{TP} n'étant pas hermétiquement clos et permettant la remontée de talc sur les parois, ce coefficient fournit une contrainte minimale en fond de saignée inférieure à celle qui sera produite lors de nos essais au CERCHAR. Les contraintes radiales d'initialisation de discage calculées à partir de ces valeurs sont considérées comme des limites inférieures.

Les figures 3.18 à 3.21 représentent dans le plan contrainte axiale - contrainte radiale :

- le chemin de chargement de l'échantillon durant l'essai,
- la droite de variation (numérique) des contraintes radiales d'initialisation du discage en fonction des contraintes axiales que l'on appellera droite d'initialisation du discage.

Pour les essais réalisés sans talc dans la saignée, la droite d'initialisation du discage coupe le chemin de chargement au point : $\sigma_A = 18 \text{ MPa}$, $\sigma_R = 60 \text{ MPa}$ (fig. 3.19). Il se situe donc juste avant la zone d'instabilité qui débute à 67 MPa et qui signale une propagation de fissure.

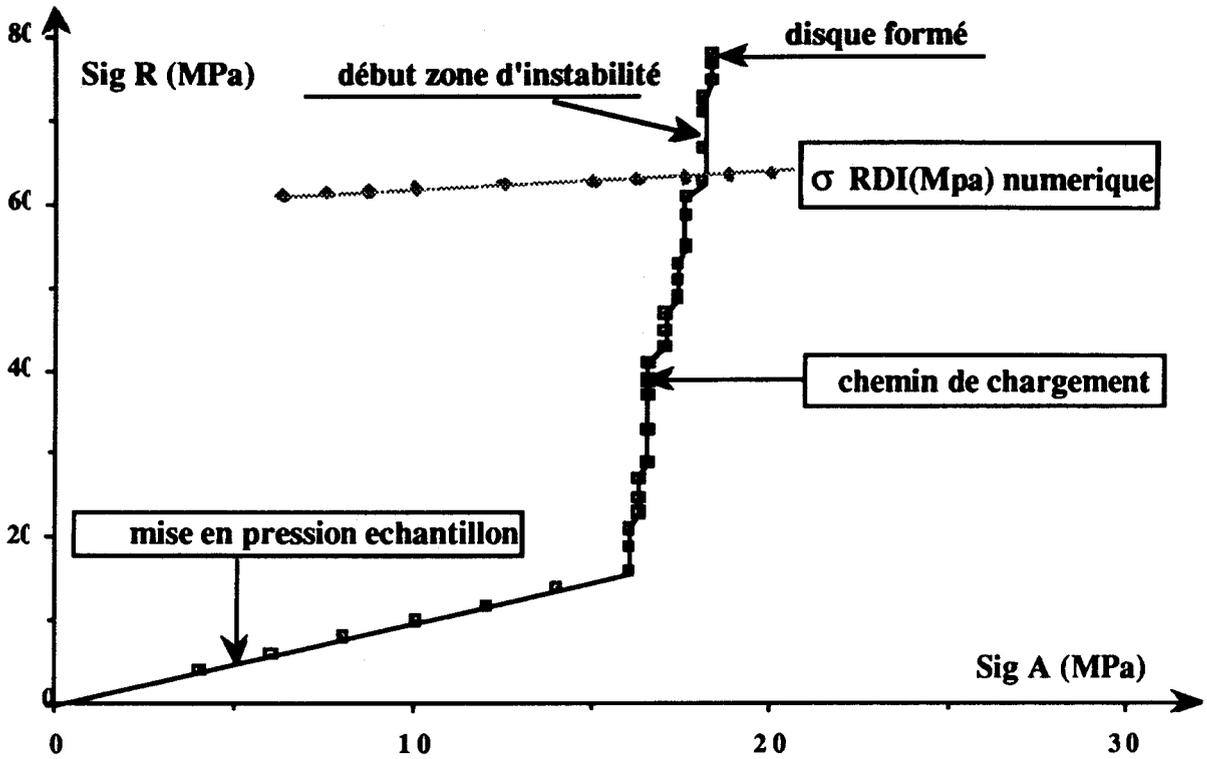


Figure 3.18 : Comparaison des résultats sans pression de boue

Les essais réalisés avec une pression effective en fond de saignée de 1,7 MPa (ou une pression appliquée de 6 MPa) révèlent une amorce de rupture vers 67 MPa de contrainte radiale (fig. 3.20). La droite d'initialisation de rupture coupe le chemin de chargement à 65 MPa. La découpe de l'échantillon en fin d'expérimentation permet de dégager un disque.

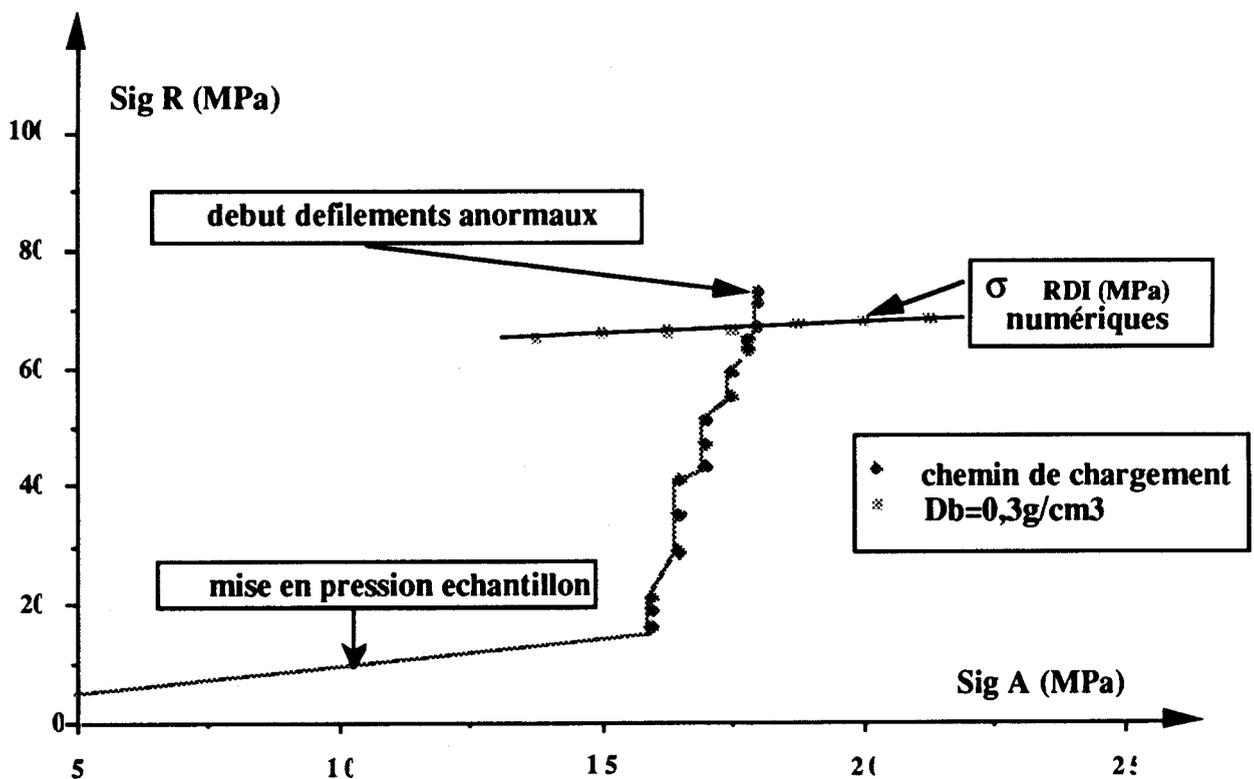


Figure 3.19 : Représentation des résultats obtenus avec une pression de 6 MPa en tête de talc

Pour une pression effective en fond de saignée de talc de 2 MPa (donc de 10 MPa en tête de saignée) (fig. 3.20), la droite d'initialisation de discage coupe le chemin de chargement à une contrainte radiale de 70 MPa. Les défilements anormaux de signaux signalant la propagation de la rupture débutent à une contrainte radiale de 79 MPa. En fin d'essai, à 96 MPa, un disque est formé.

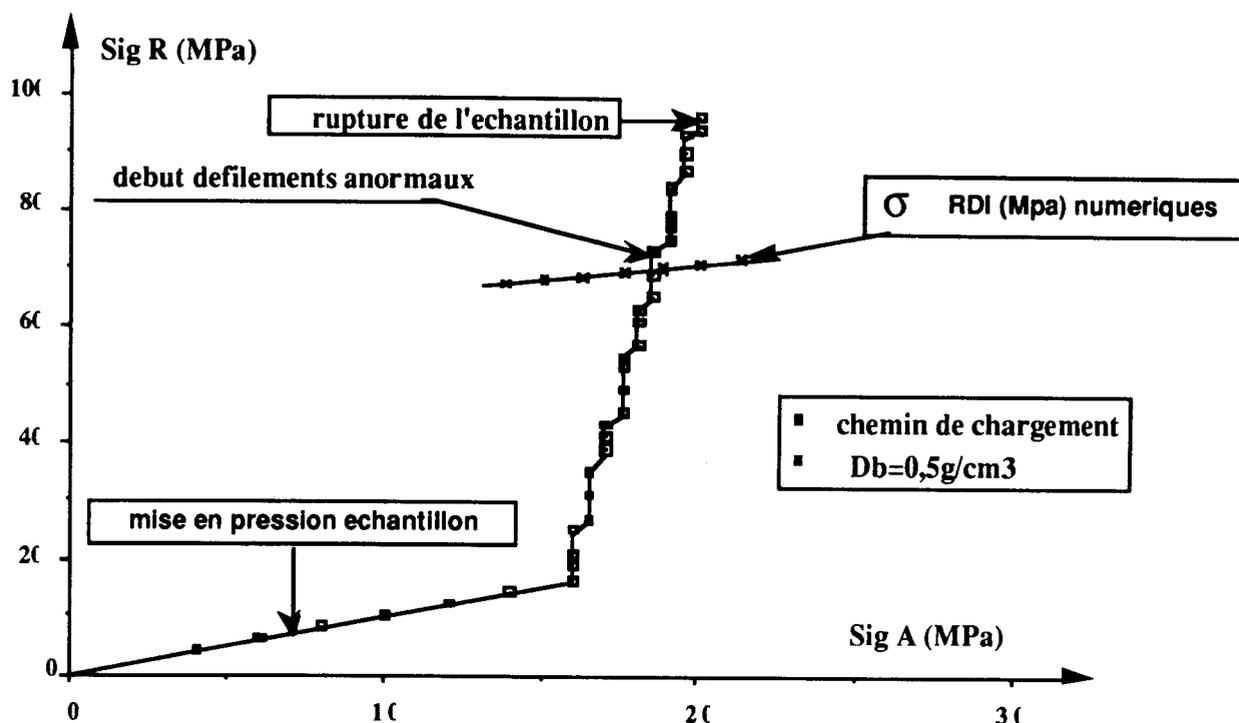


Figure 3.20 : Représentation des résultats sous une pression appliquée de 10 MPa (2 MPa effective)

Lorsque la pression effective est de 2.5 MPa (fig. 3.21), l'échantillon a subi trois cycles de préchargement sous une pression de 10 MPa. La droite d'initialisation du discage rencontre juste le chemin de chargement. La dernière valeur de la contrainte radiale appliquée pendant l'essai coïncide à peu près avec σ_{R1} numérique, ce qui explique l'absence de disque en fin d'expérimentation (la rupture n'ayant pas été atteinte).

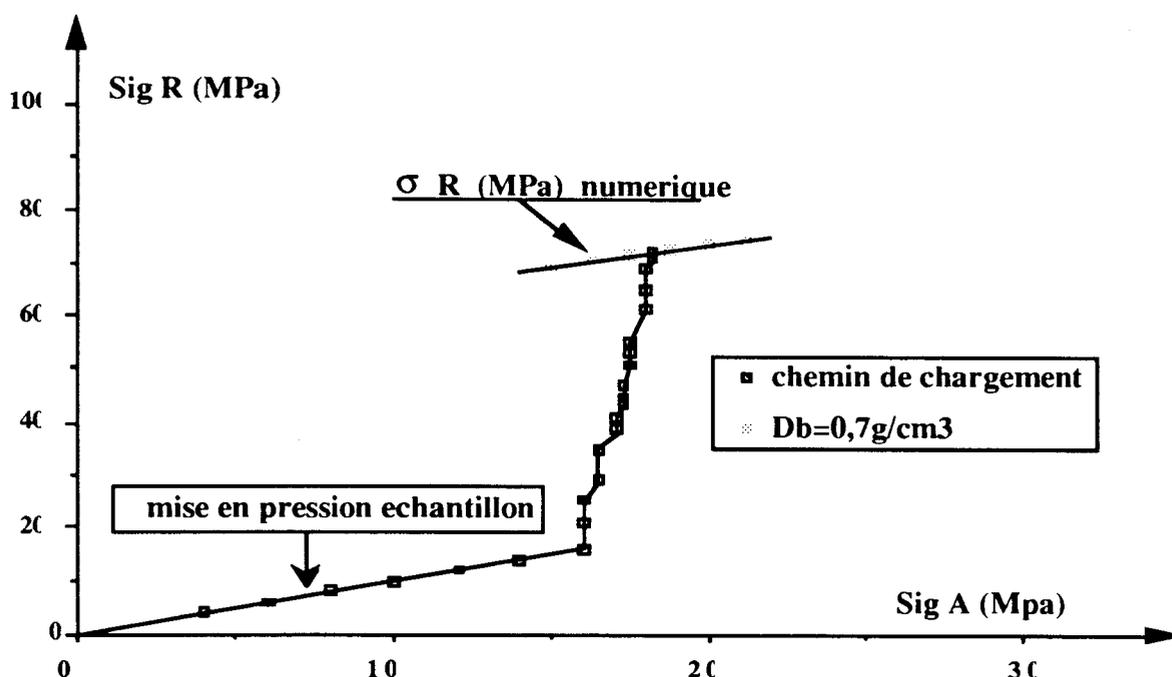


Figure 3.21 : Représentation des résultats obtenus avec une pression de 10 MPa en tête de talc

La différence existant entre les valeurs expérimentales et numériques est difficilement quantifiable. Lors des expérimentations, la contrainte radiale d'initialisation du discage correspond à une arrivée massive d'informations (défilements anormaux et successifs) ce qui laisse une marge d'erreur de 2 MPa maximum sur σ_{Ri} . La redistribution exacte de pression par l'intermédiaire du talc (sur les parois et en haut du disque) est inconnue. Le coefficient de transmission de pression, obtenu en fond de saignée, ne donne qu'une indication sur l'ordre de grandeur de la contrainte effective appliquée en fond de carottier (on obtient ainsi une borne inférieure de la pression de boue équivalente). Les résultats expérimentaux sont légèrement supérieurs aux valeurs numériques (ce phénomène allant dans le sens des remarques citées ci-dessus). Il existe donc une bonne corrélation entre les contraintes radiales d'initialisation de discage obtenues empiriquement et numériquement.

3.4 CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons validé notre logiciel à partir des résultats obtenus soit :

- par un autre logiciel (Bauer [2]),
- par des essais réalisés sans pression de boue (Boumadhi [5]),
- par des essais utilisant le talc comme simulateur de la pression de boue.

Dans le premier cas, à discrétisation identique, les deux logiciels donnent les mêmes valeurs de σ_{Ri} et le même emplacement du point potentiel d'amorce du discage.

Dans les deux cas expérimentaux, les contraintes radiales d'initialisation de discage empiriques sont identiques (pour les essais sans pression de boue) ou légèrement supérieures (pour les essais avec pression de boue) aux valeurs numériques. Pour les simulations des essais réalisés au CERCHAR, la pression de boue utilisée, estimée équivalente à la pression de talc en fond de saignée, est une pression de boue minimale. Les contraintes σ_{Ri} ainsi obtenues numériquement doivent être inférieures à celles relevées expérimentalement. Nous obtenons donc une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux, le logiciel est donc validé.

Une étude complète du comportement du talc est cependant nécessaire afin de déterminer exactement la redistribution de pression en fond de saignée selon le degré de compaction du talc.

CHAPITRE 4 : ETUDE PARAMETRIQUE AVEC SIMULATION DE LA PRESSION DE BOUE

Ce chapitre est entièrement consacré à l'exposé des différents résultats provenant de l'étude de l'influence d'un maximum de paramètres sur le discage (donc sur l'état de contrainte en place) et ce, en présence de boue dans le carottier, contrairement à toutes les études numériques menées jusqu'à présent qui ne tiennent pas compte de ce paramètre (chap. I). Le logiciel DISCAGELF, grâce à son sous-programme de maillage automatique, offre de nombreuses possibilités quant à la forme de fond de saignée. La figure 2.5 (chap. II) représente les différents types de carottiers testés dont 4 (IMAIL = 10-11-12-13) ont exactement la même configuration que les outils de forage pétroliers.

Nous nous proposons d'étudier l'influence (figure 4.1) :

- des caractéristiques géomécaniques du matériau (R_t : résistance à la traction, R_c : résistance à la compression, τ_0 résistance au cisaillement),
- de la pression de boue,
- du rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier,
- de l'épaisseur de la carotte,
- de la forme du fond de saignée (élancement BY, excentricité AX1, type de l'outil IMAIL),
- du poids sur l'outil.

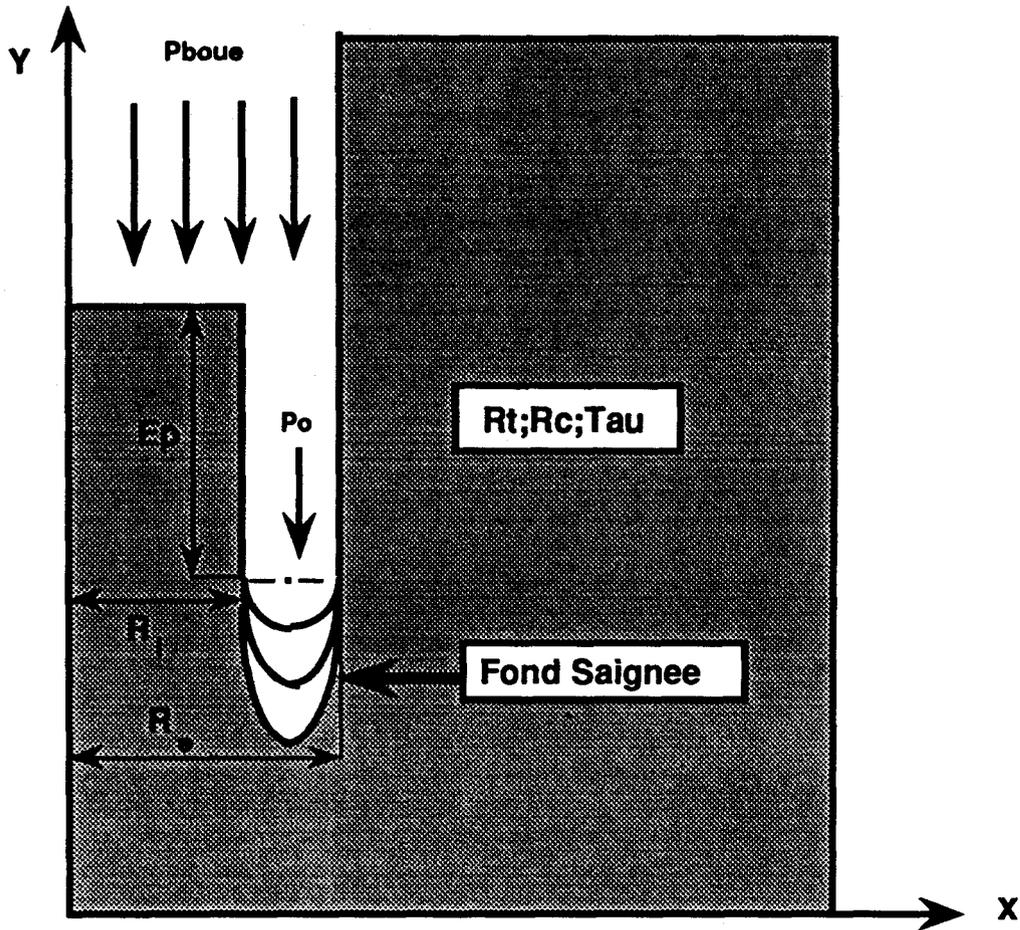


Figure 4.1 : Paramètres étudiés

Afin de pouvoir effectuer des comparaisons, nous utiliserons le même type de maillage avec 8 éléments en fond de saignée (chap. II), ce qui correspond, pour chaque passage dans le logiciel, à un temps de calcul variant de 30 à 45 minutes selon la complexité de la forme du carottier. Les résultats que nous exposerons proviennent de plus de 200 simulations, et peuvent donc être considérés comme représentatifs de l'incidence de certains paramètres sur le discage.

4.1 INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES GEOMECANIQUES

Les résistances à la traction, à la compression et au cisaillement utilisées dans cette partie correspondent aux roches sur lesquelles ont travaillé Obert et Stephenson [38]. Pour toutes les configurations géométriques possibles du domaine, et pour toutes les densités de boue testées, on a observé une augmentation des contraintes radiales d'initialisation de discage σ_{R1} , σ_{R2} lorsque la résistance du matériau augmente, ce qui entraîne un accroissement du domaine de non discage. Les figures 4.2 et celles de l'annexe B1 (fig. B1.a,b,c,d) offrent un aperçu de cette variation pour 5 types de carottiers (la densité de boue est de $1,5 \text{ g/cm}^3$, l'épaisseur des disques de 1 cm et le rapport des rayons du carottier de 1.2).

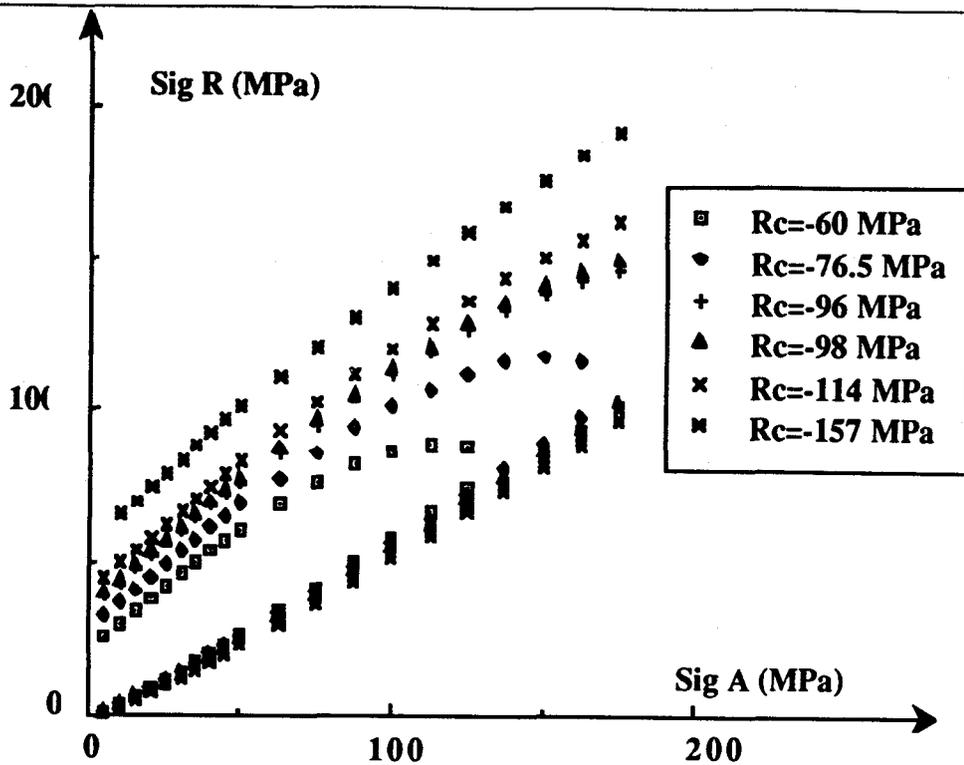


Figure 4.2.a : Variation de $\sigma_{R1} - \sigma_{R2}$ IMAIL = 2

Les contraintes radiales d'initialisation du discage varient linéairement en fonction de la résistance à la compression de la roche, R_c (phénomène observé par Moudafi [37]). En reportant sur un graphe les valeurs de σ_{R1} déterminées précédemment en fonction de R_c , on obtient les figures 4.3.a (et annexe B1, figures 2a,b,c,d). Les pentes et les ordonnées à l'origine de ces droites augmentent en fonction de la profondeur et donc de la contrainte axiale (σ_A).

On observe la même variation linéaire entre σ_{R2} et R_c . Les pentes de ces droites sont proches de zéro. Elles augmentent ainsi que l'ordonnée à l'origine lorsque la contrainte axiale augmente (figure 4.3.b et annexe B1, (figures B3 a,b,c,d).

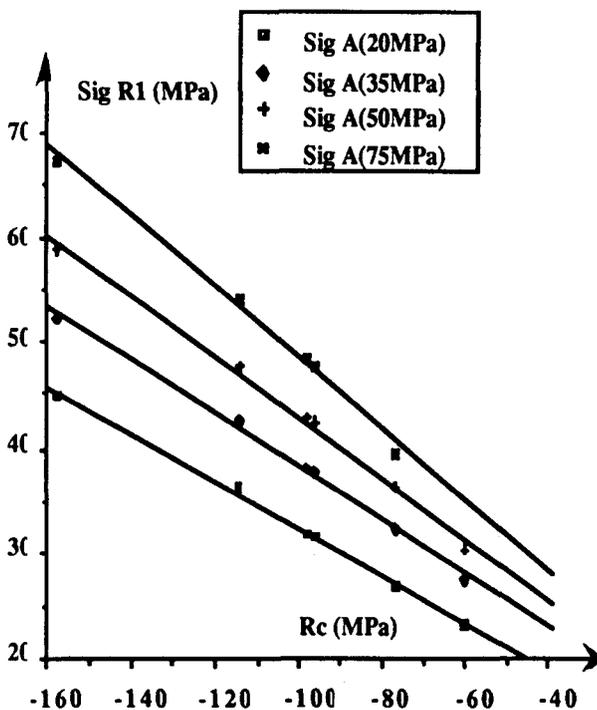


Figure 4.3.a : Variation de σ_{R1} en fonction de R_c
IMAIL = 2

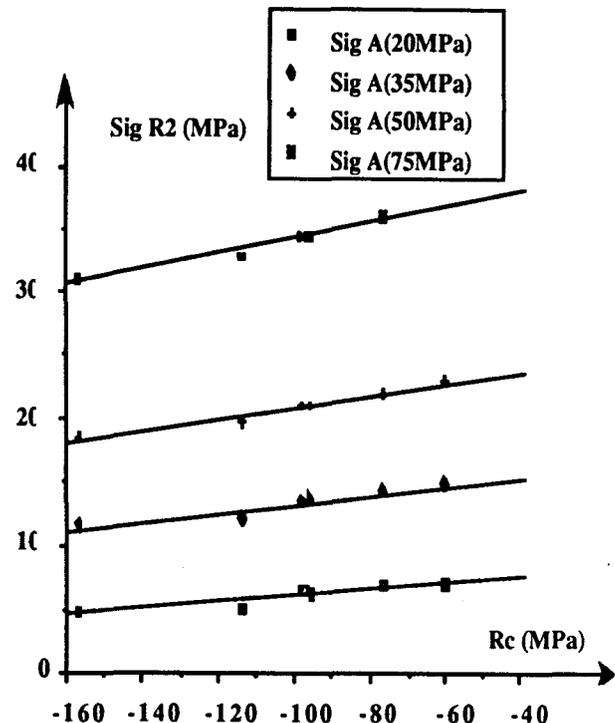


Figure 4.3.b : Variation de σ_{R2} en fonction de R_c
IMAIL = 2

σ_{R2} et de σ_{R1} varient linéairement en fonction de la résistance au cisaillement de la roche τ_o . Les pentes et les ordonnées des droites $\sigma_{R2} = f(\tau_o)$ (figure 4.4.a et annexe B1, figures B4 a,b,c,d) et $\sigma_{R1} = f(\tau_o)$ (figure 4.4.b et annexe B1, figures B5 a,b,c,d) augmentent avec l'accroissement de la profondeur.

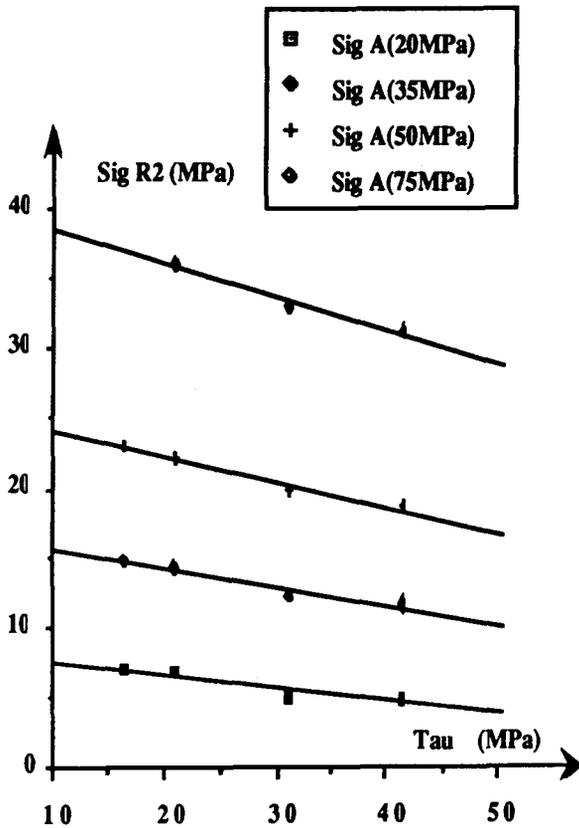


Figure 4.4.a : Variation de σ_{R2} en fonction de τ_o
IMAIL = 2

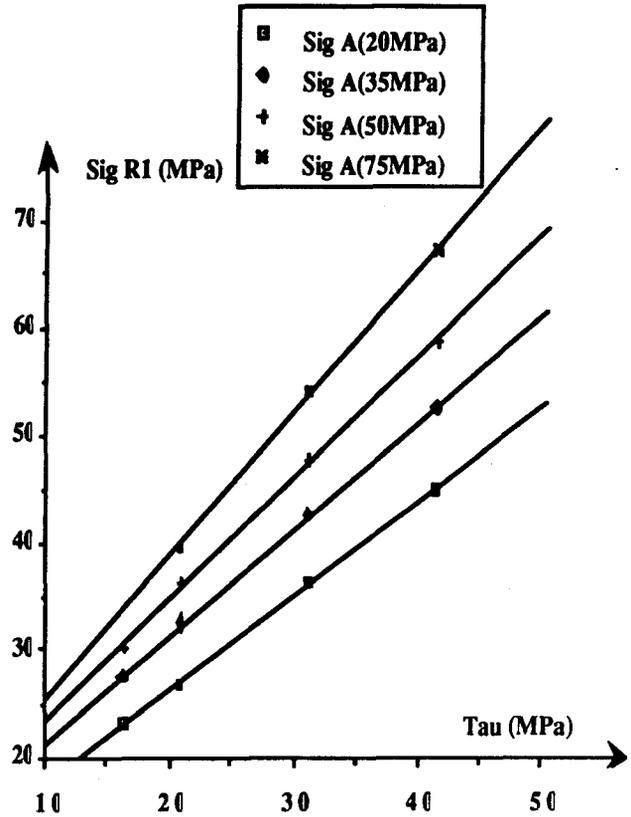


Figure 4.4.b : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_o
IMAIL = 2

Aucune relation linéaire n'existe entre σ_{R1} et σ_{R2} et la résistance à la traction R_t de la roche.

En résumé, nous avons constaté que :

- Les contraintes radiales d'initialisation de disage varient linéairement en fonction de la résistance à la compression et au cisaillement du matériau en présence de boue dans le forage. Nous rejoignons ainsi qualitativement les remarques d'Obert et Stephenson [38], Durelli [10] (qui ont effectué leurs expérimentations sans pression de boue).
- L'augmentation de la "résistance" de la roche peut retarder le disage.

4.2 INFLUENCE DE LA DENSITE DE BOUE

Les figures 4.5 (et celles de l'annexe B2, figures B6 a,b,c) représentent les variations des contraintes radiales d'initialisation de disage σ_{R1} σ_{R2} en fonction de la densité de boue, pour un type de matériau ($R_t - R_c$ fixes) et une épaisseur de disque de 1 cm.

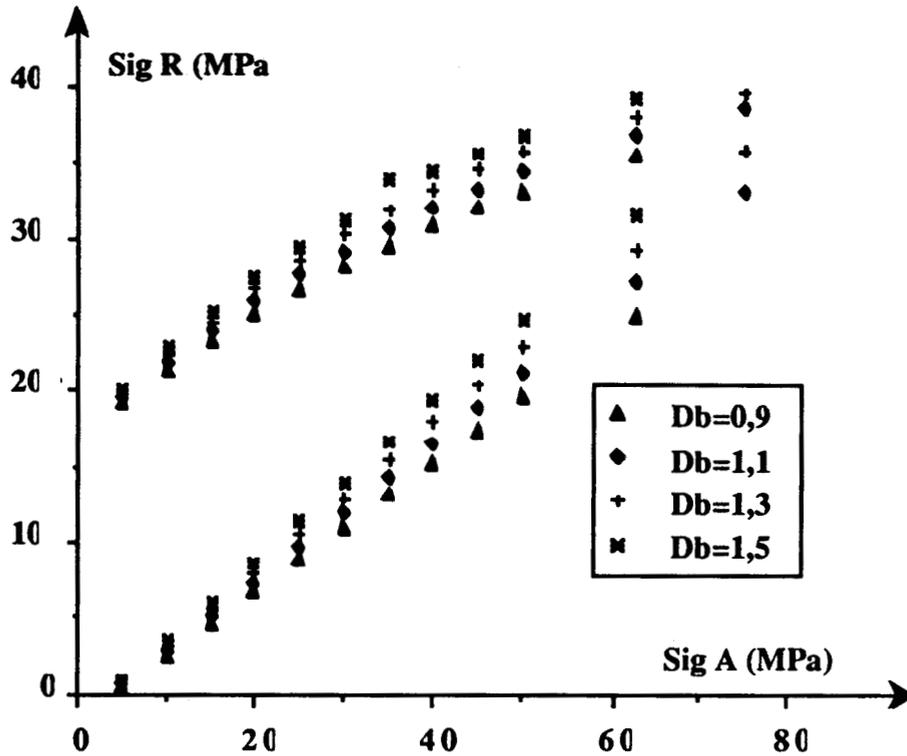


Figure 4.5 : Variation du domaine de non dischage en fonction de la densité de boue
 IMAIL = 5 $R_e/R_i = 2$

On constate :

- qu'en règle générale, l'augmentation de la densité de boue entraîne un accroissement des valeurs des contraintes σ_{R1} et σ_{R2} déplaçant ainsi le domaine de non dischage vers des zones de fortes contraintes radiales,
- que pour certains types de carottiers, et certaines valeurs des caractéristiques géomécaniques de la roche, à contrainte axiale constante, une trop forte densité de boue peut provoquer la rupture. Par exemple, sur la figure 4.5, pour une contrainte axiale de 75 MPa, on note qu'une densité de boue de 1,5 ou de 0,9 conduit à l'initialisation du dischage pour toutes contraintes radiales, alors que pour une densité de boue de 1,3 ; on retrouve un domaine de non dischage délimité par σ_{R1} et σ_{R2} .

Les contraintes radiales d'initialisation de dischage varient linéairement en fonction de la densité de la boue. Les pentes et les ordonnées à l'origine de ces droites augmentent avec la profondeur du forage et diffèrent d'un carottier à l'autre (fig. 4.6 et annexe B2, figures B7 a,b,c)

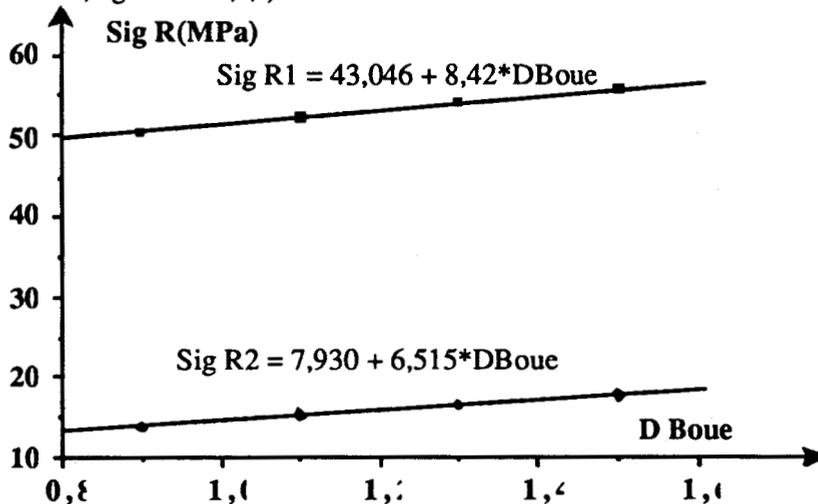


Figure 4.6 : Variation de σ_{R1} - σ_{R2} en fonction de la densité de boue
 IMAIL = 5 $\sigma_A = 40$ MPa

Pour chaque configuration du carottier, les influences des caractéristiques géomécaniques de la roche et de la densité de boue :

- sur σ_{R1} sont regroupées sur les figures 4.7 a,b (annexe B2, figures B8 a,b)

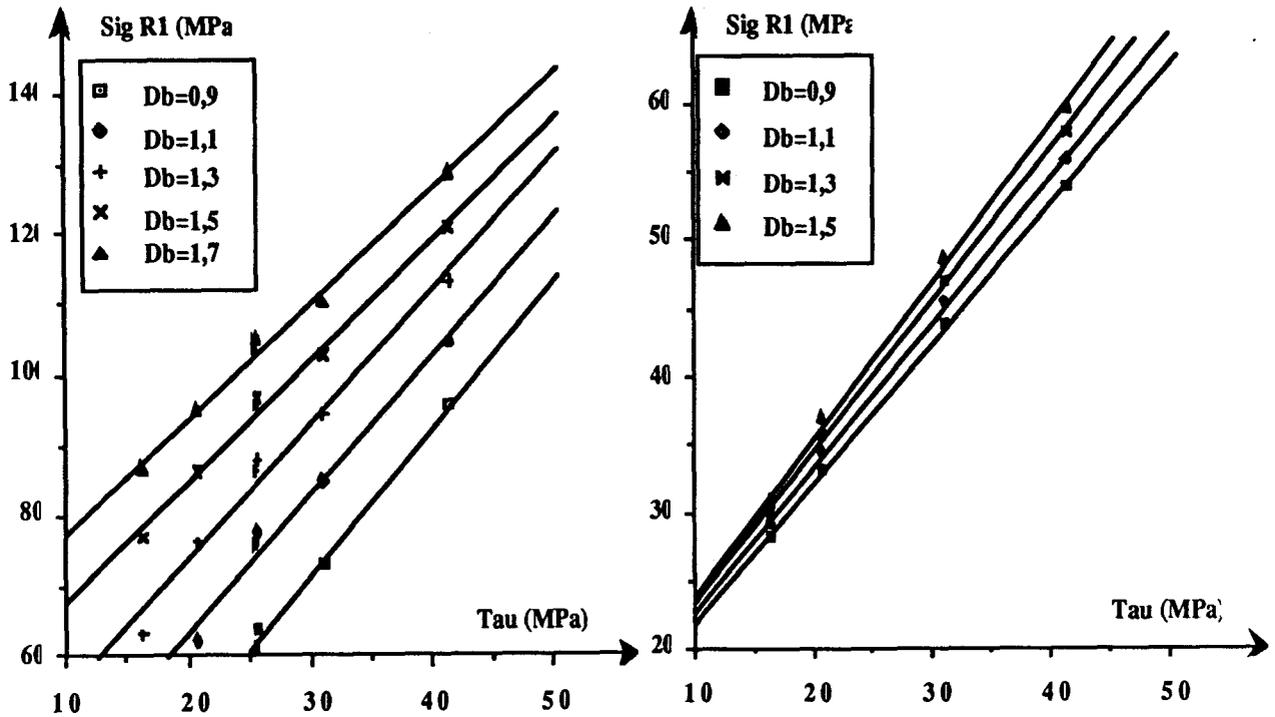


Figure 4.7.a : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0
 IMAIL = 2 $\sigma_A = 75$ MPa
 $R_e/R_i = 1.2$

Figure 4.7.b : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0
 IMAIL = 5 $\sigma_A = 50$ MPa
 $R_e/R_i = 2$

Lorsque l'on accroît la densité de boue :

- les ordonnées à l'origine de ces droites augmentent,
- les pentes de ces droites augmentent pour les carottiers de type IMAIL = 4, 5, 6 et 7 de rapport de rayon 2,
- les pentes de ces droites diminuent pour les carottiers de type IMAIL = 2 de rapport de rayon 1.2.

- sur σ_{R2} sont représentées sur les figures 4.8 a,b (annexe B2, figures B9 a,b)

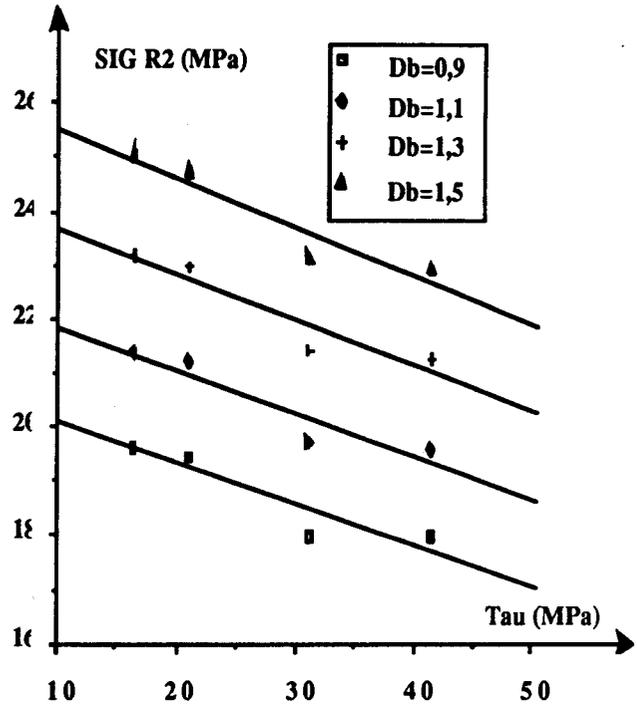
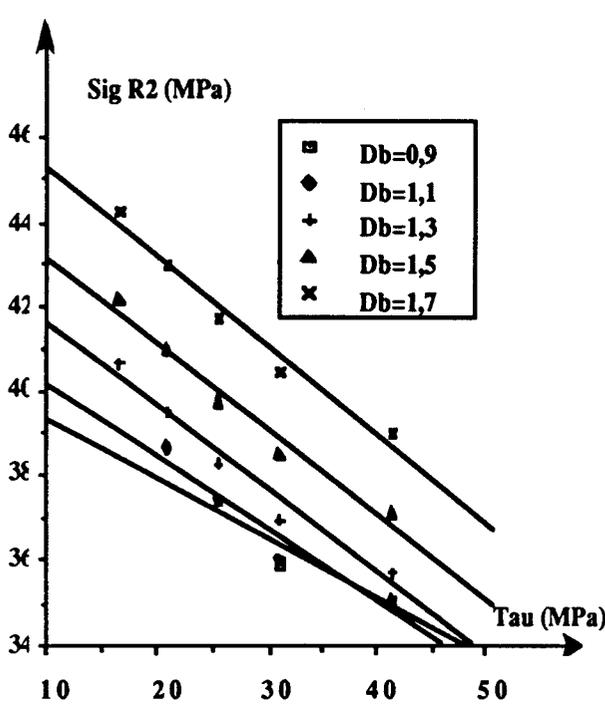


Figure 4.8.a : Variation de σ_{R2} en fonction de τ_0
 IMAIL = 2 $\sigma_A = 75$ MPa
 $R_e/R_i = 1.2$

Figure 4.8.b : Variation de σ_{R2} en fonction de τ_0
 IMAIL = 5 $\sigma_A = 50$ MPa
 $R_e/R_i = 2$

Les ordonnées et les pentes de ces droites $\sigma_{R2} = f(\tau_0)$ augmentent lorsque l'on augmente la densité de boue.

Nous avons pu noter dans ce chapitre que :

- les contraintes radiales d'initialisation de discage σ_{R1} et σ_{R2} varient linéairement en fonction de la densité de boue pour tous les types de carottiers et de roches simulés,
- l'augmentation de la densité de boue retarde le phénomène de discage en règle générale, en augmentant σ_{R1} et σ_{R2} . A partir d'un certain stade, dépendant principalement de la nature de la roche et de la configuration géométrique du carottier, un accroissement de la densité de boue peut provoquer la rupture (on se situe en dehors de la zone de non discage). On rejoint les constatations faites sur le terrain par les ingénieurs pétroliers relevées par Guenot [14] et Cheatham [6],
- le sens de variation des pentes des droites $\sigma_{R1} = f(\tau_0)$ en fonction de l'augmentation de la densité de boue dépend de la géométrie de l'outil de forage. Lors des simulations effectuées, nous avons constaté que l'inversion du sens de variation est due à la différence du rapport des rayons du carottier plutôt qu'à celle de la forme du fond de la saignée. Nous reviendrons sur l'explication de ce phénomène dans le chapitre suivant.

4.3 INFLUENCE DU RAPPORT RAYON EXTERIEUR SUR RAYON INTERIEUR DU CAROTTIER

Lors de nos simulations, nous avons constaté que, pour n'importe quel type d'outil de forage (pour différentes roches et densités de boue), la contrainte radiale d'initialisation de dischage σ_{R1} diminue à partir d'une certaine valeur du rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier. Un exemple de ce phénomène est représenté sur la figure 4.9.

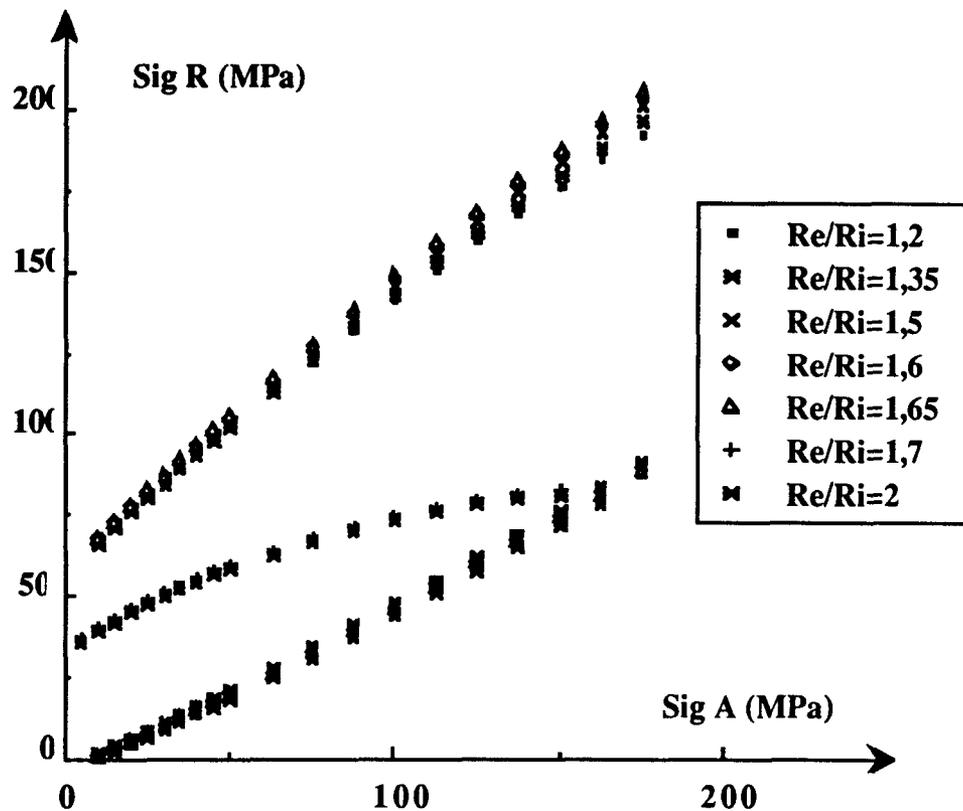


Figure 4.9 : Variation de σ_{R1} et σ_{R2} en fonction de σ_A
 IMAIL = 2 densité de boue : 1,5

Lorsque le rapport R_e/R_i varie de 1.2 à 1.65, les pentes et les ordonnées à l'origine des droites $\sigma_{R1} = f(\tau_0)$ diminuent légèrement. Au-delà de cette valeur de 1.65, σ_{R1} chute brutalement et la pente des droites diminue légèrement (figure 4.10.a).

Les ordonnées à l'origine des droites $\sigma_{R2} = f(\tau_0)$ diminuent (tandis que les pentes augmentent) de façon "uniforme" (sans brusque saut) quand le rapport des rayons du carottier augmente (fig. 4.10.b).

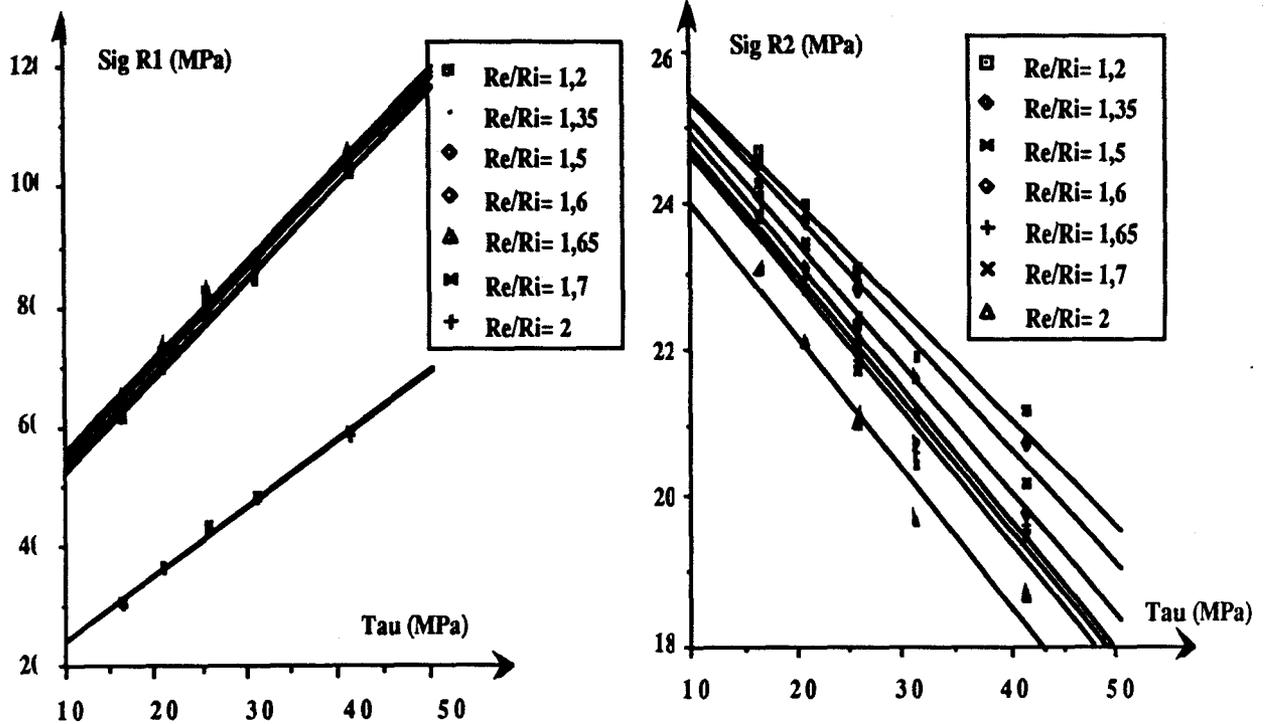


Figure 4.10.a : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_o IMAIL = 2 densité de boue = 1,5
 Figure 4.10.b : Variation de σ_{R2} en fonction de τ_o IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

Nous avons pu remarquer que cette brusque variation de σ_{R1} est accompagnée d'un changement dans la position du point potentiel d'initialisation du discage. Quand le rapport rayon extérieur sur rayon intérieur est inférieur ou égal à 1.65, le point d'amorce de la rupture se situe sous la saignée du côté externe pour σ_{R1} (A) et sous la saignée du côté interne pour σ_{R2} (B). Pour des valeurs de rapport supérieures à 1.65, le point correspondant à σ_{R2} ne bouge pas ; par contre, pour σ_{R1} l'initialisation du discage démarre sous l'axe du carottier (C) (figure 4.11). Les contraintes σ_{R1} ne proviennent pas du même point.

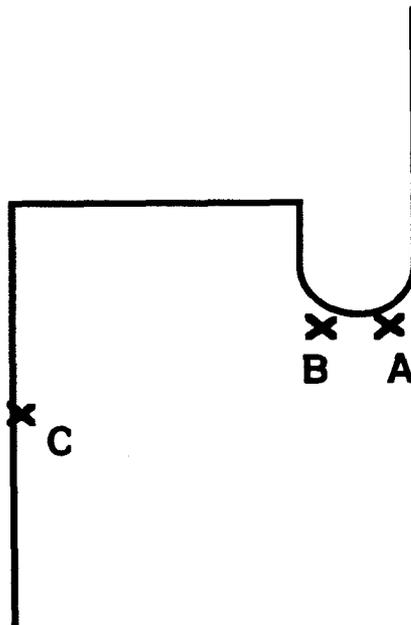


Figure 4.11 : Position des points d'initialisation du discage

Le nombre d'éléments en fond de saignée étant fixé constant ($K_d = 8$) pour toute l'étude paramétrique, la taille des éléments de base est fortement influencée par la valeur du rapport rayon extérieur sur rayon intérieur. Pour $R_e/R_i = 2$, les éléments en fond de saignée sont de l'ordre du centimètre, par contre pour R_e/R_i égal à 1.2, leur dimension est de quelques millimètres.

Nous avons donc repris l'étude d'influence du rapport R_e/R_i sur les contraintes radiales d'initialisation de discage en utilisant la même dimension pour l'élément de base (K_d diminue lorsque le rapport rayon extérieur sur rayon intérieur diminue).

Les contraintes σ_{R1} diminuent progressivement quand ce rapport augmente (figure 4.12) pour chuter brutalement au-delà de R_e/R_i égal à 1.8.

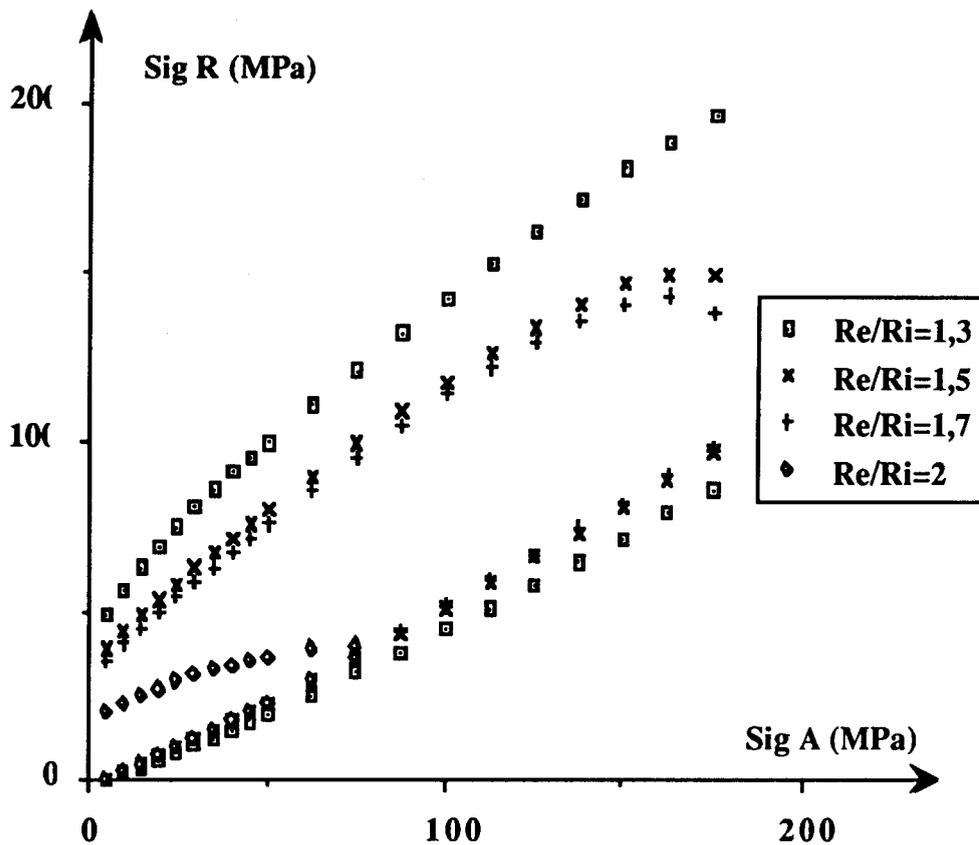


Figure 4.12 : Variation de σ_{R1} et σ_{R2} en fonction de σA
 IMAIL = 2 densité de boue = 1.5

On observe de la même façon ce phénomène pour des carottiers de types différents (annexe B3, figures B10 a,b,c,d).

On ne peut pas exclure totalement la possibilité que cette brusque diminution de σ_{R1} ne soit induite indirectement par le maillage du domaine. On peut souligner le fait, qu'en comparant les résultats provenant d'une discrétisation du domaine, soit à un nombre d'éléments (K_d) constant en fond de saignée, soit à dimension de l'élément de base identique, on aboutit à une diminution de σ_{R1} ainsi que du domaine de non discage quand R_e/R_i augmente.

Nous avons noté dans ce paragraphe :

- que l'augmentation du rapport rayon extérieur sur rayon intérieur favorise le discage. (Cette constatation est à rapprocher de celle de Dyke [11]),

- que le point d'initialisation du discage peut se situer à trois endroits différents, soit :
 - sous la saignée du côté interne pour σ_{R2} (le mécanisme de la rupture étant en forte traction, faible compression),
 - pour σ_{R1} , sous la saignée du côté externe lorsque le rapport des rayons du carottier est faible (inférieur à 1.7) (le mécanisme de rupture étant en cisaillement ou induit par compression pure), ou sous l'axe du carottier avec un mode de rupture en cisaillement lorsque le rapport des rayons du carottier est supérieur à 1.7 (L'influence de la géométrie du carottier sur la position du point d'initialisation du discage a été également relevée par Stacey [43] sans qu'il y ait présence de boue dans le forage).

Cette deuxième remarque est très intéressante car le changement de position du point d'initialisation du discage influe directement sur l'épaisseur des disques. Il y a donc interaction de ces deux paramètres : épaisseur des disques, rapport des rayons du carottier.

4.4 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA CAROTTE

Afin de prendre en compte l'observation précédente sur l'influence du rapport des rayons du carottier sur les contraintes de discage, nous donnerons les résultats obtenus pour plusieurs types de carottiers de rapport de rayon 1.5 et 2.

4.4.1 Faible rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier (= 1.5)

Nous n'avons relevé, lors de nos simulations, aucune variation des contraintes radiales d'initialisation de discage σ_{R1} et σ_{R2} en fonction de l'épaisseur de la carotte (figures 4.13 et annexe B4, figures B11 a,b), et ce pour n'importe quelles roches ou densité de boue.

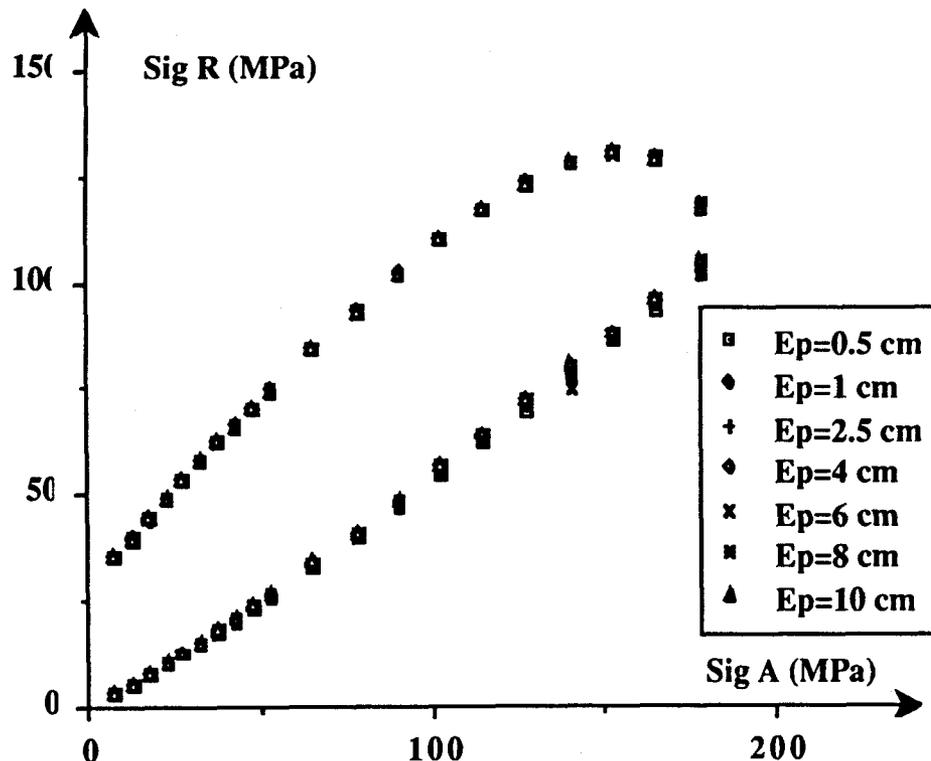


Figure 4.13 : Variation de σ_{R1} - σ_{R2} en fonction de σ_A
 IMAIL = 2 densité de boue = 1.5

Si l'on représente les variations de σ_{R1} (figure 4.14 a et annexe B4 figures B12 a,b) et de σ_{R2} (figure 4.14 b et annexe B4 figures B13 a,b) en fonction de l'épaisseur de la carotte (E_p), on obtient des droites sub-horizontales, quelque soit la profondeur.

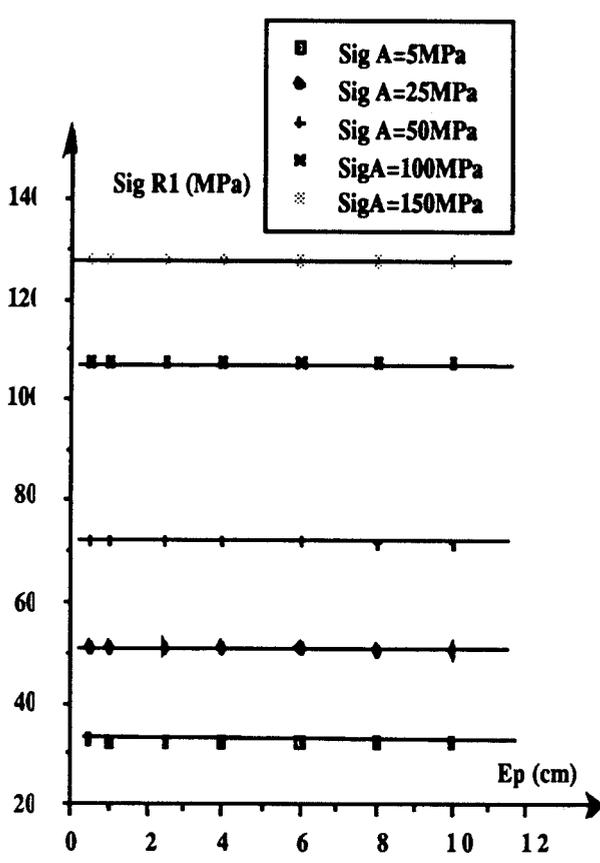


Figure 4.14.a : $\sigma_{R1} = f(E_p)$
 IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

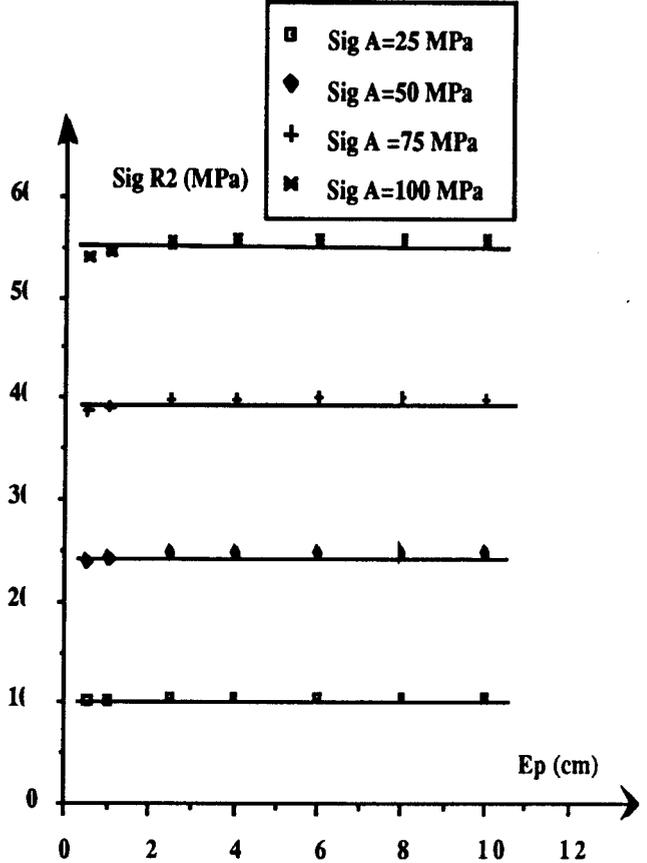


Figure 4.14.b : $\sigma_{R2} = f(E_p)$
 IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

Le point d'initialisation potentiel de discage se trouve toujours dans la même zone sous la saignée (sa position exacte fluctue selon le type du carottier).

La pente et l'ordonnée à l'origine des droites $\sigma_{R1} = f(\tau_o)$ (figure 4.15 a et annexe B4 figure B14 a), ou $\sigma_{R2} = f(\tau_o)$ (figure 4.15 b et annexe B4 figure B14 b) sont constantes quelque soit l'épaisseur.

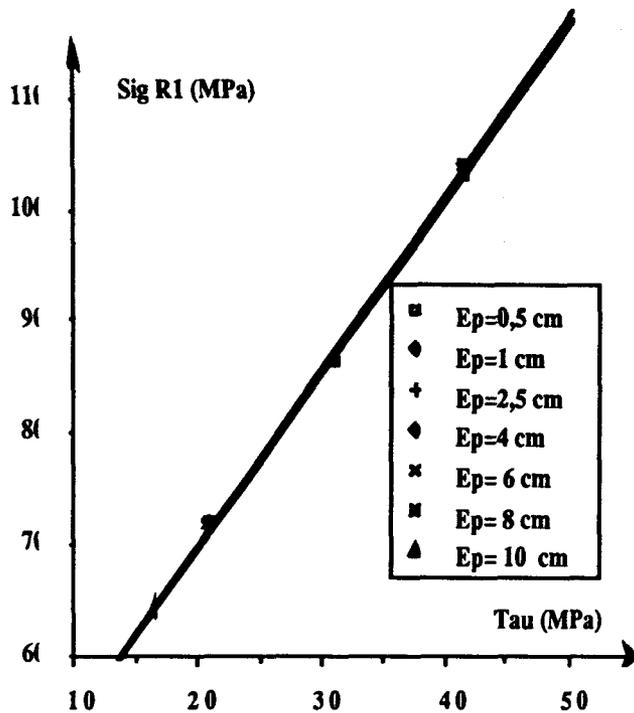


Figure 4.15.a : $\sigma_{R1} = f(\tau_o)$
 IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

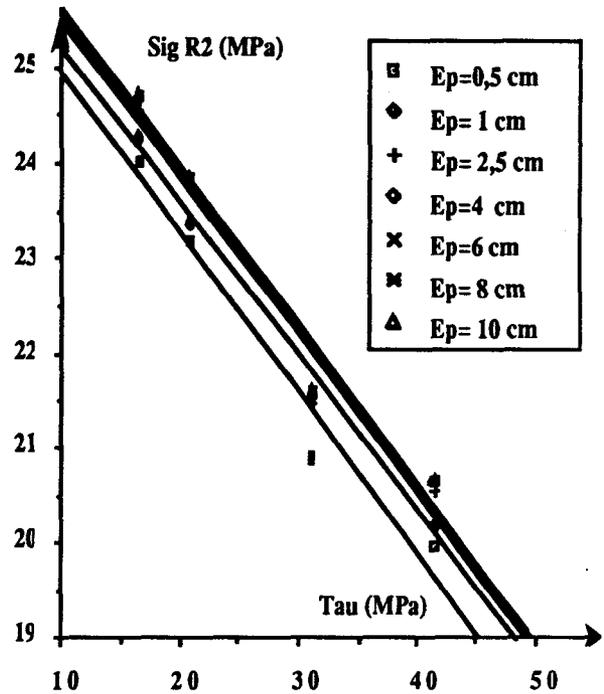


Figure 4.15.b : $\sigma_{R2} = f(\tau_o)$
 IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

Nous pouvons donc conclure que pour les faibles rapports de rayon du carottier (≤ 1.5), l'épaisseur de la carotte n'influe pas sur les contraintes radiales d'initialisation de discage. Les fluctuations observées quant à la position du point potentiel d'initialisation de discage sont dues à la profondeur, à la résistance de la roche, à la géométrie de l'engin de forage et à la densité de boue.

4.4.2 Fort rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier (= 2)

$\sigma_{R1} - \sigma_{R2}$ sont constantes pour des épaisseurs de carottes variant de 0,1 cm à 2,5 cm. Les points d'initialisation de discage se situent pour σ_{R1} sous l'axe du carottier, et pour σ_{R2} sous la saignée côté interne. Au-delà d'une épaisseur de 2,5 cm, σ_{R1} chute et σ_{R2} reste constant. Le point d'initialisation potentiel de discage correspondant à σ_{R1} se déplace sous l'axe du carottier et se rapproche de la saignée. Entre 3 et 7 cm, σ_{R1} et σ_{R2} sont de nouveau constantes. A partir d'une épaisseur de carotte de 8 cm, σ_{R1} croît légèrement. Le point d'initialisation du discage migre vers le bord interne de la saignée (figure 4.16 et annexe B4 figures B15 a,b).

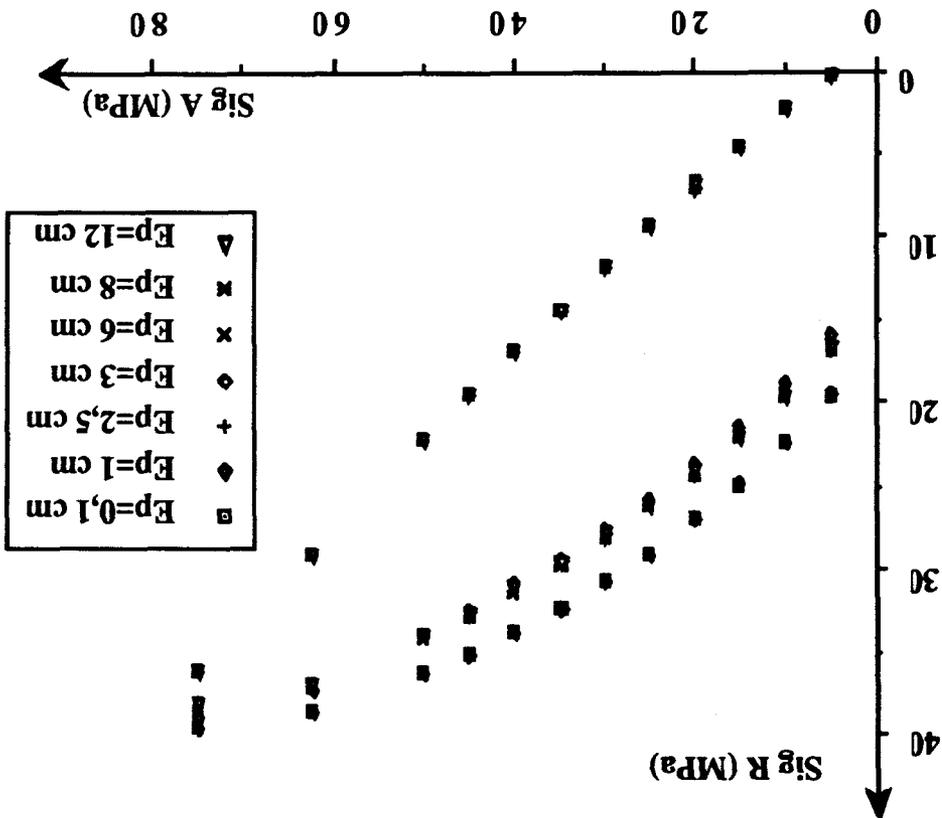


Figure 4.16 : Variation de $\sigma R1 - \sigma R2$ en fonction de σA

IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

Le report de ces valeurs sur des graphes $\sigma R1 = f(Ep)$ (figure 4.17 a et annexe B4 figures 16 a,b) montre de façon très distincte le seuil correspondant à une épaisseur de la carotte de 3 cm. Celui provenant d'une épaisseur de 7 cm est moins prononcé. Nous l'avons détecté grâce au brusque changement de la position du point d'initialisation du discage. Par contre $\sigma R2$ est constante pour toutes les épaisseurs testées (figure 4.17 b et annexe B4 figures 17 a,b)

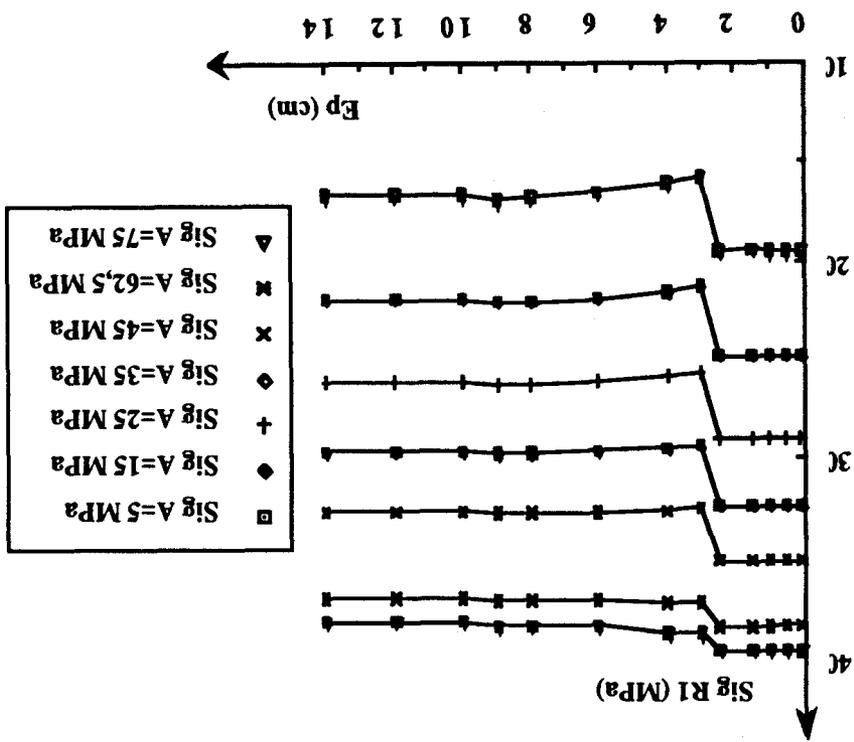


Figure 4.17a : $\sigma R1 = f(Ep)$

IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

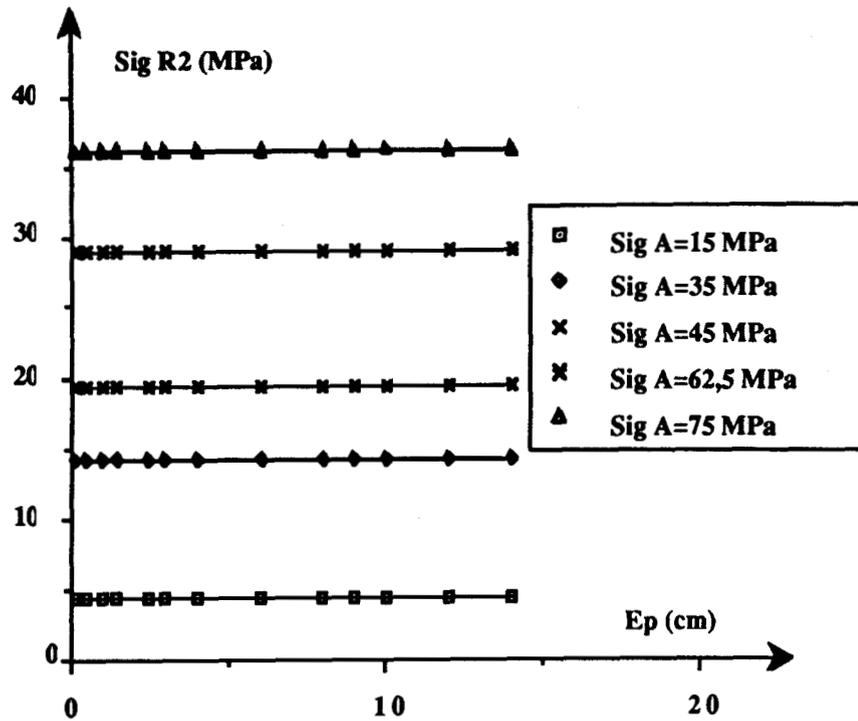


Figure 4.17.b : $\sigma_{R2} = f(Ep)$
 IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

Le passage d'une épaisseur de la carotte de 2,5 cm à 3 cm augmente les pentes des droites $\sigma_{R1} = f(\tau_0)$ (figure 4.18 a et annexe B4 figure B18 a). Par contre, aucune influence de l'épaisseur de la carotte en fonction de τ_0 sur σ_{R2} n'a été décelée (figure 4.18 b et annexe B4 figure B18 b).

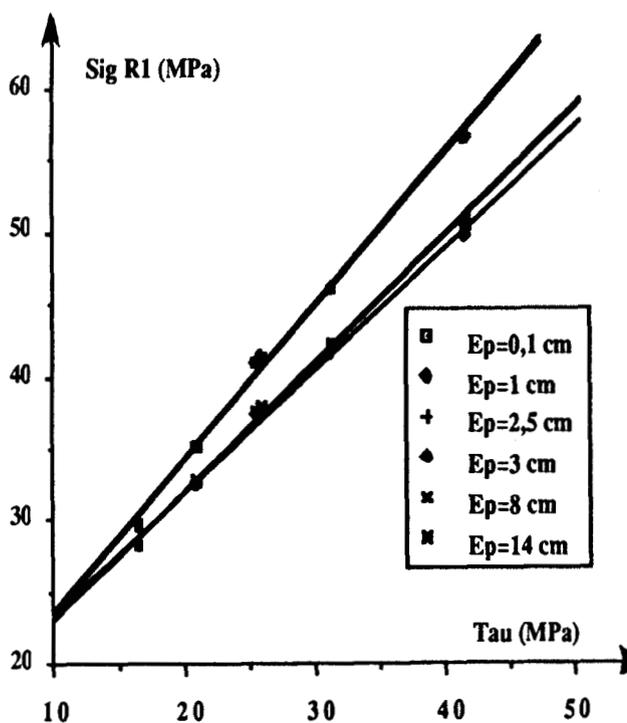


Figure 4.18.a : $\sigma_{R1} = f(\tau_0)$
 IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

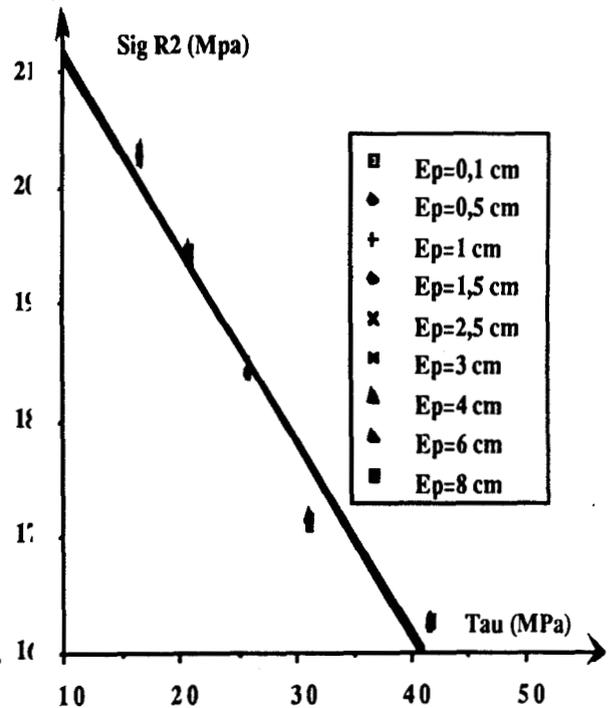


Figure 4.18.b : $\sigma_{R2} = f(\tau_0)$
 IMAIL = 2 densité de boue = 1,5

Dans ce chapitre, nous avons vu que l'épaisseur de la carotte n'influe pas sur les contraintes radiales d'initialisation de discage pour des rapports rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier inférieurs ou égaux à 1.5. Ceci correspond aux observations expérimentales de Boumadhi [5] et de Moudafi [37] qui ont utilisé pour leurs essais des outils de forage de rapport de rayon 1.2. Par contre, pour des rapports de rayon de carottier de l'ordre de 2, trois familles de disques potentiels, correspondant à des positions du point d'initialisation du discage et à des valeurs de contraintes radiales différentes, peuvent être distinguées selon leurs épaisseurs :

- Les disques potentiels d'épaisseurs inférieures à 3 cm.
- Les disques potentiels d'épaisseurs comprises entre 3 et 7 cm.
L'initialisation du discage se produit sous l'axe côté interne (pour σ_{R1}), sous la saignée du côté interne (pour σ_{R2}).
- Les disques potentiels d'épaisseurs supérieures à 8 cm. L'amorce du discage se situant sous la saignée du côté interne ou du côté externe.

Ces résultats concordent avec les observations de Zanon [51] sur la classification des disques en fonction de leur épaisseur, ainsi qu'avec les résultats numériques de Stacey [43] et Chemaou [7] qui ont remarqué un déplacement de la zone à haute probabilité de rupture vers la saignée du carottier lorsque l'épaisseur des disques augmente.

4.5 INFLUENCE DE LA FORME DE L'OUTIL

4.5.1 Influence de l'élanement (BY) du carottier

Dans une première partie, nous donnerons les résultats obtenus pour des carottiers de faible rapport rayon extérieur sur rayon intérieur, puis nous exposerons ceux provenant des simulations faites sur des carottiers ayant un rapport de rayon de 2. L'excentricité AX1 sera prise constante et égale à la moitié des rapports des rayons des outils de forage pour les résultats exposés dans ce qui suit.

Influence de BY pour des carottiers de rapport de rayons inférieurs à 1.7.

Les figures 4.19 a,b, 4.20 a,b, 4.21 a,b, 4.22 a,b représentent les variations de σ_{R1} , σ_{R2} en fonction de la profondeur et de l'élanement (BY) de l'outil de forage pour deux types de matériau (l'épaisseur des disques est de 1 cm, la densité de boue de 1,5).

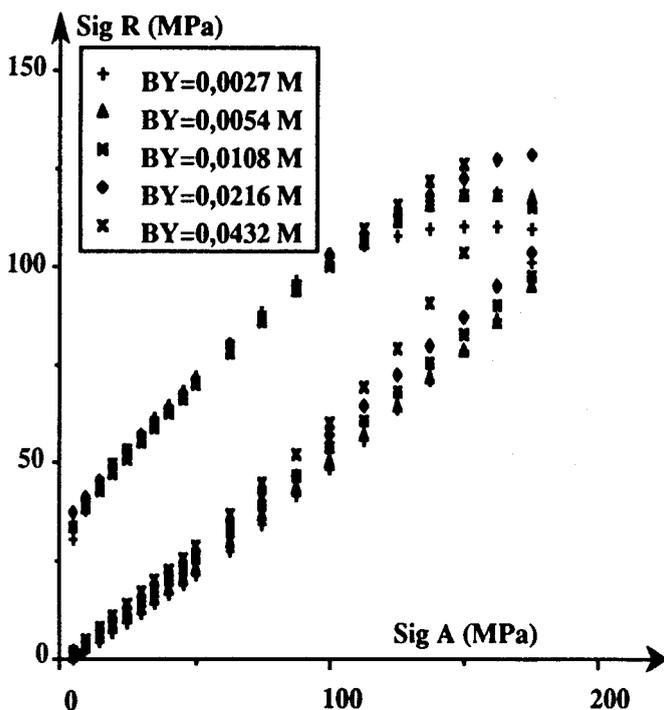


Figure 4.19.a : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}

IMAIL = 4 $R_e/R_i = 1.2$
 $R_t = 5,3 \text{ MPa}$ $R_c = -76,5 \text{ MPa}$

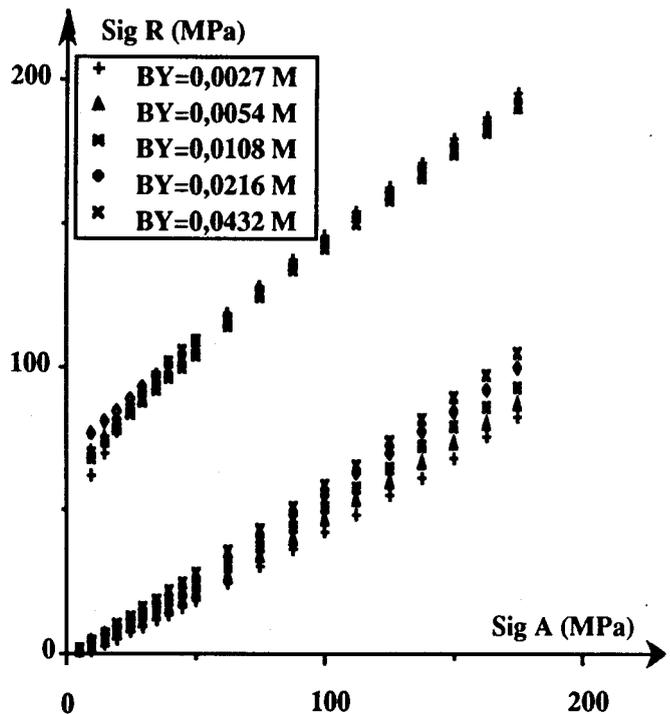


Figure 4.19.b : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}

IMAIL = 4 $R_e/R_i = 1.2$
 $R_t = 9 \text{ MPa}$ $R_c = -157 \text{ MPa}$

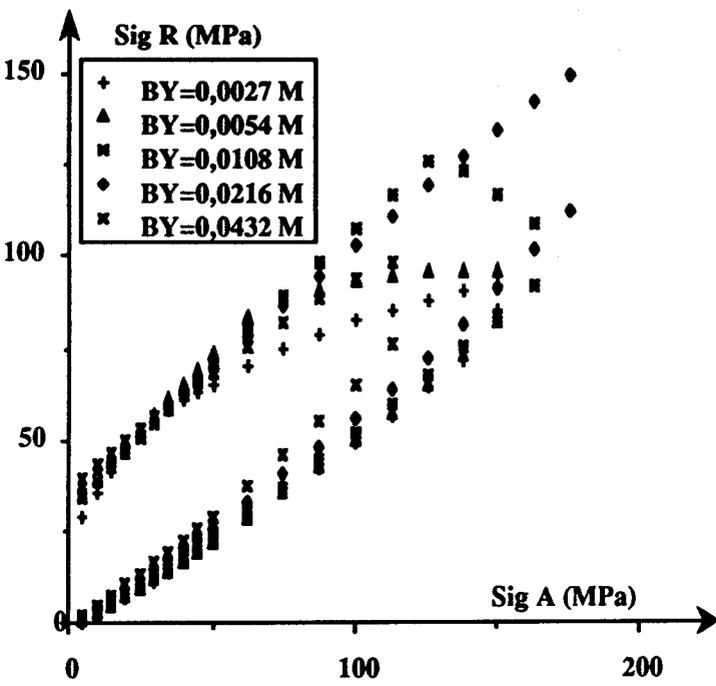


Figure 4.20.a : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}

en fonction de σ_A

IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.2$

$R_t = 5,3 \text{ MPa}$ $R_c = -76,5 \text{ MPa}$

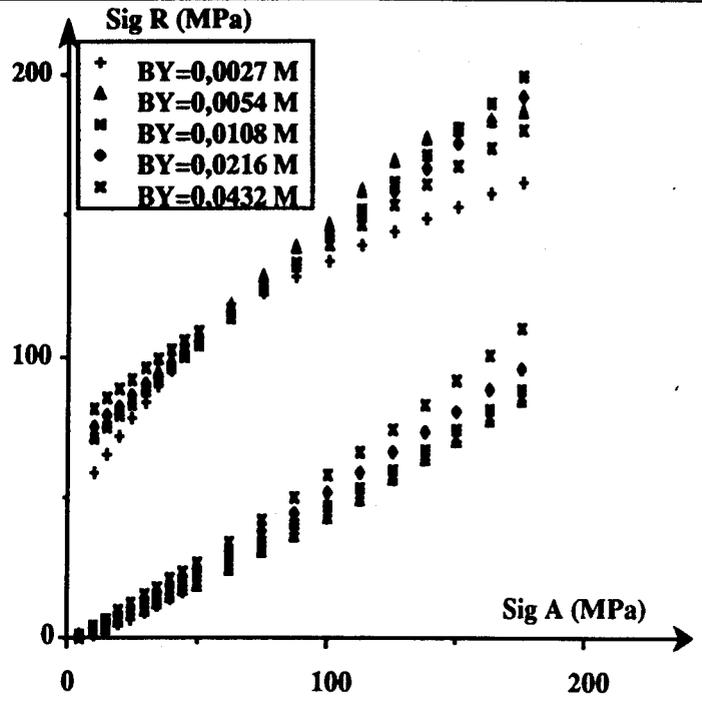


Figure 4.20.b : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}

en fonction de σ_A

IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.2$

$R_t = 9 \text{ MPa}$ $R_c = -157 \text{ MPa}$

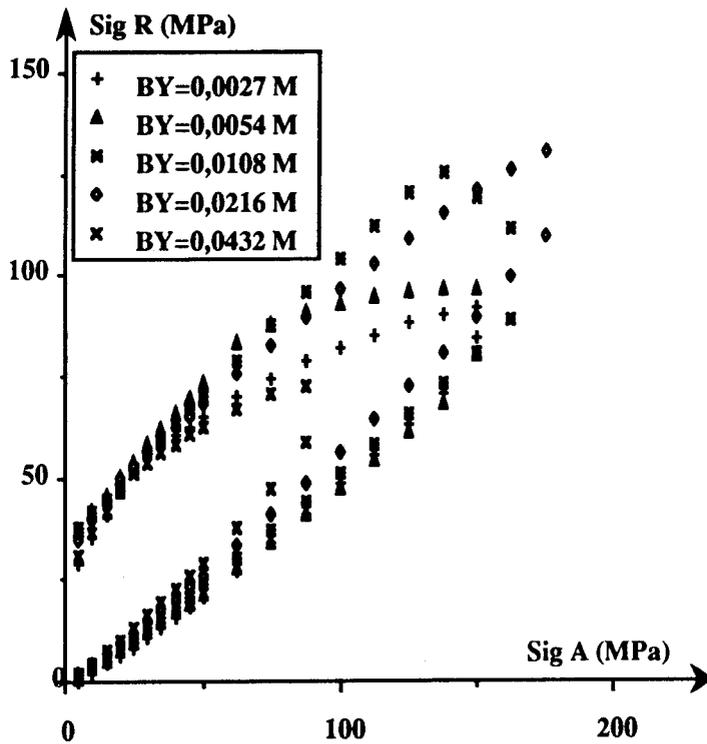


Figure 4.21.a : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}

en fonction de σ_A

IMAIL = 6 $R_e/R_i = 1.2$

$R_t = 5,3 \text{ MPa}$ $R_c = -76,5 \text{ MPa}$

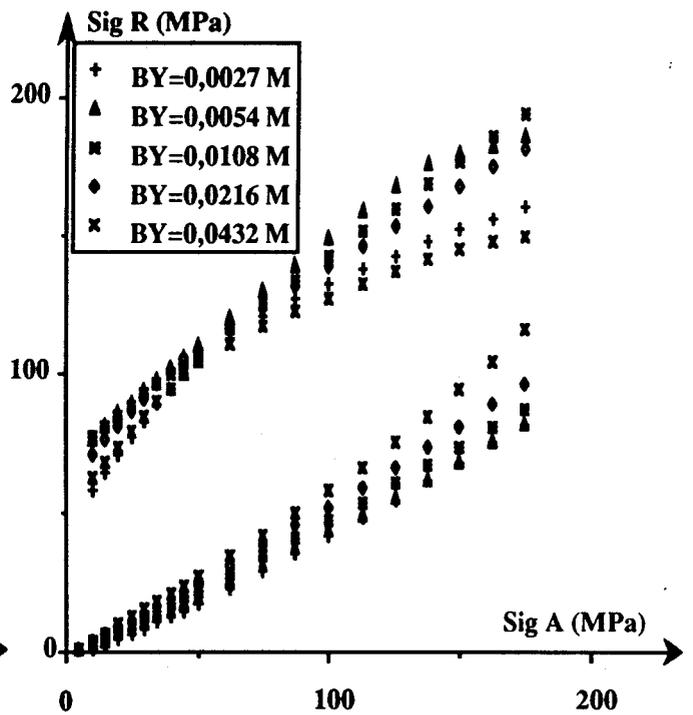


Figure 4.21.b : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}

en fonction de σ_A

IMAIL = 6 $R_e/R_i = 1.2$

$R_t = 9 \text{ MPa}$ $R_c = -157 \text{ MPa}$

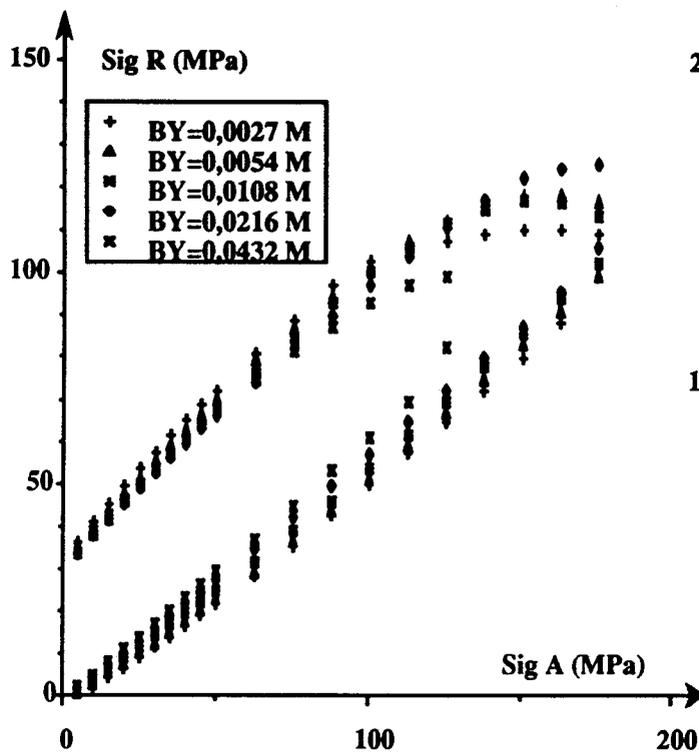


Figure 4.22.a : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 7 $R_e/R_i = 1.2$
 $R_t = 5,3$ MPa $R_c = -76,5$ MPa

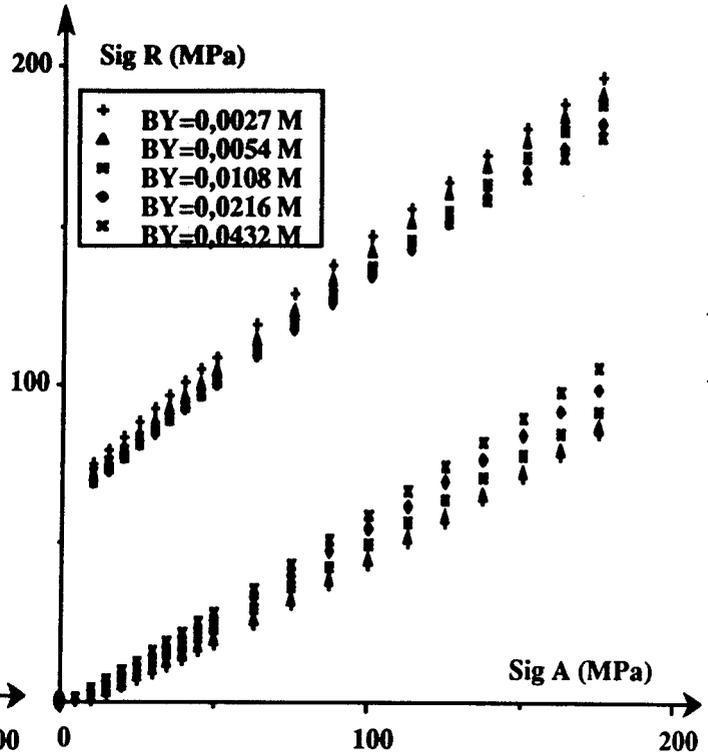


Figure 4.22.b : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 7 $R_e/R_i = 1.2$
 $R_t = 9$ MPa $R_c = -157$ MPa

On constate dans chaque cas que :

- σ_{R2} croît lorsque l'écartement du carottier BY augmente
- σ_{R1} varie en fonction de l'écartement du carottier, du type de la roche et de la profondeur.

Par exemple, pour un outil de forage de type IMAIL = 6, et pour un type de matériau ($R_t = 5,3$ MPa, $R_c = -76,5$ MPa) l'initialisation du discage est retardée (figure 4.21 a) :

- pour $\sigma_A = 50$ MPa lorsque BY est égal à 0,0054 m,
- pour $\sigma_A = 100$ MPa lorsque BY est égal à 0,0108 m,
- pour $\sigma_A = 175$ MPa lorsque BY est égal à 0,0216 m.

En prenant le même carottier, mais une roche de caractéristiques géomécaniques différentes (figure 4.21 b), l'amorce de rupture est retardée :

- pour $\sigma_A = 50$ MPa lorsque BY est égal à 0,0054 m,
- pour $\sigma_A = 100$ MPa lorsque BY est égal à 0,0054 m,
- pour $\sigma_A = 175$ MPa lorsque BY est égal à 0,0108 m.

En règle générale, pour un même type de roche, plus la contrainte axiale croît, plus l'écartement du carottier doit augmenter pour retarder l'apparition de la rupture (pour σ_{R1}). Il existe cependant quelques exceptions selon la nature de la roche et le type de carottier (figures 4.19 a, 4.22 b).

On remarque également que pour un même outil de forage et une contrainte axiale identique, l'élongement du carottier donnant σ_{R1} maximale diffère d'un matériau à l'autre. Si nous reprenons l'exemple précédent (figures 4.21 a, 4.21 b) pour $\sigma_A = 100$ MPa, σ_{R1} est maximum pour $R_c = -76,5$ MPa lorsque BY est égal à 0,108 m alors que pour $R_c = -157$ MPa, l'élongement doit être de 0,0054 m.

Ces fluctuations de la contrainte radiale d'initialisation de disage σ_{R1} en fonction du type de l'outil de forage, de la profondeur, des caractéristiques géomécaniques de la roche et de l'élongement du carottier rendent impossibles toutes formulations numériques (lois de variation) entre ces paramètres. On peut, uniquement, pour obtenir le maximum d'informations, représenter les variations de $\sigma_{R1} - \sigma_{R2}$ en fonction de 2 de ces quatre paramètres. Les figures 4.23 a,b,c sont des exemples des types de graphes ainsi obtenus.

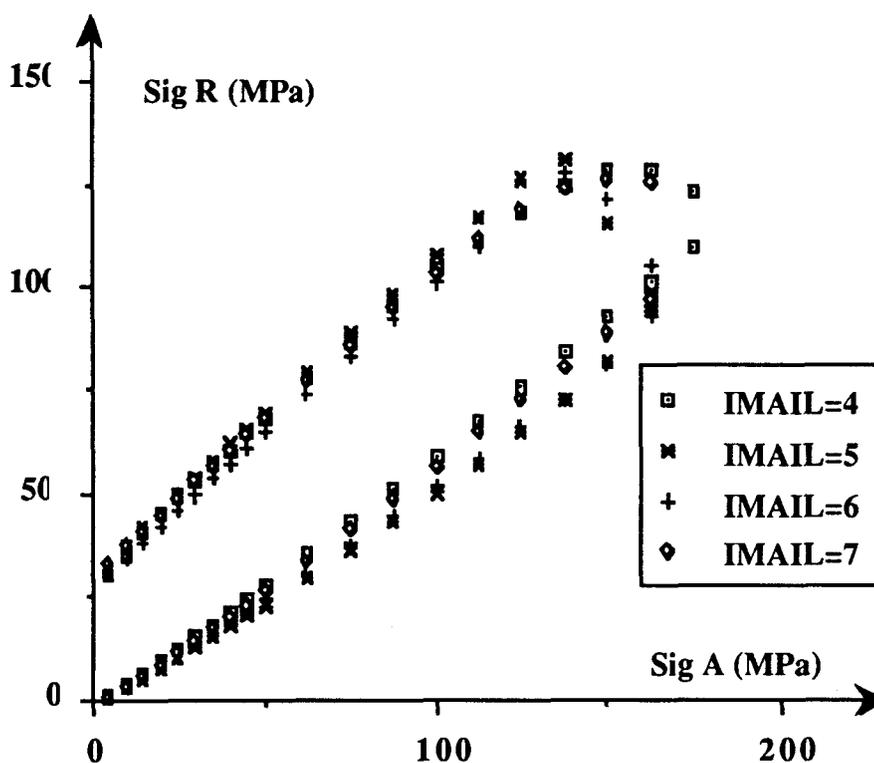


Figure 4.23.a : Variation de $\sigma_{R1} - \sigma_{R2}$ en fonction de σ_A
 $R_o/R_i = 1.5$ $BY = 0.027$ m $R_t = 5,3$ MPa $R_c = -76,5$ MPa

On note, pour ce type de roche, cet élongement et ce rapport de rayon de carottier que le maximum de sécurité est offert pour une contrainte axiale (σ_A) de 100 MPa par un outil de forage de type 5 ; alors que pour $\sigma_A = 160$ MPa, le carottier de type 4 doit être employé pour retarder l'initialisation de la rupture.

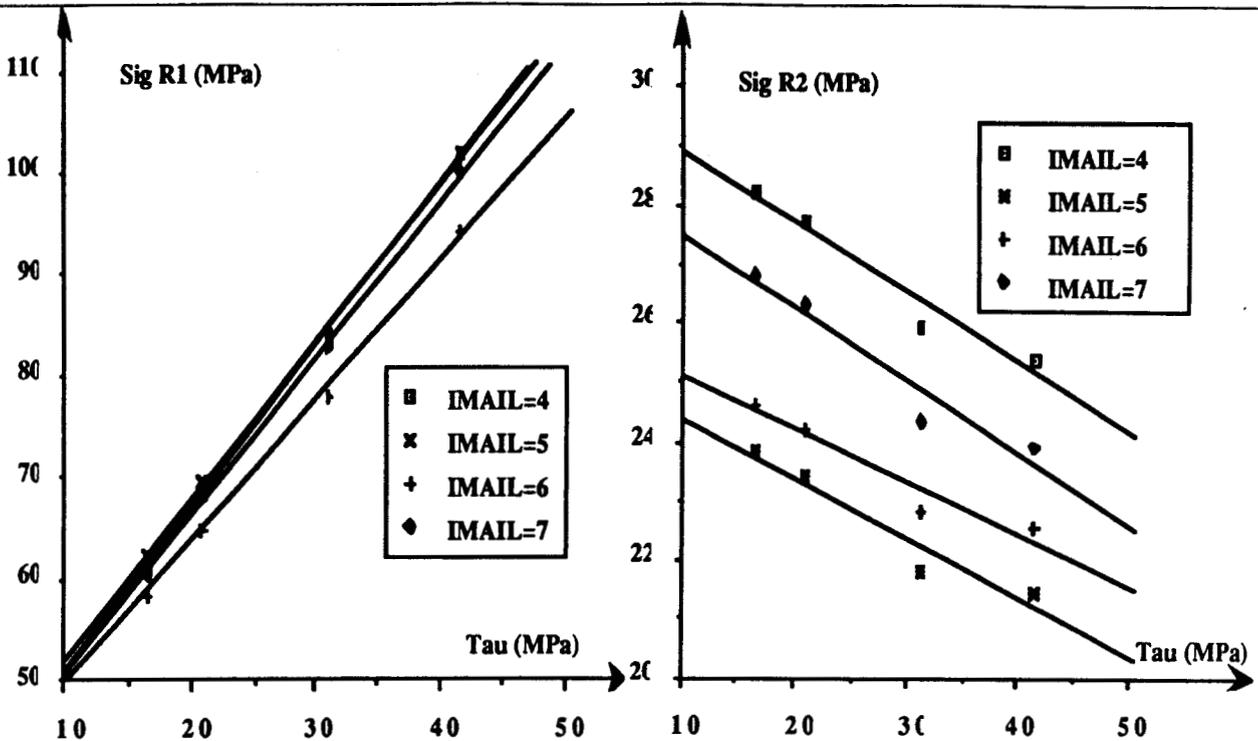


Figure 4.23 b : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_o et de IMAIL
 $R_e/R_i = 1.5$ $BY = 0.027$ m $\sigma_A = 50$ MPa

Figure 4.23 c : Variation de σ_{R2} en fonction de τ_o et de IMAIL
 $R_e/R_i = 1.5$ $BY = 0.027$ m $\sigma_A = 50$ MPa

Dans l'exemple représenté sur les figures 4.23 b et 4.23 c, on relève qu'à une contrainte axiale de 50 MPa, pour un élancement de 0,027 m du carottier, on peut retarder l'initialisation du discage pour n'importe quel type de matériau en employant un outil de forage de type 5. En effet, dans ce cas σ_{R1} est toujours maximum et σ_{R2} minimum ; le domaine de non discage est donc le plus important.

Si l'on connaît la profondeur du forage et les caractéristiques géomécaniques de la roche, on peut tracer les variations de $\sigma_{R1} - \sigma_{R2}$ en fonction de l'élancement et du type de carottier (figures 4.24 a,b).

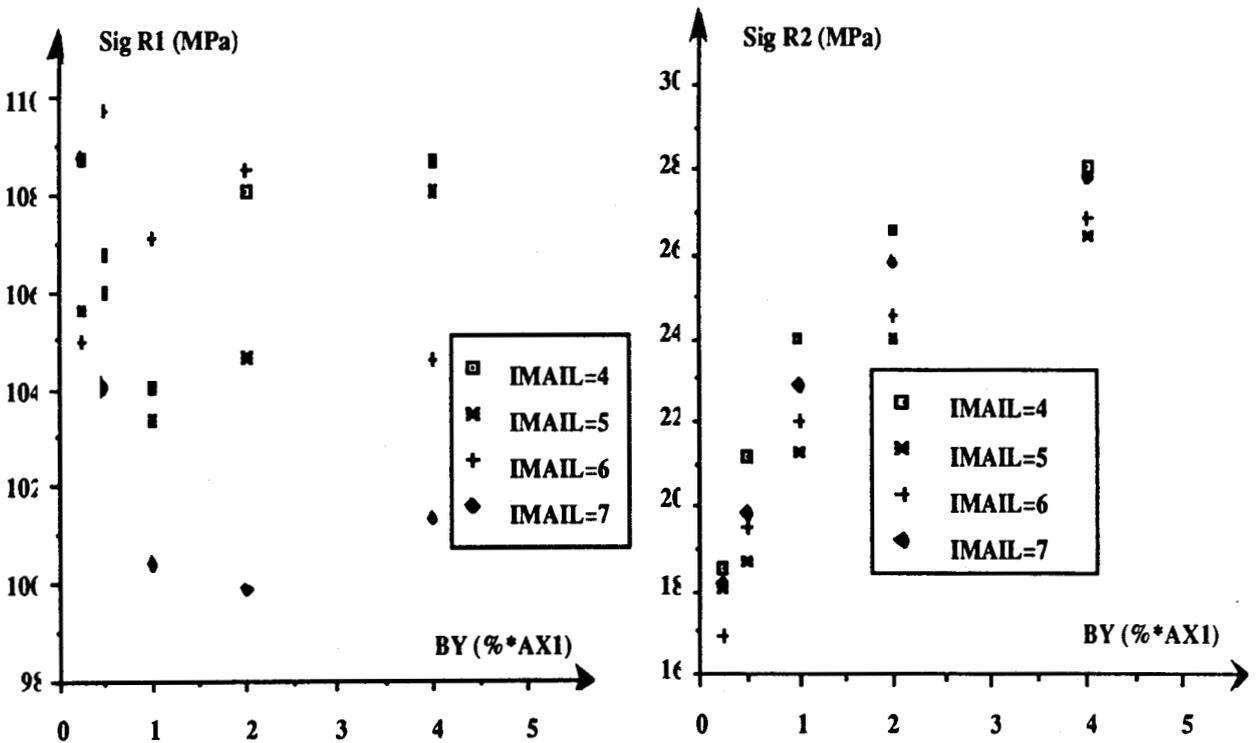


Figure 4.24 a : Variation de σ_{R1} en fonction de BY et de IMAIL
 $R_e/R_i = 1.2$; $\sigma_A = 50$ MPa; $R_t = 9$ MPa; $R_c = -157$ MPa

Figure 4.24 b : Variation de σ_{R2} en fonction de BY et de IMAIL
 $R_e/R_i = 1.2$; $\sigma_A = 50$ MPa; $R_t = 9$ MPa; $R_c = -157$ MPa

Le type d'outil correspondant à IMAIL = 6, ayant un élanement égal à la moitié de l'excentricité (AX1) semble être le plus apte à retarder la rupture pour cette configuration du domaine, cette profondeur, et ce type de roche.

Influence de BY pour des carottiers de rapport de rayons égal à 2.

Nous avons constaté que l'élanement du carottier n'influe pas sur σ_{R1} (ce qui était prévisible du fait de la position du point d'initialisation de disage correspondant). Par contre, σ_{R2} croît lorsque l'on augmente BY (figures 4.25 a,b et annexe B5 figures B19 a,b,c,d).

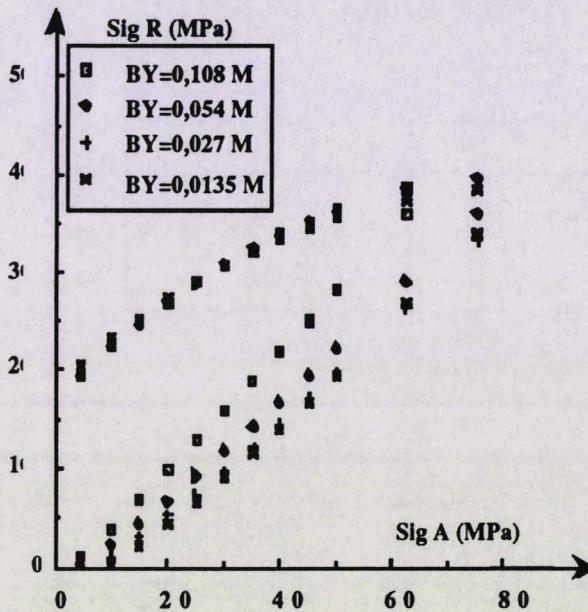


Figure 4.25.a : Variation de σ_{R1} σ_{R2}
en fonction de σ_A
IMAIL = 3 $R_e/R_i = 2$
 $R_t = 5,3$ MPa $R_c = -76,5$ MPa

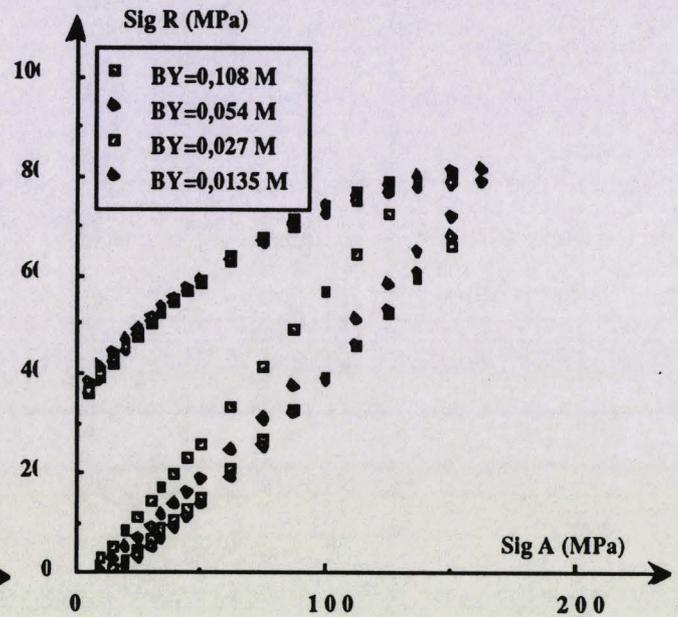


Figure 4.25.b : Variation de σ_{R1} σ_{R2}
en fonction de σ_A
IMAIL = 3 $R_e/R_i = 2$
 $R_t = 9$ MPa $R_c = -157$ MPa

Les fluctuations des contraintes radiales d'initialisation de disage sont beaucoup moins prononcées que pour des carottiers de rapport de rayon inférieur à 1.7.

Si l'on reporte les valeurs de σ_{R1} σ_{R2} précédentes en fonction de la profondeur et du type de l'outil de forage, on remarque que pour un élanement du carottier de 0.054 m et un type de roche ($R_t = 9$ MPa, $R_c = -157$ MPa), un outil de forage correspondant à IMAIL égal à 3 retarde l'amorce de rupture pour des contraintes axiales inférieures à 60 MPa. Pour σ_A supérieure à 60 MPa, le type d'outil IMAIL = 5 devra être utilisé (figure 4.26 a).

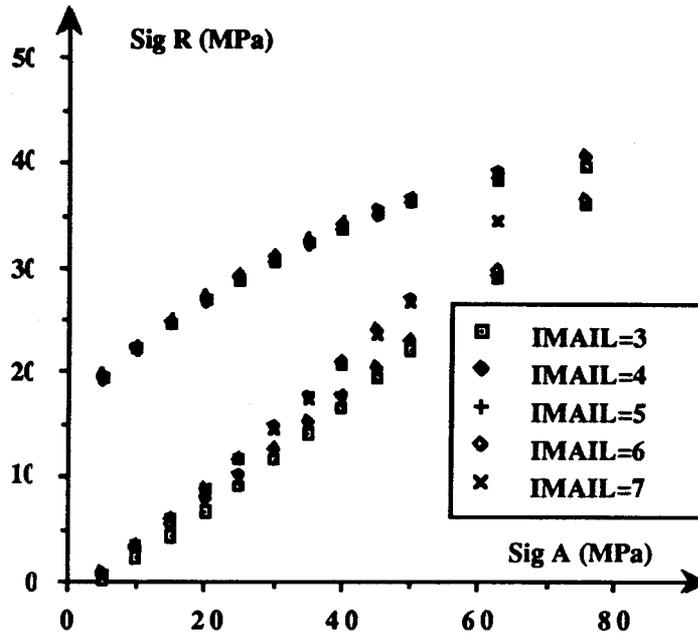


Figure 4.26.a : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de σ_A
 $R_e/R_i = 2$ $R_t = 9$ MPa $R_c = -157$ MPa $BY = 0,054$ m

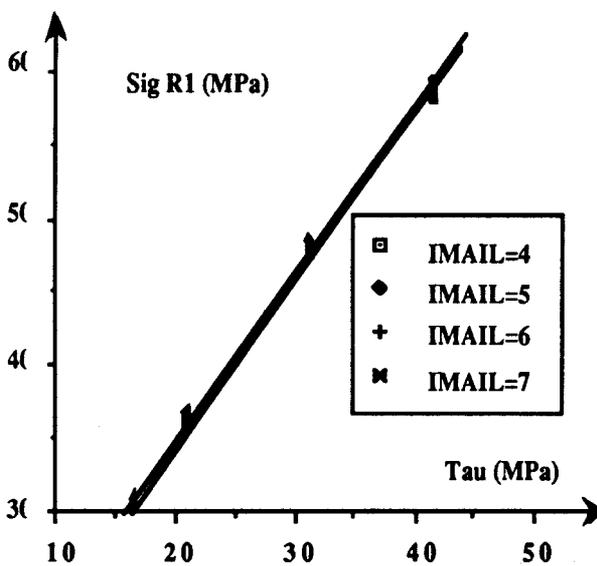


Figure 4.26.b : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0
 $R_e/R_i = 2$ $BY = 0.054$ m $\sigma_A = 50$ MPa

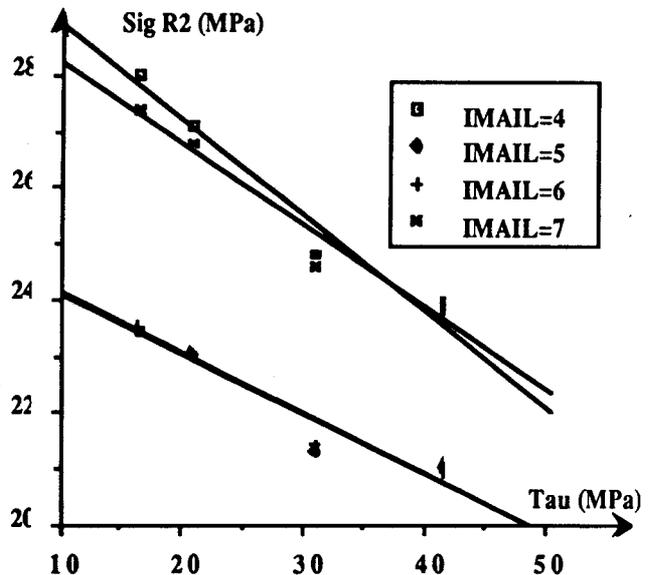


Figure 4.26.c : Variation de σ_{R2} en fonction de τ_0
 $R_e/R_i = 2$ $BY = 0.054$ m $\sigma_A = 50$ MPa

On peut constater que la forme de l'outil de forage n'influe ni sur l'ordonnée à l'origine, ni sur les pentes des droites $\sigma_{R1} = f(\tau_0)$.

σ_{R2} varie en fonction de ces 2 paramètres : pour $\tau_0 = 30$ MPa, un carottier de type 4 favorise la rupture alors que pour $\tau_0 = 40$ MPa, la forme de l'outil qui déclenchera le plus facilement le dischage est de type 7. La non influence de l'élançement et du type de carottier sur la contrainte radiale d'initialisation de dischage σ_{R1} est visible lorsque l'on utilise des graphes du type de la figure 4.27 a.

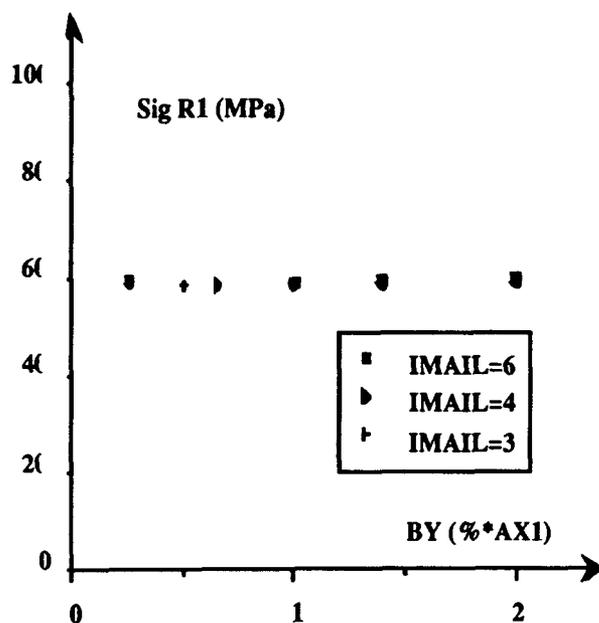


Figure 4.27.a : Variation de σ_{R1} en fonction de BY et de IMAIL
 $R_e/R_i = 2; R_t = 9$ MPa; $R_c = -157$ MPa; $\sigma_A = 50$ MPa

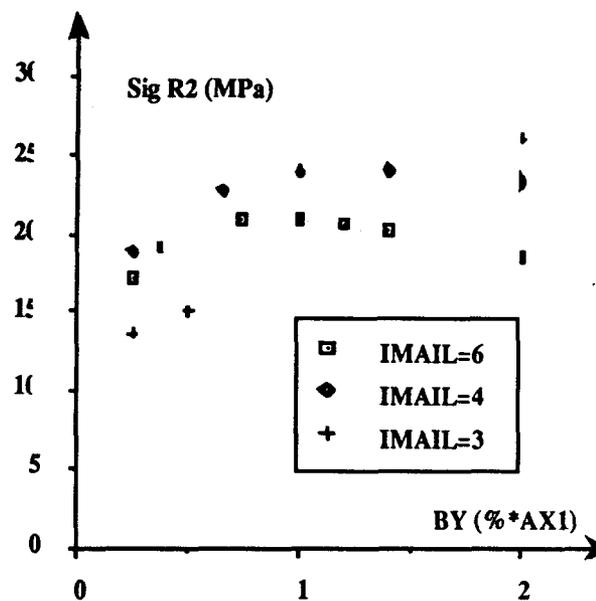


Figure 4.27.b : Variation de σ_{R2} en fonction de BY et de IMAIL
 $R_e/R_i = 2; R_t = 9$ MPa; $R_c = -157$ MPa; $\sigma_A = 50$ MPa

En superposant les figures 4.27 a,b, on peut noter qu'à une profondeur correspondant à une contrainte axiale de 50 MPa, et pour une roche de résistance à la traction de 9 MPa et à la compression de - 157 MPa, le carottier de type 3, d'élançement inférieur à la moitié de l'excentricité (soit inférieure à 0.027 m) retarde davantage l'initialisation de la rupture.

Nous avons donc montré dans cette partie qu'il y a influence du type et de l'élançement du carottier sur les contraintes radiales d'initialisation de dischage.

Lorsque le rapport rayon extérieur sur rayon intérieur du carottier est inférieur à 1,7 :

- σ_{R2} augmente lorsque l'élançement de l'outil croît,
- σ_{R1} varie selon la profondeur, la nature de la roche, le type et l'élançement du carottier.

Lorsque le rapport R_e/R_i est de l'ordre de 2 :

- σ_{R1} est constante pour tous les types et élançements des outils de forage,
- σ_{R2} varie en fonction de la profondeur, de la nature de la roche, du type et de l'élançement du carottier.

On voit donc que là encore il y a interaction des paramètres entre eux pour influencer sur les contraintes radiales d'initialisation du dischage, ceci rendant complexe toute écriture de lois de variation numérique.

Les positions des points d'initialisation du discage ne sont pas affectées par ces variations. Ils se situent toujours dans les zones citées aux chapitres 4.3 et 4.4, selon le rapport des rayons du carottier et l'épaisseur des disques. Ceci rejoint les conclusions de Dyke [11] qui trouve que pour un rapport de rayon constant, la forme des disques ne dépend pas de la géométrie du carottier. Nous reprendrons ce dernier point plus en détail en fin du chapitre.

4.5.2 Influence de l'excentricité (AX1) du carottier

Nous ne présenterons ici que les résultats obtenus à élanement BY constant (BY est égal à la moitié du rapport des rayons de l'outil de forage).

Rapport de rayon du carottier inférieur à 1.7.

Les figures 4.28 a,b et 4.29 a,b représentent des exemples des variations des contraintes radiales d'initialisation du discage en fonction de l'excentricité AX1 pour deux types d'outil et deux roches différentes.

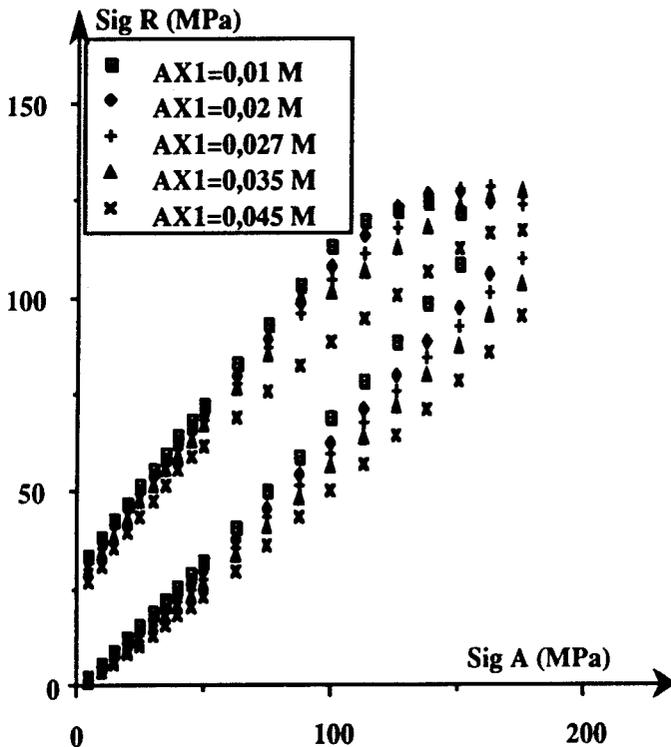


Figure 4.28.a : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 4 $R_e/R_i = 1.5$
 $R_t = 5,3 \text{ MPa}$ $R_c = -76,5 \text{ MPa}$

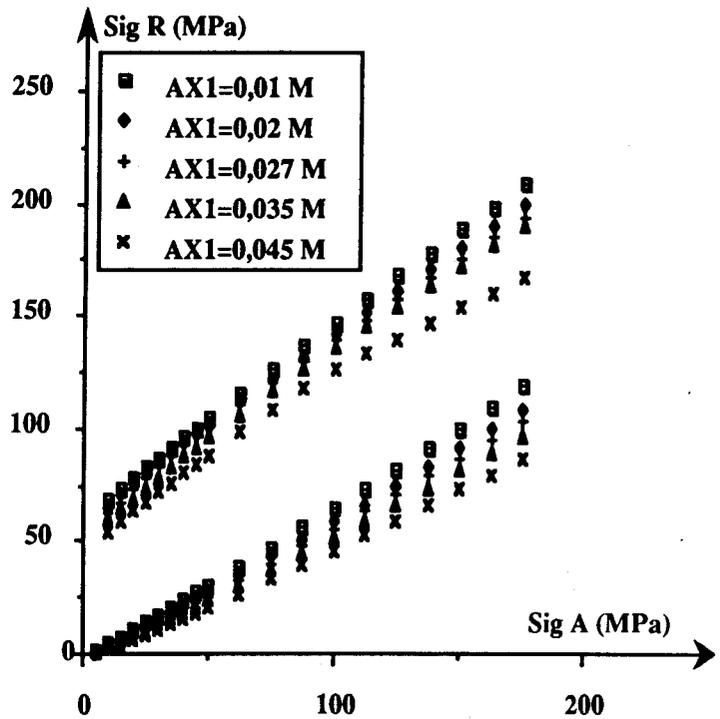


Figure 4.28.b : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 4 $R_e/R_i = 1.5$
 $R_t = 9 \text{ MPa}$ $R_c = -157 \text{ MPa}$

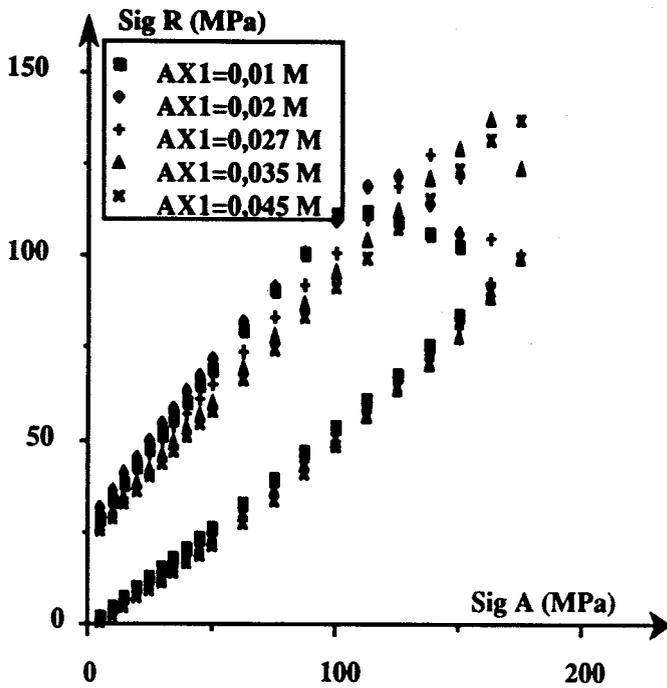


Figure 4.29.a : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 6 $R_e/R_i = 1.5$
 $R_t = 5,3 \text{ MPa}$ $R_c = -76,5 \text{ MPa}$

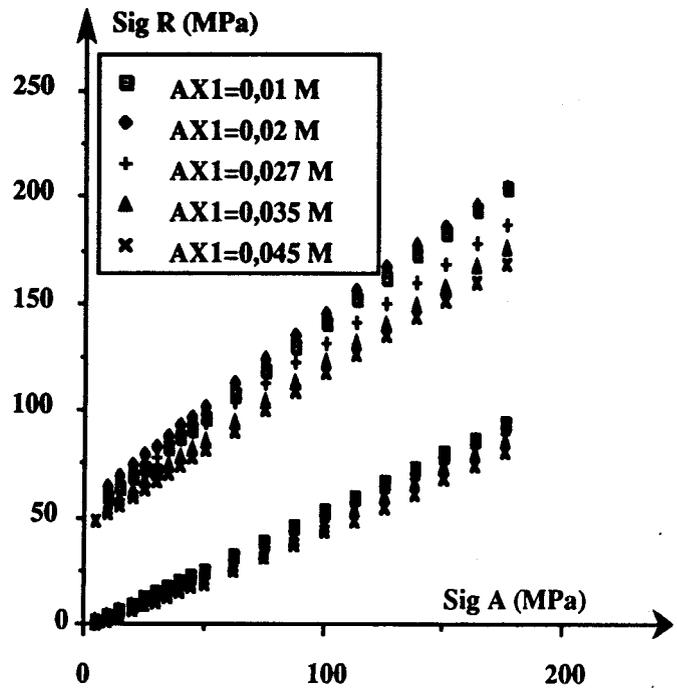


Figure 4.29.b : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 6 $R_e/R_i = 1.5$
 $R_t = 9 \text{ MPa}$ $R_c = -157 \text{ MPa}$

Plus l'excentricité AX1 augmente, plus σ_{R2} diminue pour toutes nos simulations. Les variations de σ_{R1} en fonction de AX1 sont beaucoup plus complexes. Elles dépendent :

- De la profondeur.

Si nous prenons la figure 4.28 a, pour une contrainte axiale de 100 MPa, σ_{R1} sera maximum pour une excentricité AX1 = 0,01 mètre ; pour $\sigma_A = 150 \text{ MPa}$, l'excentricité du carottier devra être de 0,027 mètre, et pour $\sigma_A = 175 \text{ MPa}$, AX1 devra être égale à 0,035 pour obtenir σ_{R1} maximum.

- De la nature de la roche.

Si le matériau est de forte résistance (figure 4.28 b), on note que, quelque soit la profondeur, la contrainte radiale d'initialisation de discage σ_{R1} maximum correspond à la même excentricité du carottier (AX1 = 0,01 mètre). Par contre, pour le même type d'outil de forage, si la roche est moins résistante (figure 4.28 a), σ_{R1} est maximum pour des excentricités de carottier AX1 différentes selon la profondeur.

- Du type de l'engin de forage.

En comparant les figures 4.28 a et 4.28 b respectivement aux figures 4.29 a et 4.29 b, on peut constater que l'excentricité donnant la contrainte radiale σ_{R1} maximum, pour la même roche et à contrainte axiale constante, varie d'un carottier à l'autre.

Comme pour l'étude de l'élanement, on doit dissocier les paramètres pour obtenir des représentations lisibles, ainsi que le montrent les figures suivantes. Ces dernières résument les variations de σ_{R1} et de σ_{R2} en fonction des quatre paramètres cités ci-dessus. Par exemple, si l'on désire travailler avec un carottier de type 6, pour une contrainte axiale connue (50 MPa, 100 MPa, 150 MPa), on peut déterminer l'excentricité AX1 optimum de l'outil selon la nature de la roche à partir des graphes tels que ceux donnés par les figures 4.30 a,b et annexe B5 figures B20 a,b,c,d).

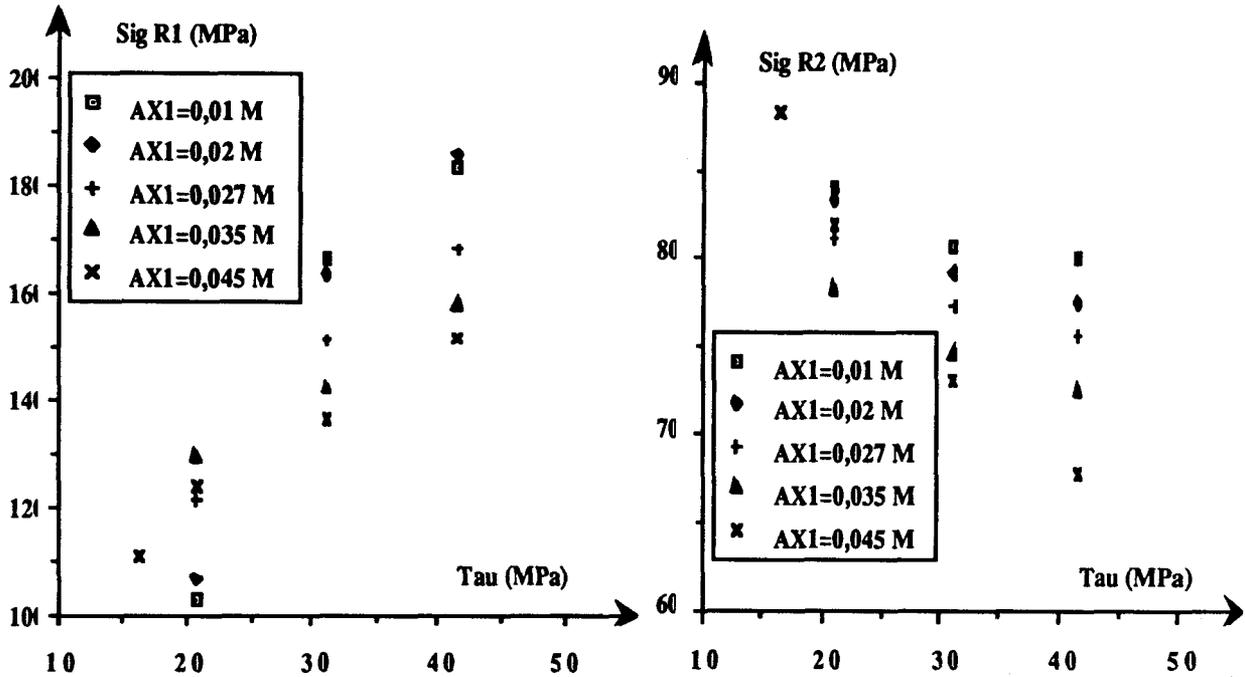


Figure 4.30.a : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_o
 IMAIL = 6 $\sigma_A = 150$ MPa
 $R_e/R_i = 1.5$

Figure 4.30.b : Variation de σ_{R2} en fonction de τ_o
 IMAIL = 6 $\sigma_A = 150$ MPa
 $R_e/R_i = 1.5$

Si l'on travaille à contrainte axiale fixée et pour une roche de caractéristique géomécanique connue, on peut déterminer, à partir de graphes semblables à ceux représentés sur les figures 4.31 a,b, 4.32 a,b, le type et l'élanement de l'outil de forage donnant le maximum de sécurité vis-à-vis du discage (annexe B5 figures B21 a,b,c,d et B22 a,b,c,d).

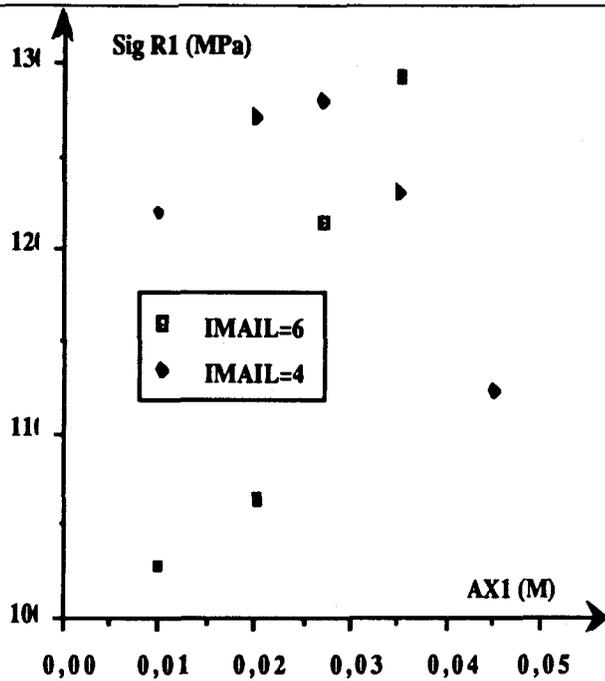


Figure 4.31.a : Variation de σ_{R1} en fonction de AX1
 $R_e/R_i = 1.5, \sigma_A = 150$ MPa,
 $R_t = 5,3$ MPa, $R_c = -76,5$ MPa

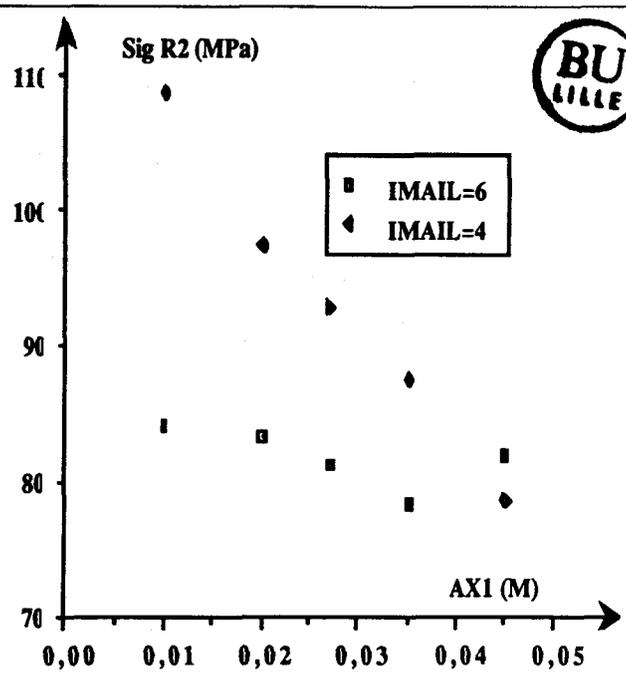


Figure 4.31.b : Variation de σ_{R2} en fonction de AX1
 $R_e/R_i = 1.5, \sigma_A = 150$ MPa,
 $R_t = 5,3$ MPa, $R_c = -76,5$ MPa

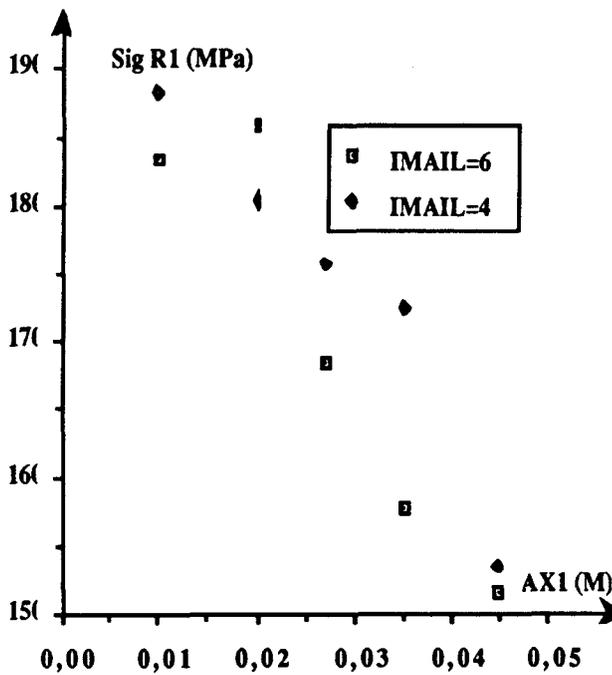


Figure 4.32.a : Variation de σ_{R1} en fonction de AX1
 $R_e/R_i = 1.5, \sigma_A = 150$ MPa
 $R_t = 9$ MPa, $R_c = -157$ MPa

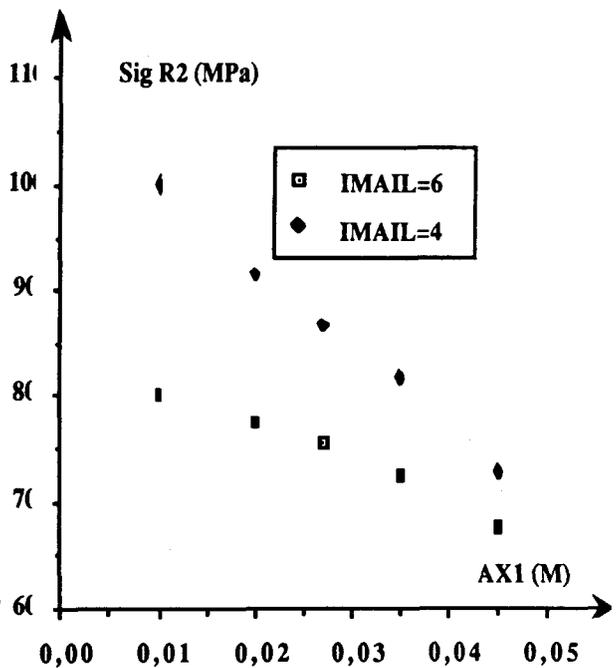


Figure 4.32.b : Variation de σ_{R2} en fonction de AX1
 $R_e/R_i = 1.5, \sigma_A = 150$ MPa
 $R_t = 9$ MPa, $R_c = -157$ MPa

Rapport de rayon du carottier égal à 2

Nous n'avons remarqué aucune influence de l'excentricité AX1 sur la contrainte radiale d'initialisation de discage σ_{R1} (et ce pour tous types de saignées, de roches, et à n'importe quelle profondeur) (figures 4.33 a,b, 4.34 a,b). En règle générale, σ_{R2} croît lorsque l'excentricité du carottier diminue.

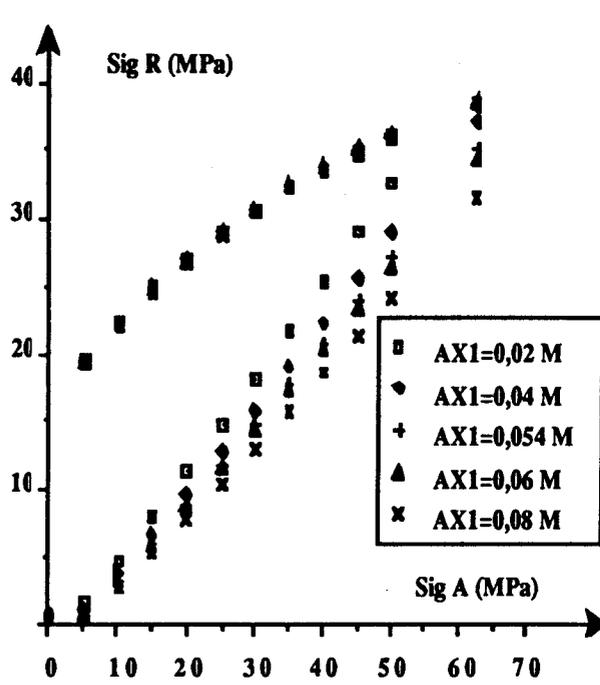


Figure 4.33.a : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 4 $R_e/R_i = 2$
 $R_t = 5,3 \text{ MPa}$ $R_c = -76,5 \text{ MPa}$

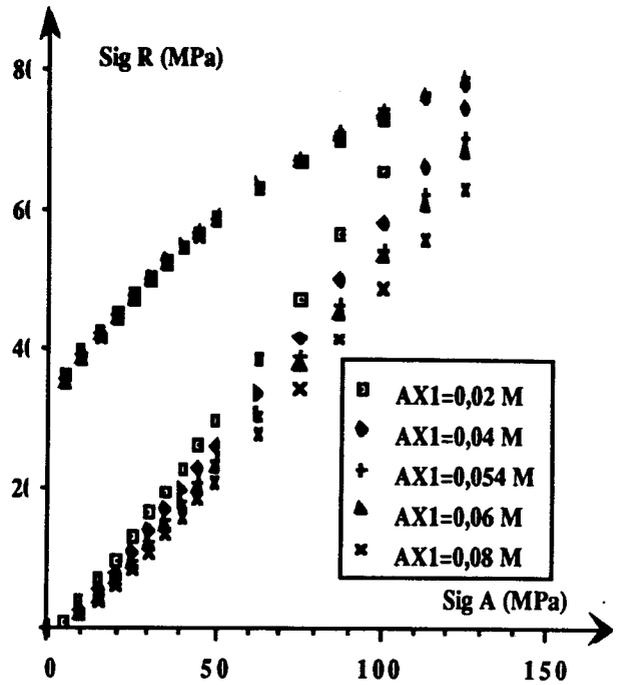


Figure 4.33.b : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 4 $R_e/R_i = 2$
 $R_t = 9 \text{ MPa}$ $R_c = -157 \text{ MPa}$

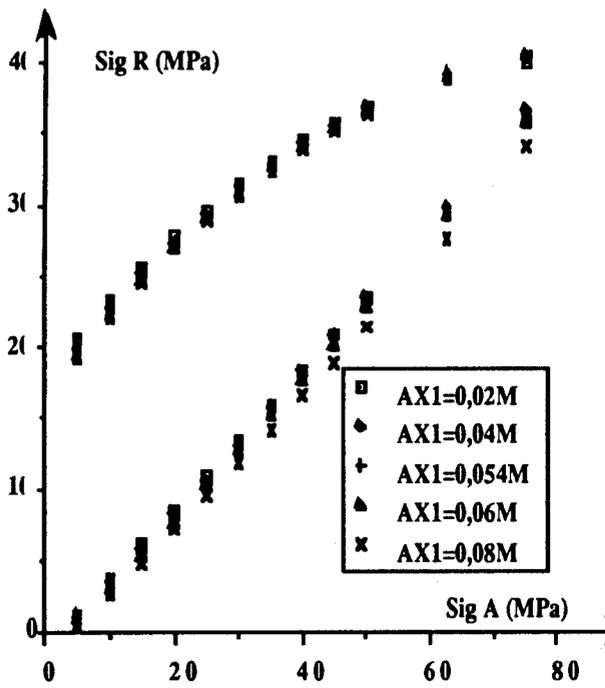


Figure 4.34.a : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 6 $R_e/R_i = 2$
 $R_t = 5,3 \text{ MPa}$ $R_c = -76,5 \text{ MPa}$

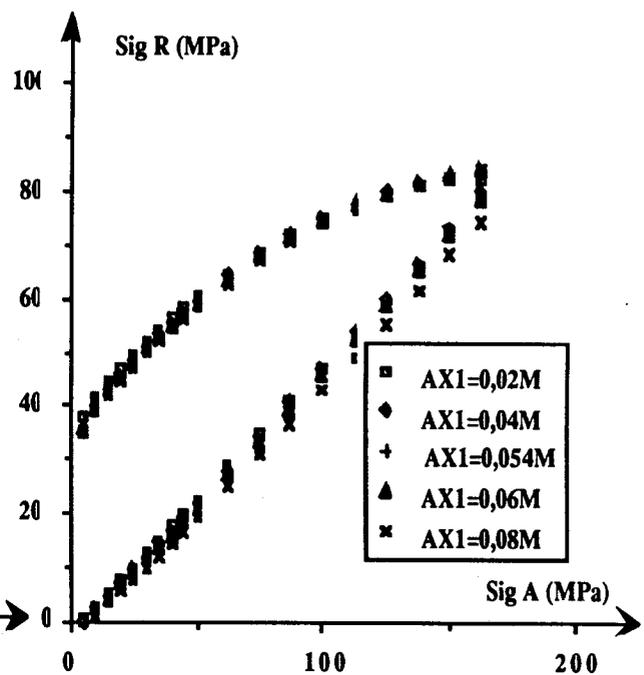


Figure 4.34.b : Variation de σ_{R1} et σ_{R2}
 en fonction de σ_A
 IMAIL = 6 $R_e/R_i = 2$
 $R_t = 9 \text{ MPa}$ $R_c = -157 \text{ MPa}$

Il existe cependant quelques fluctuations au niveau du sens de la variation de σ_{R2} selon la nature de la roche et la profondeur du forage. Ces résultats sont exploitables par l'intermédiaire de graphes donnant les variations de σ_{R1} σ_{R2} en fonction :

- de l'excentricité du carottier et de la résistance au cisaillement de la roche. Par exemple, en superposant les figures 4.35 a et 4.35 b), on distingue nettement que si l'on fore à une profondeur correspondant à une contrainte axiale de 50 MPa avec un carottier de type IMAIL = 6, le maximum de sécurité est atteint pour n'importe quelle roche lorsque l'excentricité de l'outil de forage est de 0.08 m.

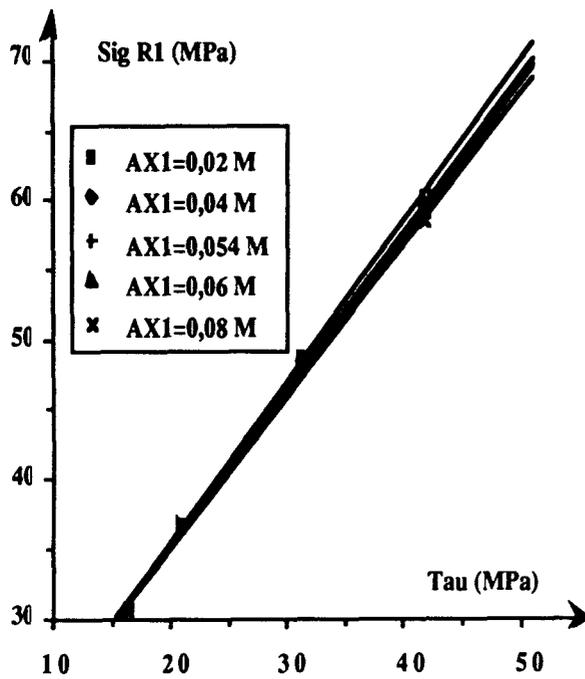


Figure 4.35.a : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0
 IMAIL = 6 , $\sigma_A = 50$ MPa , $R_e/R_i = 2$

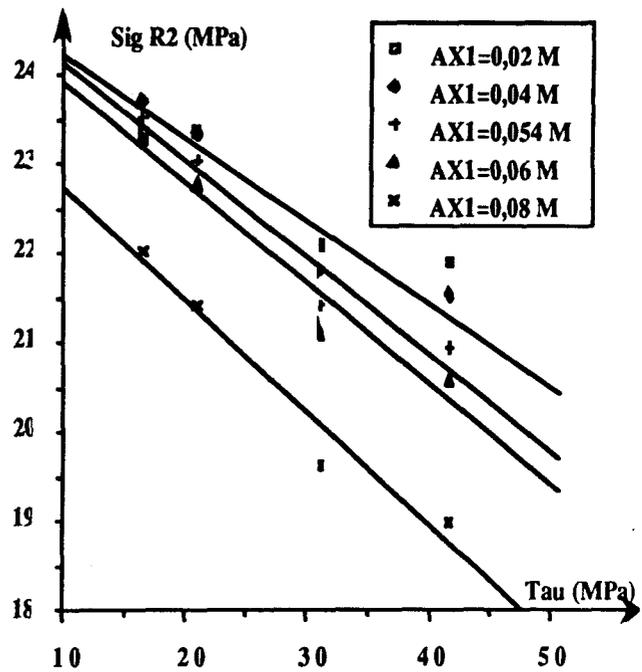


Figure 4.35.b : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0
 IMAIL = 6 , $\sigma_A = 50$ MPa , $R_e/R_i = 2$

- de l'excentricité et du type de carottier. Sur les figures 4.36 a,b et 4.37 a,b, on voit par exemple que pour une contrainte axiale de 50 MPa, et pour deux roches différentes, un carottier de type IMAIL = 6, d'excentricité 0.08 m, retarde l'initialisation du discage, alors qu'un carottier de type IMAIL = 4, d'excentricité 0,02 m, le favorise.

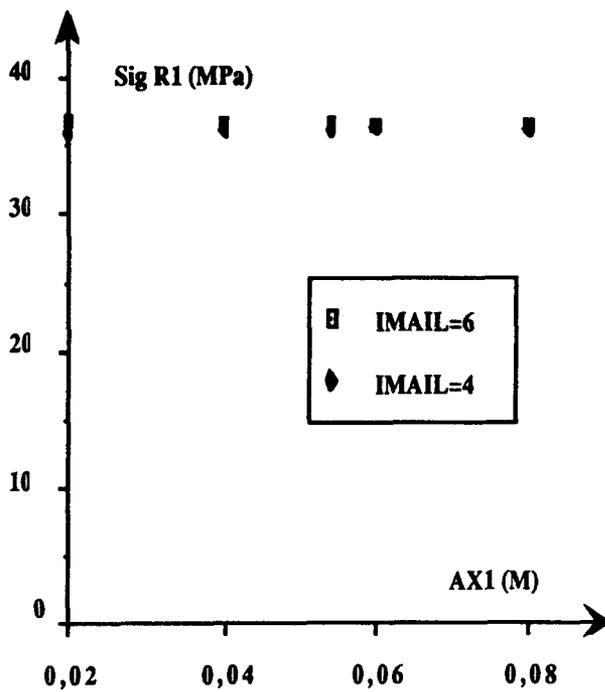


Figure 4.36.a : Variation de σ_{R1} en fonction de AX1
 $R_e/R_i = 2, \sigma_A = 50 \text{ MPa}, R_t = 5,3 \text{ MPa}, R_c = -76,5 \text{ MPa}$

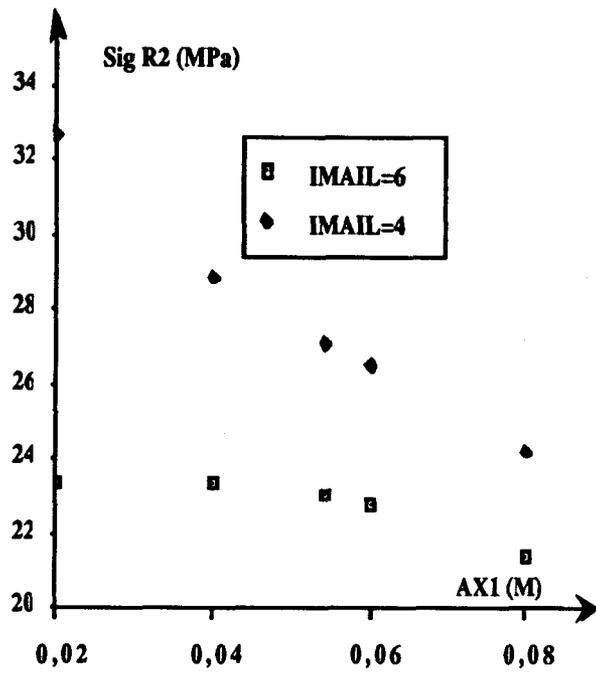


Figure 4.36.b : Variation de σ_{R2} en fonction de AX1
 $R_e/R_i = 2, \sigma_A = 50 \text{ MPa}, R_t = 5,3 \text{ MPa}, R_c = -76,5 \text{ MPa}$

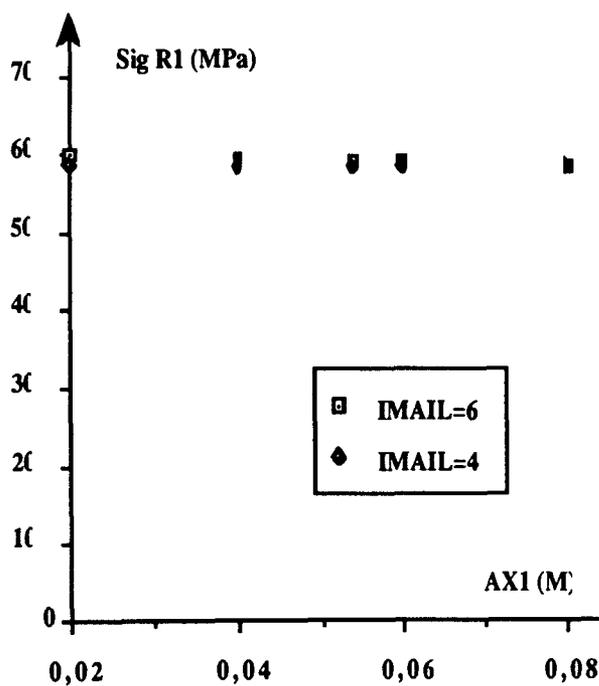


Figure 4.37.a : Variation de σ_{R1} en fonction de AX1
 $R_e/R_i = 2, \sigma_A = 50 \text{ MPa}, R_t = 9 \text{ MPa}, R_c = -157 \text{ MPa}$

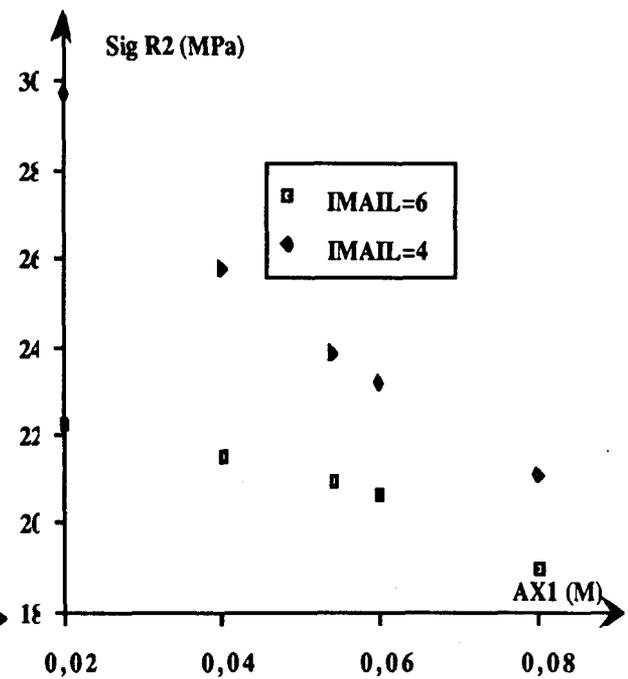


Figure 4.37.b : Variation de σ_{R2} en fonction de AX1
 $R_e/R_i = 2, \sigma_A = 50 \text{ MPa}, R_t = 9 \text{ MPa}, R_c = -157 \text{ MPa}$

Dans cette étude de l'influence de l'excentricité du carottier sur les contraintes radiales d'initialisation de discage, nous avons mis en évidence que l'augmentation de $AX1$:

- entraîne, en règle générale, une diminution de σ_{R2} pour tous les types et rapports de rayon de l'outil de forage. Selon la profondeur et la nature de la roche ; quelques exceptions à cette règle ont été observées,
- n'influe pas sur σ_{R1} pour toutes les simulations effectuées avec des rapports de rayon du carottier égaux à 2,
- perturbe σ_{R1} lorsque l'on utilise un carottier de rapport de rayon inférieur à 1.7. Aucune formulation générale du sens de variation de σ_{R1} n'est possible du fait de l'interaction des paramètres : profondeur, type de l'outil, caractéristiques géomécaniques de la roche.

4.6 INFLUENCE DU POIDS SUR L'OUTIL

L'augmentation du poids sur l'outil n'agit pas sur les contraintes radiales d'initialisation du discage à grande profondeur. A titre d'indication, nous avons représenté les variations de σ_{R1} et de σ_{R2} en fonction du poids sur l'outil (PO) et de la profondeur, pour un des exemples traités, sur les figures 4.38 a,b.

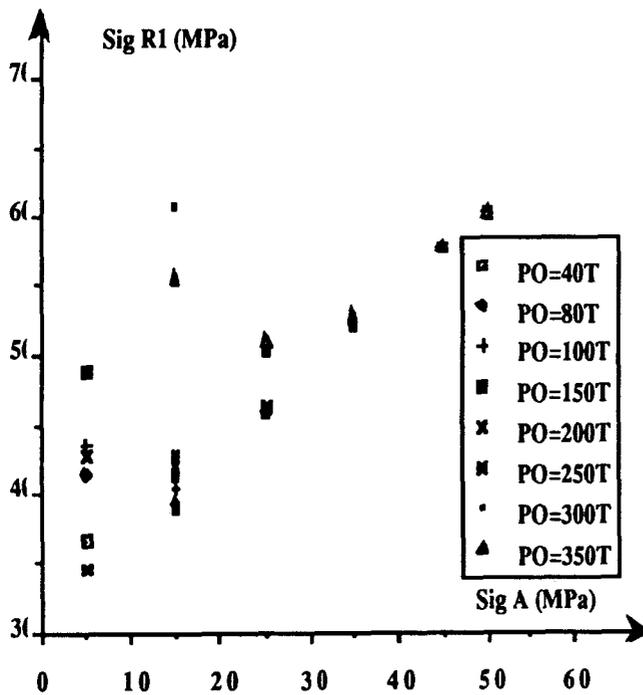


Figure 4.38.a : Variation de σ_{R1} en fonction de σ_A
 $IMAIL = 2$, $R_e/R_i = 1,5$, densité de boue 1,1
 $R_t = 5,3 \text{ MPa}$ $R_c = -76,5 \text{ MPa}$

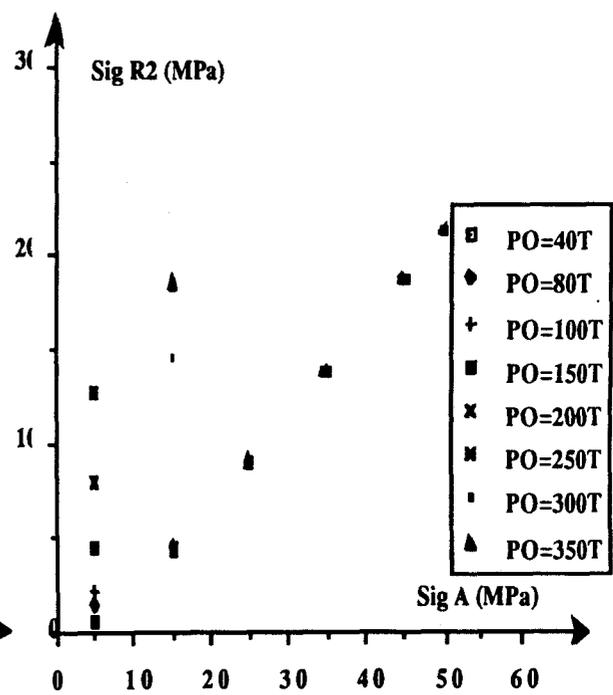


Figure 4.38.b : Variation de σ_{R2} en fonction de σ_A
 $IMAIL = 2$, $R_e/R_i = 1,5$, densité de boue 1,1
 $R_t = 5,3 \text{ MPa}$ $R_c = -76,5 \text{ MPa}$

A partir d'une contrainte axiale de 30 MPa (correspondant à une profondeur inférieure à 2 000 mètres), σ_{R1} et de σ_{R2} sont constantes quelque soit le poids sur l'outil. Nous avons remarqué qu'à faible profondeur :

- l'augmentation du poids sur l'outil joue le même rôle sur les contraintes σ_{R1} et σ_{R2} que l'augmentation de la densité de boue,
- que, plus la densité de boue et la résistance de la roche sont faibles, plus l'accroissement du poids de l'outil de forage augmente les contraintes σ_{R1} et σ_{R2} .

4.7 FORME DES DISQUES

Nous supposons ici, qu'il y a propagation de la fissure à partir des points d'initialisation du discage, selon les directions des contraintes principales minimum pour former un disque complet.

Les paramètres étudiés dans les chapitres précédents sont regroupés selon l'influence qu'ils exercent sur la position du point d'initialisation du discage et sur les directions des contraintes principales.

4.7.1 Influence du rapport des rayons du carottier et de l'épaisseur des disques

Comme nous l'avons souligné aux chapitres 4.3 et 4.4, il peut y avoir interaction entre ces deux paramètres pour changer totalement la position du point d'initialisation du discage.

Pour chaque type de carottier de rapport de rayon 2 :

- le point d'initialisation de discage correspondant à σ_{R1} se situe juste sous l'axe de l'outil de forage (figure 4.39 a, figure 4.40 a) pour des faibles épaisseurs de disque, et se déplace vers la saignée du côté interne lorsque l'épaisseur des disques augmente (figure 4.39 b et figure 4.40 b). Le mode de rupture est en cisaillement ;
- le point d'initialisation de discage correspondant à σ_{R2} se situe sous la saignée du carottier. Le mode de rupture est en traction. La valeur de σ_{R2} et de l'orientation des contraintes principales n'est pas affectée par la variation de l'épaisseur des disques ; la position du point d'initialisation du discage ne change pratiquement pas (figure 4.41 a,b).

Pour chaque type de carottier de rayon inférieur à 1.7 :

- le point d'initialisation du discage correspondant à σ_{R1} se situe sous la saignée du côté externe, et n'est pas affecté par le changement d'épaisseur des disques (figure 4.42 a,b et annexe C figures C1 a,b). Le mode de rupture est en cisaillement ;
- le point d'initialisation de discage correspondant à σ_{R2} se situe sous la saignée du côté interne, et sa position ne varie pas également lorsque l'épaisseur des disques change (figure 4.43 a,b et annexe C figures C2 a,b). Le mode de rupture est en traction.

Les figures représentées, à titre d'exemple, montrent bien que le point d'initialisation peut se situer à différents endroits (si l'on considère σ_{R1}) selon le rapport des rayons du carottier. La fissure qui s'initialise sous l'axe de l'outil de forage a tendance à se propager vers le fond de la saignée, tandis que celle qui débute sous la saignée se propage vers l'axe du carottier, et vers le bas si elle correspond à σ_{R1} ou vers le haut si elle correspond à σ_{R2} .

4.7.2 Influence de la profondeur, de la nature de la roche et de la pression de boue

Ces trois paramètres influent sur la courbure des disques et sur le déplacement relatif des points d'initialisation du discage qui, bien que se situant dans la même zone, évoluent suivant les valeurs de ce jeu de paramètres :

- *lorsque le rapport des rayons du carottier est inférieur à 1.7*
 - l'augmentation de la contrainte axiale ou la diminution de la résistance de la roche ou de la densité de boue fait se déplacer le point d'initialisation du discage de sous la saignée côté externe au coin externe de l'outil de forage pour σ_{R1} (figure 4.44 a,b), et de sous la saignée côté interne au coin interne du carottier pour σ_{R2} (figure 4.45 a,b),
 - l'accroissement de la contrainte axiale ou de la densité de boue ou de la résistance de la roche fait croître l'angle existant entre les directions des contraintes principales correspondant à σ_{R1} (annexe C3 a,b) et à σ_{R2} (annexe C4 a,b).

- *lorsque le rapport des rayons du carottier est égal à 2.*
 - les mêmes observations ont été faites.

Pour le point d'initialisation de discage correspondant à σ_{R1} , donc sous l'axe de l'outil de forage, aucun changement de position n'a pu être détecté en fonction de l'augmentation de la contrainte axiale, de la densité de boue ou de la résistance de la roche. Toutefois, à partir d'une certaine valeur d'un de ses paramètres (dépendant également du type de l'outil, de la forme de la saignée), ce point migre brutalement vers le coin externe de la saignée.

Nous pouvons donc dire que l'accroissement de la profondeur (ou de la contrainte axiale), de la densité de la boue, de la résistance de la roche augmente la courbure des disques. Ceci rejoint les observations de Hoeck et Brown [19] quant à l'influence de la profondeur sur la courbure des disques.

Nous avons également constaté qu'à partir d'une certaine valeur de la contrainte axiale (variant selon la densité de la boue, la résistance de la roche et le type de l'outil de forage) que le point d'initialisation de discage correspondant à σ_{R1} se situe vers le coin externe de la saignée. Les directions des contraintes principales indiquent un sens probable de la propagation de la fissure, non plus vers le bas (ce qui pourrait donner un disque), mais vers le haut. Les trois contraintes principales sont en forte compression. On rejoindrait à cet instant le phénomène de "dog hear".

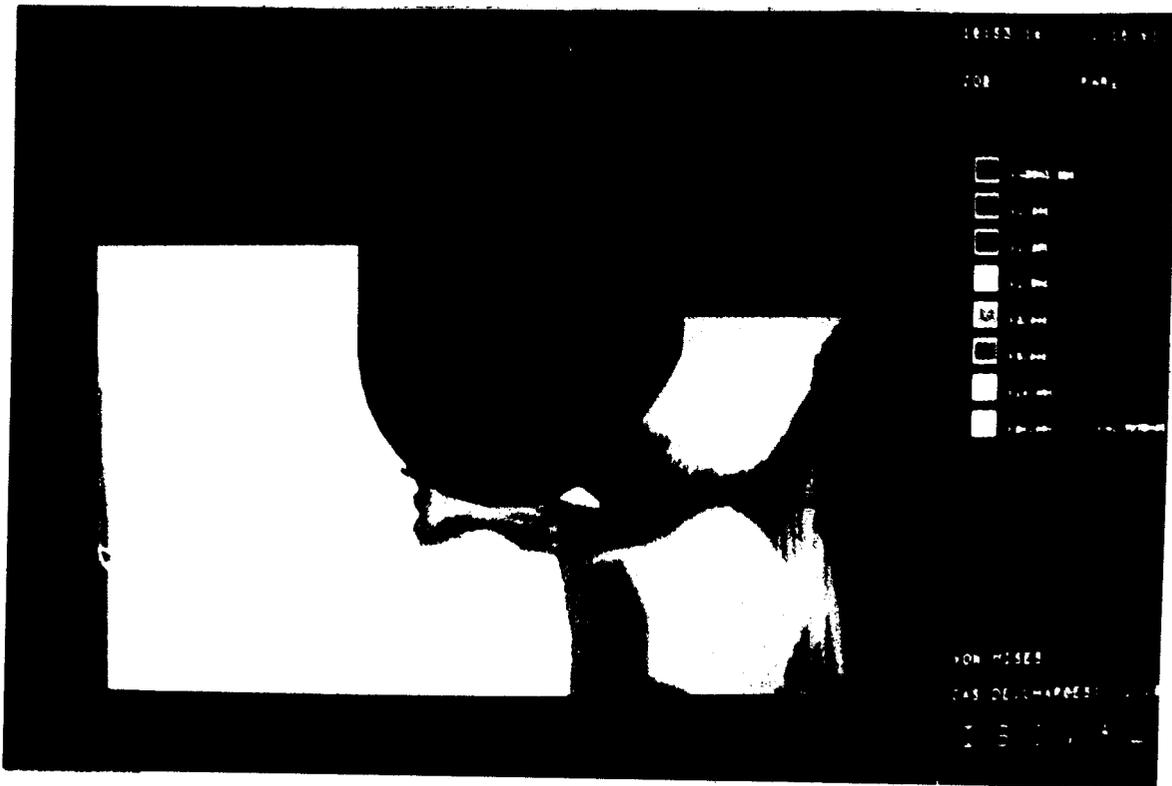


Figure 39.a : Courbes isocritères correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 2$ ep. = 4 cm



Figure 39.b : Courbes isocritères correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 2$ ep. = 10 cm



Figure 40.a : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 2$ ep. = 4 cm

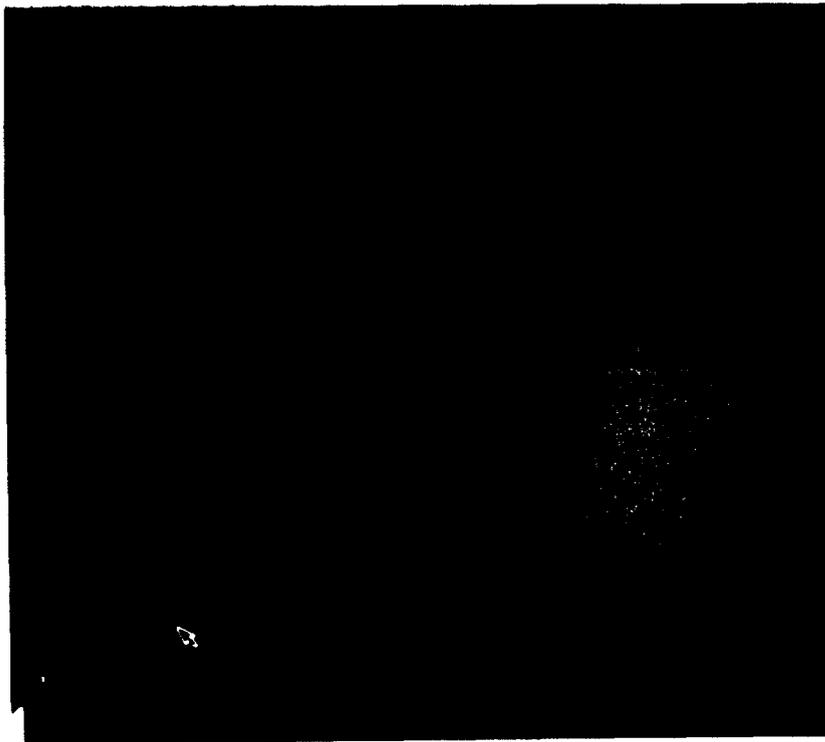


Figure 40.b : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 2$ ep. = 10 cm

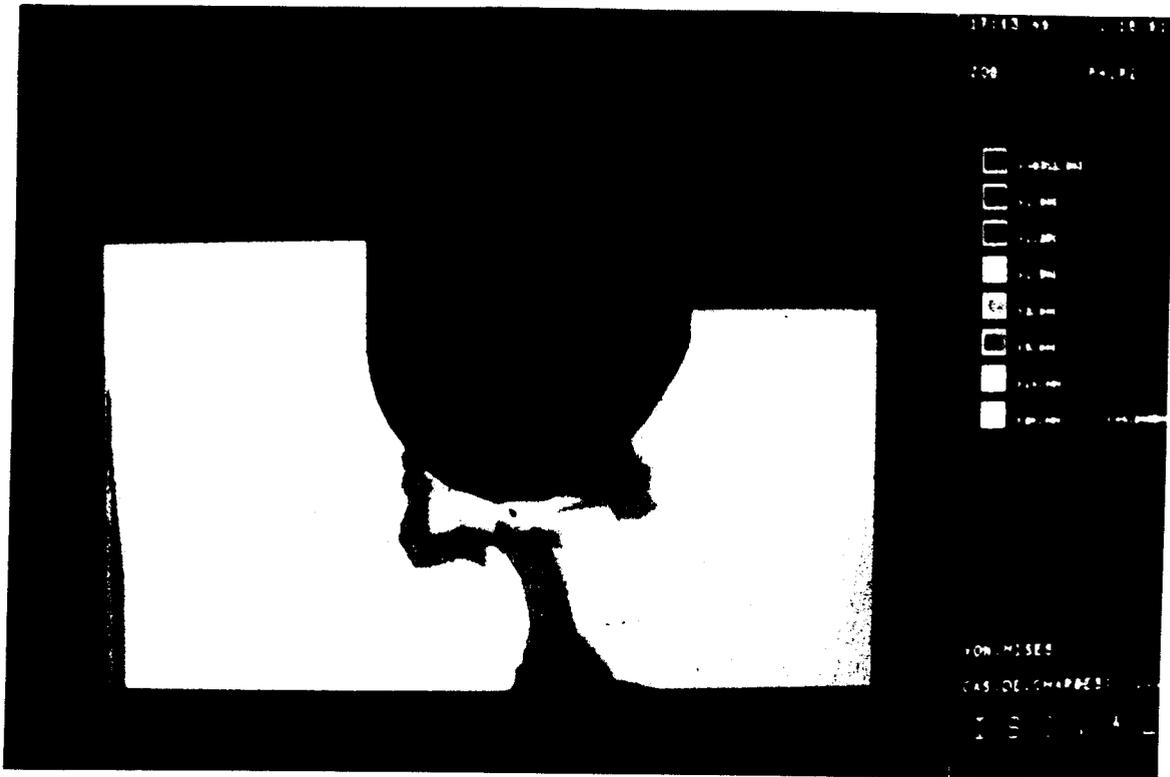


Figure 41.a : Courbes isocritères correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 2$ ep. = 4 cm

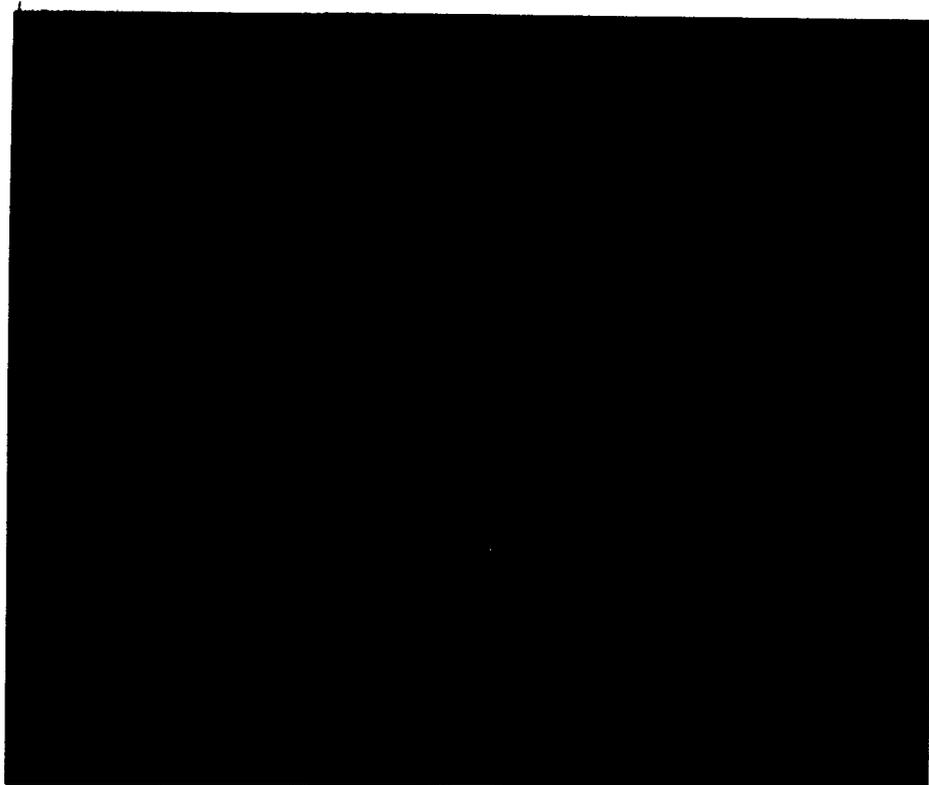


Figure 41.b : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 2$ ep. = 4 cm



Figure 42.a : Courbes isocritères correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ ep. = 4 cm

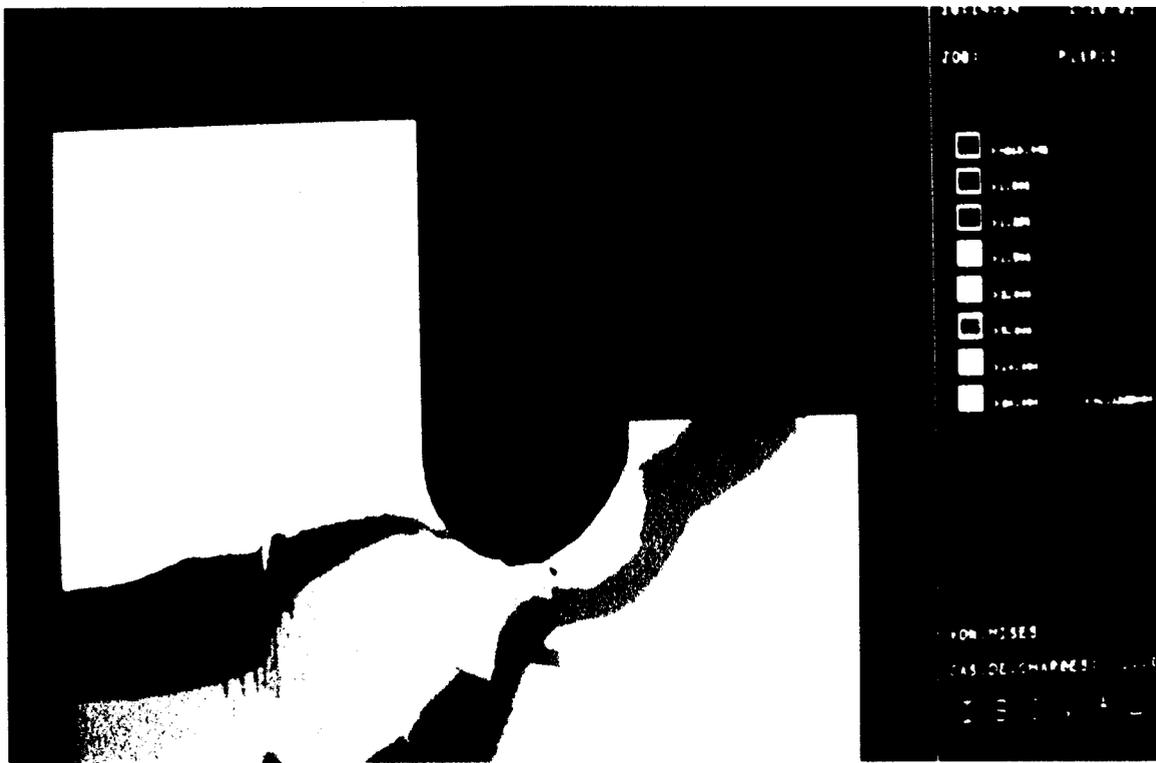


Figure 42.b : Courbes isocritères correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ ep. = 10 cm

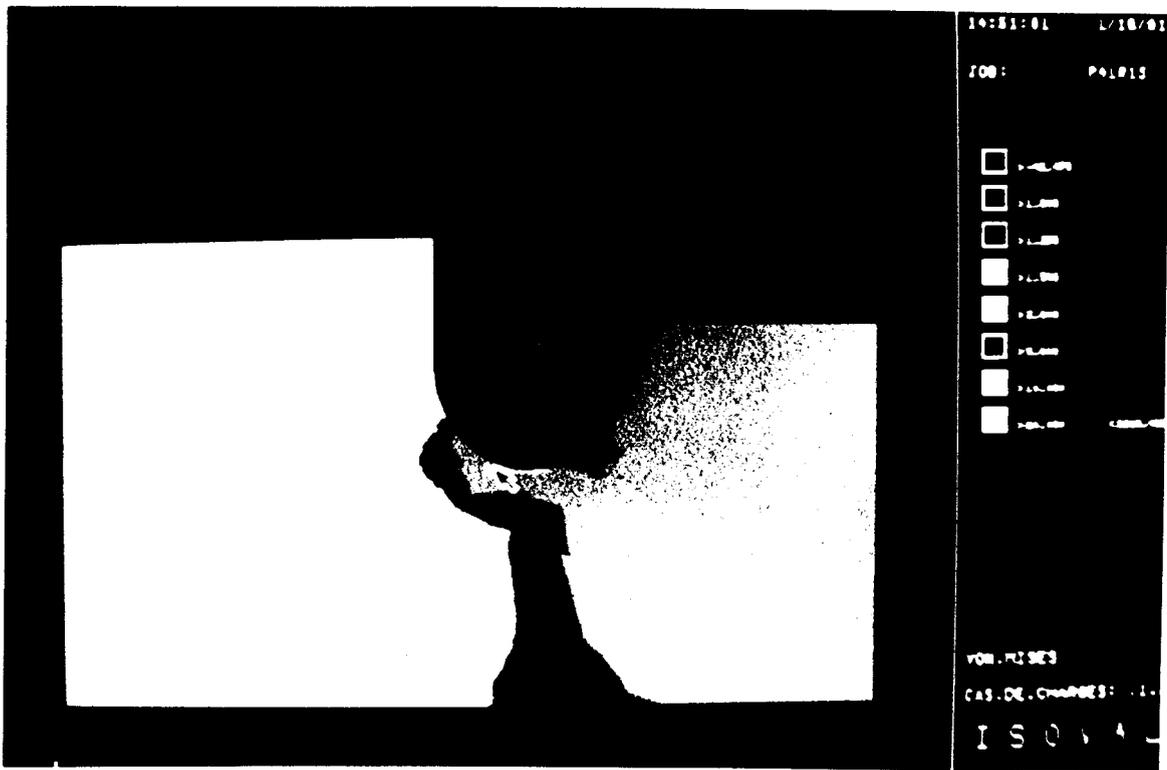


Figure 43.a : Courbes isochrones correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ ep. = 4 cm

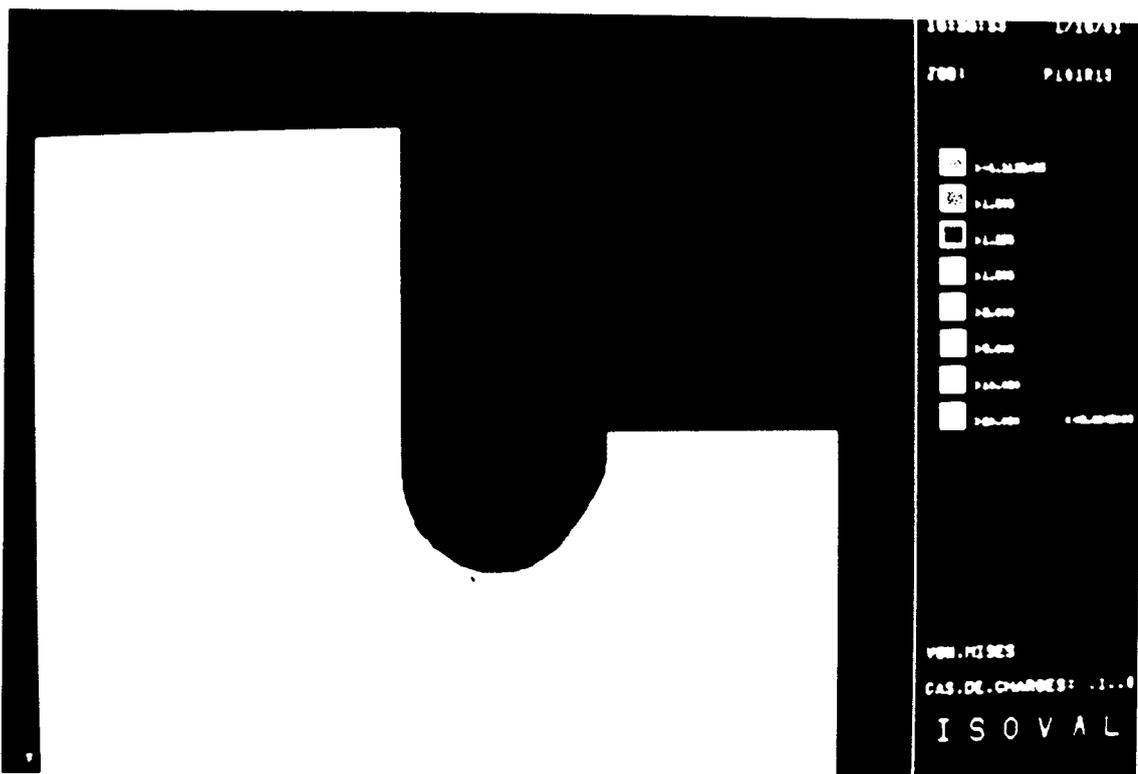


Figure 43.b : Courbes isochrones correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ ep. = 10 cm

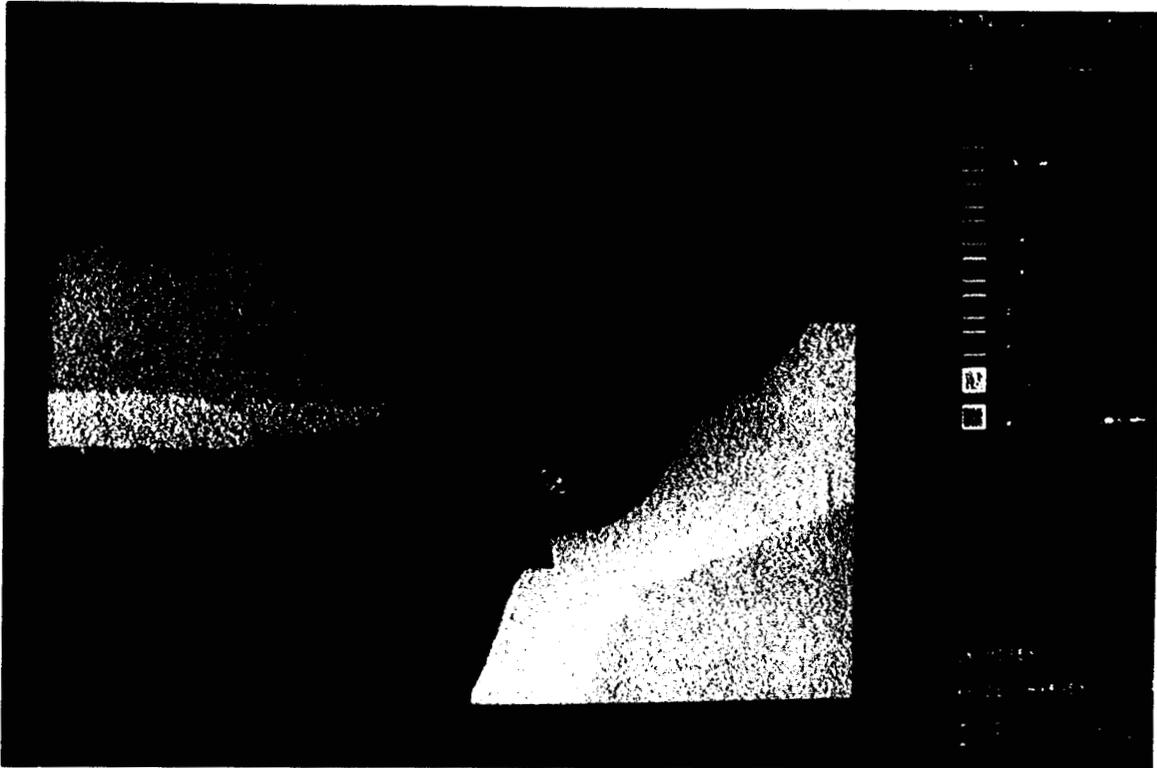


Figure 44.a : Courbes isocritères correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ $\sigma_A = 50$ MPa



Figure 44.b : Courbes isocritères correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ $\sigma_A = 100$ MPa

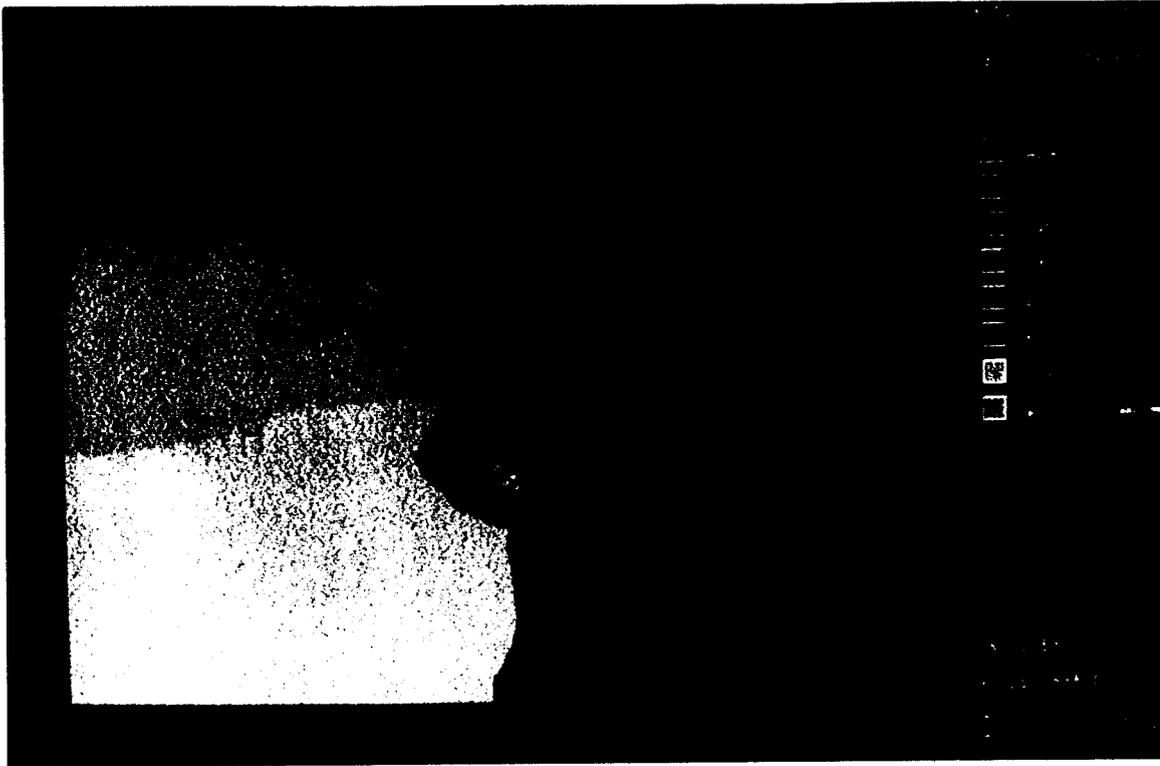


Figure 45.a : Courbes isocritères correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ $\sigma_A = 50$ MPa



Figure 45.b : Courbes isocritères correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ $\sigma_A = 100$ MPa

4.7.3 Influence du type et de la forme de l'outil de forage

Lors de notre étude sur l'influence du type, de l'éclatement et de l'excentricité du carottier sur les contraintes radiales d'initialisation du discage, aucune variation importante de la position du point d'initialisation du discage et de la direction des contraintes principales n'a pu être décelée. Ce phénomène est à relier aux observations de Dyke [11] qui, pour un rapport de rayon du carottier et une épaisseur de disque fixés, n'avait remarqué aucune influence de la géométrie de l'outil de forage sur la forme des disques. A titre d'exemple, nous donnons les représentations des isocritères et des directions des contraintes principales correspondant respectivement à σ_{R1} et de σ_{R2} pour un type de carottier d'éclatement égal à la moitié (annexes C5 a,b, C6 a,b) ou à quatre fois l'excentricité (annexes C7 a,b et C8 a,b).

4.8 CONCLUSIONS

Nous avons pu noter dans ce chapitre que :

- Les contraintes radiales d'initialisation de discage σ_{R1} σ_{R2} varient linéairement en fonction des résistances à la compression et au cisaillement de la roche, et en fonction de la densité de la boue. Une forte résistance du matériau ou une forte densité de boue peut donc retarder le phénomène de discage en règle générale. Toutefois, nous avons remarqué qu'à partir d'un certain seuil (variant selon le type d'outil de forage, la nature de la roche et la contrainte axiale), une augmentation de la pression de boue peut provoquer le discage. Ces conclusions vont dans le même sens que celles de Durelli [10], Obert et Stephenson [38] pour l'influence des caractéristiques géomécaniques du matériau ou que celles de Cheatham [7] et Guenot [14] pour l'influence de la pression de boue.
- Pour des rapports de rayons de carottier égaux à 2, le point d'initialisation du discage se situe sous l'axe de l'outil de forage (pour σ_{R1}), le mode de rupture étant le cisaillement, ou sous la saignée du côté interne (pour σ_{R2}), le mode de rupture étant la traction. Dans ce cas, la contrainte radiale d'initialisation de discage σ_{R1} varie selon l'épaisseur des disques alors que σ_{R2} reste constant. Cette dernière remarque nous a permis de classer les disques en trois familles : les disques d'épaisseur inférieure à 3 cm, ceux d'épaisseur comprise entre 3 et 7 cm, ceux d'épaisseur supérieure à 7 cm. Ces résultats rendent bien compte des observations de Zanon [51].
- Pour des rapports de rayons de carottier inférieurs à 1.7, le point d'initialisation de discage se situe sous la saignée du côté externe (pour σ_{R1}) ; le mode de rupture étant en cisaillement ou sous la saignée du côté interne (pour σ_{R2}), le mode de rupture étant en traction. Dans ce cas, aucune influence de l'épaisseur des disques sur les contraintes radiales de discage n'a pu être décelée.

Ces deux dernières remarques sont intéressantes car, selon le rapport des rayons de l'outil de forage, le point d'initialisation de discage peut se situer sous l'axe du carottier (on rejoint ainsi les conclusions de Sugawara et al [44], Jaegger et Cook [23]) ou sous la saignée (on retrouve les résultats d'Obert et Stephenson [38], Miguez [35]).

- La forme (éclatement, excentricité) et le type de l'outil de forage influent sur les contraintes radiales d'initialisation de discage. Aucune formulation générale du sens de variation de ces contraintes ne peut être faite car l'interaction entre ces paramètres, la profondeur du site et la nature de la roche est trop importante.
- La courbure des disques s'accroît lorsque la contrainte axiale, ou la densité de boue, ou la résistance du matériau augmente, mais elle ne dépend pas du type ou de la forme de l'outil de forage (pour un rapport de rayon du carottier fixé).
- A partir d'une certaine profondeur (variable selon le jeu de paramètres entrés), l'initialisation de la rupture se fait vers la paroi extérieure du carottier et dans la roche, le mécanisme de rupture étant dû à 3 contraintes principales en forte compression. On se situe à la limite du domaine de non discage, et les directions des contraintes principales indiquent un sens possible de propagation de la fissure vers le haut, ce qui pourrait donner les "dog hear".

CONCLUSIONS

Notre travail visait deux objectifs principaux :

- Le premier consistait en la mise au point d'un logiciel de calcul permettant d'estimer les contraintes in-situ correspondant à l'initialisation du discage à partir d'un jeu de données. Cet outil de calcul numérique devait, d'une part, être de manipulation simple et accessible à toute personne désirant l'utiliser sans connaître la méthode de calcul, et d'autre part, être validé à partir d'essais expérimentaux.
- Le second point de cette étude était de déterminer les paramètres qui influent sur la rupture, et comment s'exerçait leur action sur l'initialisation du discage.

Dans la présentation du logiciel DISCAGELF (chapitre II), nous avons montré que le mailleur automatique permet l'introduction d'un jeu de données limité au type de carottier, au degré de raffinement du maillage, au module d'Young et au coefficient de Poisson de la roche. La possibilité d'effectuer des loupes sur la zone à haute probabilité de rupture offre l'avantage de diminuer le domaine d'étude et donc d'affiner les résultats sans augmenter le nombre total d'éléments.

Ces deux aspects de notre logiciel montrent son accessibilité et sa possible implantation sur des stations de travail (P.C.) de capacité moyenne.

DISCAGELF a été d'abord validé sur des essais réalisés :

- sur le triaxial vrai du Laboratoire de Mécanique de Lille, sans pression de boue à l'intérieur de la carotte,
- sur la machine à disquer de Moudafi au CERCHAR. Cette machine a été légèrement modifiée afin de pouvoir simuler la présence de boue en fond de saignée par l'intermédiaire d'une poudre (talc).

Les résultats de ces essais concordent bien avec les valeurs obtenues par DISCAGELF : le logiciel est donc validé expérimentalement.

Les paramètres pouvant influencer sur le phénomène de discage ont été définis à partir de l'analyse bibliographique. Ont été retenus :

- la densité de boue,
- les caractéristiques géomécaniques du matériau,
- le poids sur l'outil,
- les rayons du carottier,
- l'épaisseur de la carotte,
- la géométrie et le type de l'outil de forage.

Les résultats de plus de 200 simulations ont permis de montrer :

- que deux contraintes radiales σ_{R1} et σ_{R2} (à σ_A fixé) pouvaient permettre d'amorcer le discage. Les contraintes radiales d'initialisation de la rupture varient linéairement par intervalles en fonction de la contrainte axiale. La réunion de ces segments de droite forme un domaine de non discage délimité dans sa partie supérieure par "les droites" $\sigma_{R1} = f(\sigma_A)$, et dans sa partie inférieure par "les droites" $\sigma_{R2} = f(\sigma_A)$. Chaque variation de pente de ces droites est imputable à une migration du point d'initialisation du discage. Le décrochement est dû au changement du mode de rupture,
- les contraintes radiales σ_{R1} et σ_{R2} varient linéairement en fonction de la résistance à la compression et au cisaillement du matériau (ce qui rejoint les conclusions d'Obert et Stephenson [38], Durelli [10] et Moudafi [37], et en fonction de la densité de la boue (ceci renvoie aux constatations de Cheatham [6], Guenot [14]).

En règle générale, plus la roche est résistante et plus la pression de boue est élevée, plus l'amorce de la rupture est retardée. Nous avons souligné au chapitre 4.2 qu'il existe des exceptions à cette règle

- Pour des outils de forage de faible rapport de rayon (comme les carottiers de laboratoire), les contraintes radiales de discage ne sont pas influencées par l'épaisseur de la carotte (ceci va dans le sens des résultats expérimentaux de Boumadhi [5] et Moudafi [37]. Les points d'initialisation du discage se situent sous la saignée du côté externe pour σ_{R1} , le mode de rupture étant en cisaillement et sous la saignée du côté interne pour σ_{R2} ; le mode de rupture est en traction. La position de ces points correspond à celle trouvée par Obert et Stephenson [38], Miguez [35], Durelli [10], et par Stacey [43] pour de fortes contraintes radiales.
- Lorsque le rapport des rayons du carottier est proche de 2 (comme pour les outils de forage pétroliers), la contrainte σ_{R1} est beaucoup plus faible que dans le cas précédent et varie en fonction de l'épaisseur de la carotte. Le point d'initialisation de la rupture correspondant est sous l'axe du carottier, la rupture se fait en faible traction, forte compression. Dans ce cas, les disques peuvent être rangés en trois classes :
 - les disques d'épaisseur inférieure à 3 cm,
 - les disques d'épaisseur comprise entre 3 et 8 cm,
 - les disques d'épaisseur supérieure à 8 cm.

La contrainte σ_{R2} et la position du point d'initialisation de discage qui lui est associée ne sont pas influencées par la variation d'épaisseur.

Ces résultats concordent avec ceux de Sugawara [44], Zanon [51] et Stacey [43] (pour de faibles contraintes radiales).

Ces deux derniers points permettent de fournir une explication à la divergence de conclusions émises par différents auteurs quant à la position du point d'initialisation du discage et à l'influence de l'épaisseur de la carotte sur les contraintes de discage. Il y a interaction des paramètres rapport des rayons du carottier et épaisseur de la carotte pour agir directement sur σ_{R1} et sur la position du point d'initialisation de discage. Isaev [22], Zhu Li et Wang [52] et Bauer [2] et Sugawara et al [44] ont également relevés ce phénomène.

Ces deux derniers points permettent de fournir une explication à la divergence de conclusions émises par différents auteurs quant à la position du point d'initialisation du discage et à l'influence de l'épaisseur de la carotte sur les contraintes de discage. Il y a interaction des paramètres rapport des rayons du carottier et épaisseur de la carotte pour agir directement sur σ_{R1} et sur la position du point d'initialisation de discage. Isaev [22], Zhu Li et Wang [52] et Bauer [2] et Sugawara et al [44] ont également relevés ce phénomène.

- La forme et le type de l'outil de forage influent sur les contraintes radiales σ_{R1} et σ_{R2} d'amorce de rupture mais non sur les positions des points d'initialisation de discage. Les variations de σ_{R1} et σ_{R2} en fonction de l'excentricité, de l'éclatement et du type de carottier ne peuvent être formulées de façon générale, car là encore il y a interaction entre ces trois paramètres.

On a constaté que la forme des disques ne dépend pas de la forme de l'outil de forage (pour un rapport de rayon du carottier fixé), ce qui rejoint les conclusions de Dyke [11].

- La courbure des disques croît lorsque la profondeur ou la densité de la boue ou la résistance de la roche augmente.
- Pour des contraintes axiales importantes (> 50 MPa mais dépendantes du type de l'outil, de la nature de la roche et de la densité de boue), l'initialisation de la rupture se produit toujours vers le bord externe de la saignée, dans la roche. Les contraintes radiales correspondantes se situent en limite du domaine de non discage. Les trois contraintes principales sont en forte compression, et l'angle formé par leurs directions indique un sens probable de propagation de la fissure vers le haut. On obtiendrait donc non pas des disques mais des "dog hear".

Perspectives

Une série d'essais réalisés avec des carottiers de rapport de rayon différents nous permettrait de confirmer ou non le rôle capital que semble jouer ce paramètre sur les contraintes de discage et sur la position du point d'initialisation du discage. De même, il serait intéressant de comparer les résultats obtenus à partir de notre logiciel et ceux issus de cas concrets rencontrés sur le terrain.

Une étude plus approfondie sur le comportement du talc nous semble indispensable afin de déterminer la distribution et la retransmission des contraintes dans la carotte (en fond de saignée et sur les parois du trou), ce qui nous renseignerait sur le CTP exact à utiliser dans nos simulations.

Du point de vue numérique, la transcription de notre logiciel dans un code éléments finis tridimensionnel ainsi que l'introduction d'un critère de rupture plus général comme le critère de Lade (tenant compte des trois contraintes principales) permettrait d'étudier de façon plus fine l'évolution de la forme des disques (par l'intermédiaire des angles β_j) en fonction de l'état de contrainte in-situ. Il serait également très intéressant de simuler un écoulement de fluide en fond de saignée afin de tenir compte de la présence de boue dans le puits.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **BASOVITCH V.S., BERSTEIN O.Y., VUGIN R.B., KUZIN B.V., KOCHERGIN V.Q., et KOYA F. (1984)** - "Major trends in variation of drilling indices with depth. In the super deep well of the Kola Peninsula" - (YA Kozlovsky ed.), Springer Verlag, Berlin, pp. 521-547.
- [2] **BAUER J.F. (1969)** - "Etude du phénomène de discage" - Rapport 69/4 - Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
- [3] **BELKACEMI Y. (1990)** - "Méthode de discontinuité de déplacements en champ complexe - Application à la propagation" - Thèse de Doctorat de l'Université de Lille I
- [4] **BELL J.S., GOUGH D.I. (1979)** - "Northeast - Southwest compressive stress in Alberta : Evidence from Oil wells" - Earth and Planetary Science letters, 45, pp. 475-482
- [5] **BOUMADHI M. (1990)** - "Conception et réalisation d'un triaxial vrai de grande capacité simulateur d'ouvrages souterrains" - Thèse de Doctorat de l'Université de Lille I
- [6] **CHEATHAM J.B. (1984)** - "Wellbore stability" - J. of Petr. Tech., June pp. 889-896
- [7] **CHEMAOU M. (1984)** - "Etude des phénomènes dynamiques dans les creusements des roches et recherche des méthodes de précision" - Thèse de l'Ecole des Mines de Nancy

- [8] **CROUCH S.L.** (1976) - "Solution of plane elasticity problems by the displacement discontinuity method" - *Int. J. Num. Meth. Ing.*, Vol. 10, pp. 301-343
- [9] **DHATT G., TOUZOT G.** (1984) - "Une présentation de la méthode des éléments finis" - Collection Université de Compiègne
- [10] **DURELLI A.J., OBERT L., PARKS V.J.** (1968) - "Stress required to initiate core diskings" - *Society of Mining Engineers Trans.*, Vol. 241, pp. 269-276
- [11] **DYKE C.G.** (1989) - "Core diskings. Its potential as an indicator of principal in-situ stress directions" - *Symposium at great depth Pau*, Vol. 3, pp. 1057-1065
- [12] **EINSTEIN H.H., DESCOEUDRES F.** (1972) - "Inventaire des essais in-situ de mécanique des roches (principes et critiques)" - *Bulletin technique de la Suisse Romande*, n° 22 du 28 octobre 1972, 12 pp.
- [13] **GANGARAO H.V.S., ADVANI S.H., CHANG P., LEE S.C., DEAN C.S.** (1979) - "In situ stress determination based on fracture responses associated with coring operations" - 20th US Symposium on Rock Mechanics Petroleum, Engineering dept, pp. 683-690
- [14] **GUENOT A.** (1989) - "Borehole breakouts and stress fields" - *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstract*, Vol. 26, n° 314, pp. 185-195
- [15] **HAIMSON B.C.** (1978) - "The hydrofracturing stress Measuring Method and recent field Results" - *Int. J. Rock Mech. Sci. et Geomech.*, Vol. 15, pp. 167-178
- [16] **HAMAMDJAN-TRENTESAUX C.** (1989) - "Détermination de l'état de contrainte géostatique par l'étude de la microfissuration des roches" - Thèse de Doctorat en Mécanique des Sols, Ecole Centrale de Paris
- [17] **HENRY J.P., BOUHADDANE A., MOREL E.** (1986) - "Application of the Cauchy Integral to the displacement discontinuity Method" - *Boundary Elements* - Proceeding of the International Conferences, September, Tokyo
- [18] **HENRY J.P., PARSY F.** (1982) - "Cours d'élasticité" - Editions Dunod
- [19] **HOEK E., BROWN E.T.** (1980) - "Underground excavations in Rock" - *Inst. Min. Metall.*, Londres, 527 pp.
- [20] **HOEK E., BROWN E.T.** (1978) - "Trends in Relationships between Measured in-situ stresses and depth" - *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. et Geomech.*, Vol. 15, pp. 211-215
- [21] **HUDSON J.A., COOLING C.M.** (1988) - "In situ Rock Stresses and their Measurement in the UK Part 1. The current state of knowledge" - *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. et Geomech. Abstract*, Vol. 25, n° 6, pp. 363-370
- [22] **ISAEV V.** (1977) - "Influence du facteur d'échelle sur le discage des carottes provenant de sondages de différents diamètres" - *Trudy Vnimi (Leningrad)* - Recueil 103, pp. 112-116
- [23] **JAEGER J.C., COOK N.G.W.** (1963) - "Pinching off and diskings of Rocks" - *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, n° 6, pp. 1759-1765
- [24] **JOSIEN J.P., REVALOR R., PIGUET J.P.** (1987) - "Réaction des roches à la foration sous contraintes" - Exposé au Meeting du CMFR, (pp. 1-10), Inédit
- [25] **KIM K., FRANKLIN J.A.** (1987) - "Suggested Methods for Rock Stress Determination" - *Int. Journ. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech., Abstr.*, Vol. 24, pp. 53-73

- [26] **KIM K., LADE P.V.** (1984) - "Modelling Rock Strength in three dimensions" - Int. Journ. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech., Abstr. Vol. 21, pp. 21-31
- [27] **LOKHIN P., LABAN M.** (1983) - "On the possibility to use core fragmentation data in the study of heterogeneity of rock mass fissuration" - International Congress on Rock Mechanics Melbourne F 353-357
- [28] **LESSI J., PERRAU P.H., KACHEN M.** (1988) - "Mesure de contraintes in-situ. Méthode de relaxation des carottes" - Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol. 43, n° 1, pp. 17-42
- [29] **MARTNA J., HILTSCHER R., INGEVOLD K.** (1983) - "Geology and Rock Stresses in deep boreholes at Forsmar in Sweden" - International Congress on Rock Mechanics Melbourne F 111-116
- [30] **MASSIEU E., DURVILLE J.L.** (1983) - "Etude du discage des roches lors du carottage sous contraintes latérales" - Rapport du LCPC à ELF Aquitaine, 52 pp.
- [31] **MAURY V.** (1986) - "Rapport du groupe de travail du Comité Français de Mécanique des Roches sur l'analyse de la rupture autour d'ouvrages souterrains" - 48 pp.
- [32] **MAURY V., SANTARELLI F., HENRY J.P.** (1988) - "Core dinking. A review" - Rapport interne Elf Aquitaine, 11 pp.
- [33] **MAURY V., SAUZAY J.M.** (1987) - "Borehole Instability : Case histories, Rock Mechanics. Approach and Results" - SPE/IADC, pp. 1 - 24
- [34] **MIGUEZ R.** (1983) - "Etude de la rupture par discage" - DEA de Mécanique des Solides, Université de Lille I
- [35] **MIGUEZ R.** (1990) - "Etude du discage. Application à la détermination des contraintes in-situ lorsque le forage n'est pas chargé". Thèse de Mécanique des Solides, Université de Lille I
- [36] **MIGUEZ R., VENET V., HENRY J.P.** (1988) - "Etude du discage - Résultats partiels" - Rapport interne, Elf Aquitaine, 19 pp.
- [37] **MOUDAFI M.** (1986) - "Etude expérimentale de la réactivité des roches par foration sous contraintes" - Thèse de Docteur de l'I.N.P.L.
- [38] **OBERT L., STEPHENSON D.E.** (1965) - "Stress conditions under which core discing occurs" - Society of Mining Engineers Trans. , Vol. 232, pp. 227-235
- [39] **PAILLET F.L., KIM K.** (1987) - "Character and distribution of borehole breakouts and their relationship to in situ stresses in deep Columbia River Basalts, J. of Geophysical Research, Vol. 92, n° 137, pp. 6223-6224
- [40] **PANET M.** (1969) - "Quelques problèmes de Mécanique des Roches posés par le tunnel du Mont Blanc" - Bulletin de Liaison Labo. Routiers Ponts et Chaussées, n° 42, réf. 784, pp. 115-145
- [41] **REN N.K., ROEGIERS J.C.** (1983) - "Differential strain curve analysis - A new method for determining the pre-existing in-situ stress rate from rock core measurements". - International Congress on Rock Mechanics Melbourne, F 117-127
- [42] **SANTARELLI F.** (1988) - "Le discage, un indicateur des contraintes en place : état des connaissances" - Rapport interne Elf Aquitaine, 36 pp.
- [43] **STACEY T.R.** (1982) - "Contribution to the mechanism of core discing" - Journal of the South African, Institute of Mining and Metallurgy, pp. 269-274

- [44] **SUGAWARA K., KAMEOKA Y., SAITO T., GKA Y., HIRAMATSU Y. (1978)** - "Etudes sur le phénomène de disage des carottes" - Journal Min. Inst. Japan, Vol. 94, pp. 797-803
- [45] **TEUFEL L.W., WARPINSKI N.R. (1983)** - "In situ stress variations and hydraulic fracture propagation in layered rock Observations form a minebock experiment". - Int. Congress on Rock Mechanics Melbourne, F 43-48
- [46] **TRANter C.J., CRAGGS W.J. (1945)** - "The stress distribution in a long circular cylinder when a discontinuous pressure is applied to the curved surface" - Phil. May, Vol. 36, pp. 241-250
- [47] **TSUKAHARA H., IKEDA R. (1987)** - "Hydraulic fracturing stress measurements and in-situ stress field in the Kanto Tokai arez Japan" - Tectonophysics n° 135, pp. 329-345
- [48] **VENET V. (1987)** - "Introduction à la modélisation du phénomène de disage" - DEA de Génie Civil, Université de Lille I
- [49] **VENET V., HENRY J.P. (1989)** - "Modélisation du disage par éléments finis" - Rapport interne Elf Aquitaine, 25 pp.
- [50] **WAWERSIK W.R., STONE CH. (1985)** - "A characterization of inelastic Rock demonstrated by hydraulic fracturing" - Int. J. of Mining
- [51] **ZANON F. (1987)** - "Rapport interne Elf Aquitaine" (Inedit)
- [52] **ZHU W., LI G., WENG K. (1985)** - "Analysis of dinking Penomenon and stress field in the region of an underground Power house". Rocks Mechanics and Rock Engineering, n° 18, pp. 1-15
- [53] **ZOBACK M.D., MOOS D., HASTIN L., ANDERSON R.N. (1985)** - "Well bore breakouts and in situ stress" - Journal of Geophysical Research, Vol. 90, n° B7, pp. 5523-5530

ANNEXES

ANNEXE A : DETERMINATION DES PRESSIONS TRANSMISES PAR LE TALC EN FOND DE SAIGNEE

Pour déterminer la transmission des charges appliquées en fond de la saignée, un ensemble expérimental a été réalisé. Il se décompose en trois parties (figures A1.a, A1.b).

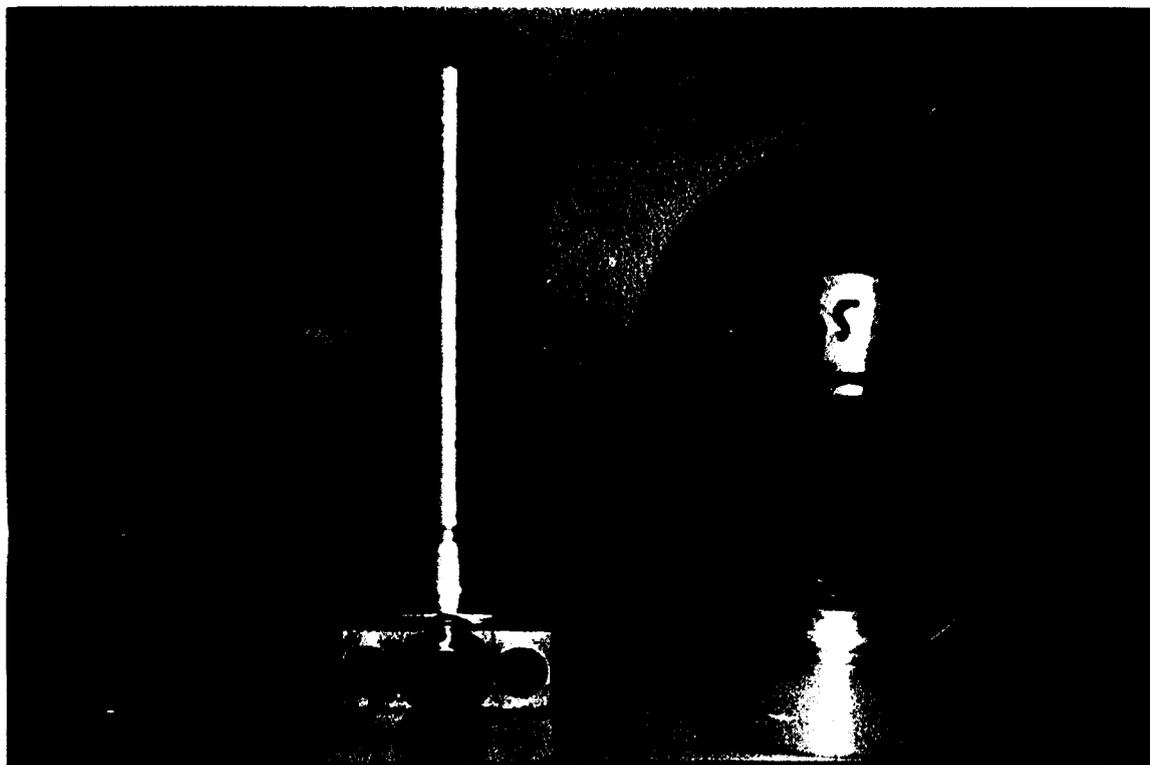


Figure A1.a : Instrumentation utilisée pour la détermination de la transmission de la pression à travers le talc

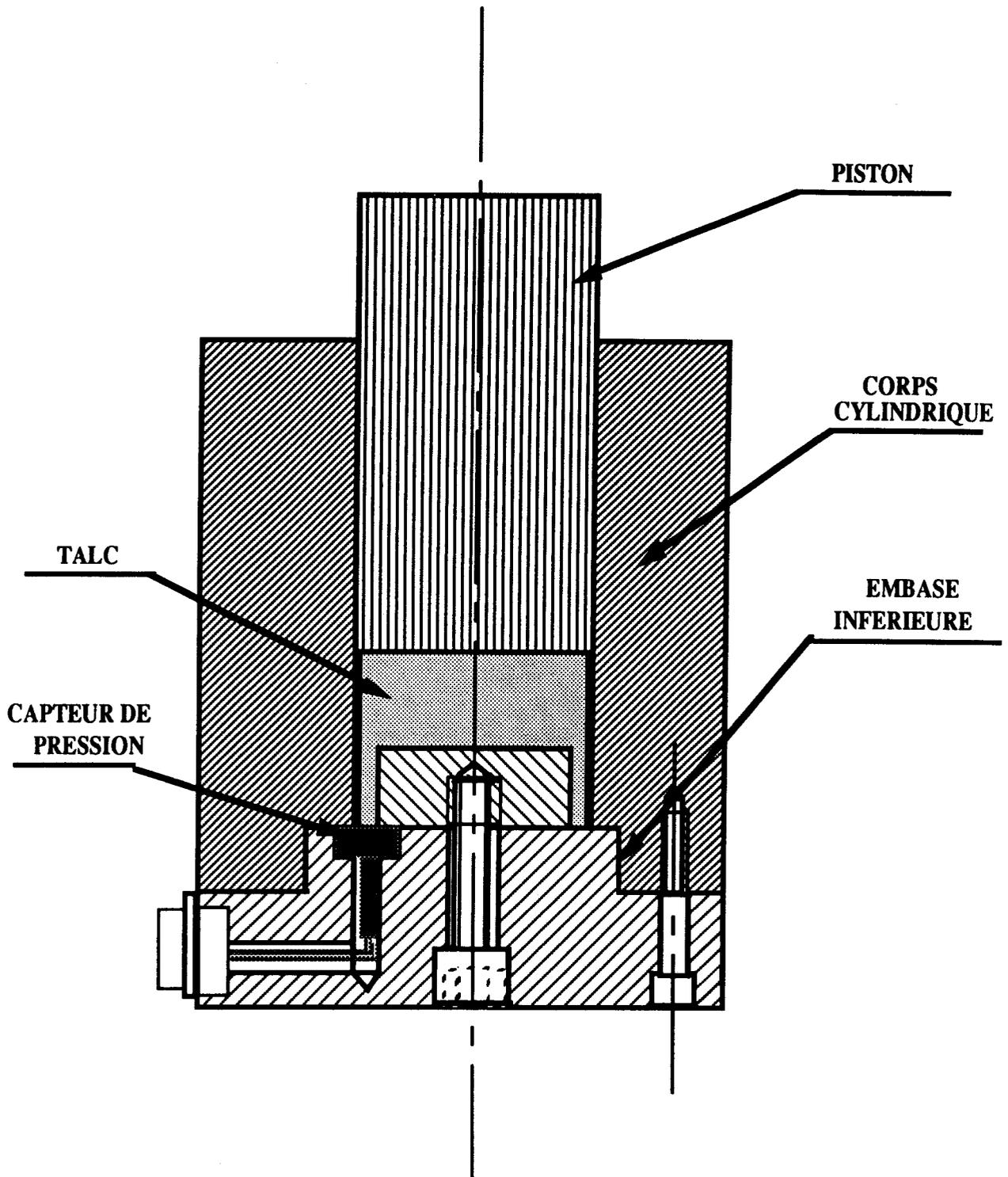


Figure A1.b : Schéma du montage

L'embase inférieure (fig. A2) est équipée d'un capteur de pression (0 - 80 bars) de 6 mm de diamètre sur 9,5 mm de hauteur. Ce capteur est logé dans un épaulement de 58 mm de diamètre simulant le fond de saignée, au centre duquel est fixé un cylindre de 34 mm de diamètre figurant le diamètre et l'épaisseur des disques.



Figure A.2 : Embase inférieure

L'ensemble est surmonté d'une pièce cylindrique (de 10 mm de diamètre sur 90 de hauteur) percée en son centre et sur toute sa longueur d'un trou de 45 mm de diamètre permettant le guidage d'un piston.

Le capteur se situe donc, en fond de saignée, entre le noyau intérieur et la couronne extérieure. Il est relié à un chaîne d'acquisition automatique de données. Le talc est mis en place par couches successives sous des charges axiales croissantes, à l'aide d'une presse Instron (fig. A3) ; les pressions, relatives à ces chargements, sont enregistrées.

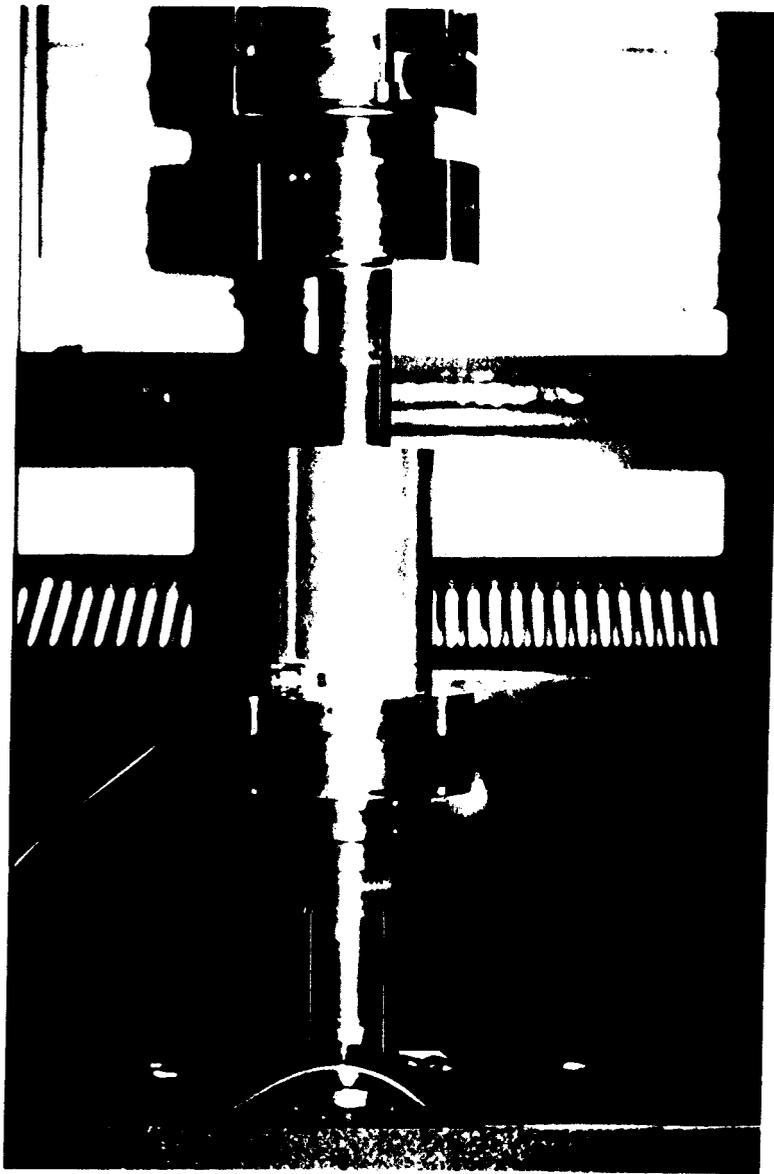


Figure A3 : Dispositif expérimental

Nous avons d'abord déterminé le *coefficient de transmission de la pression* CT_p dans le talc pendant la *phase de précompaction*. Les deux pressions axiales finales appliquées sont de 40 bars et de 100 bars. Le procédé expérimental suivi correspond à celui du précompactage avant essai (chap. III.3.3). Après chaque adjonction de talc, la pression reçue sur le capteur en fonction de la pression appliquée sur la poudre est enregistrée. Les courbes ainsi obtenues sont représentées sur les figures A4.a et A4.b.

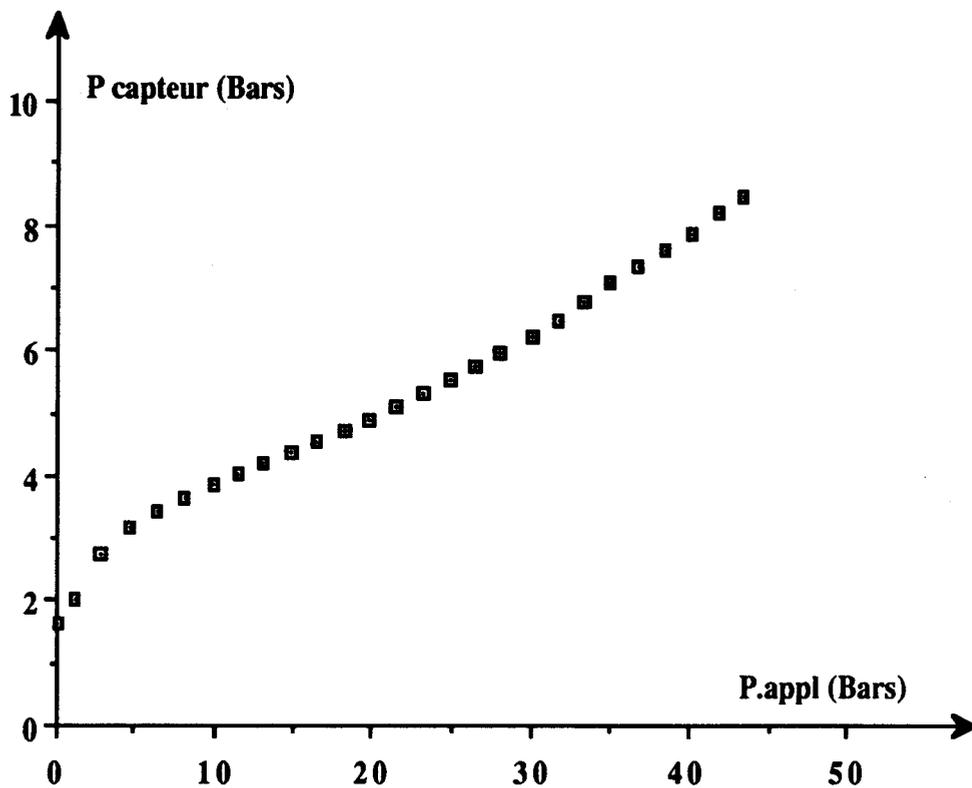


Figure A4.a : Transmission de la pression pendant la compaction du talc $P_{AF} = 40$ bars

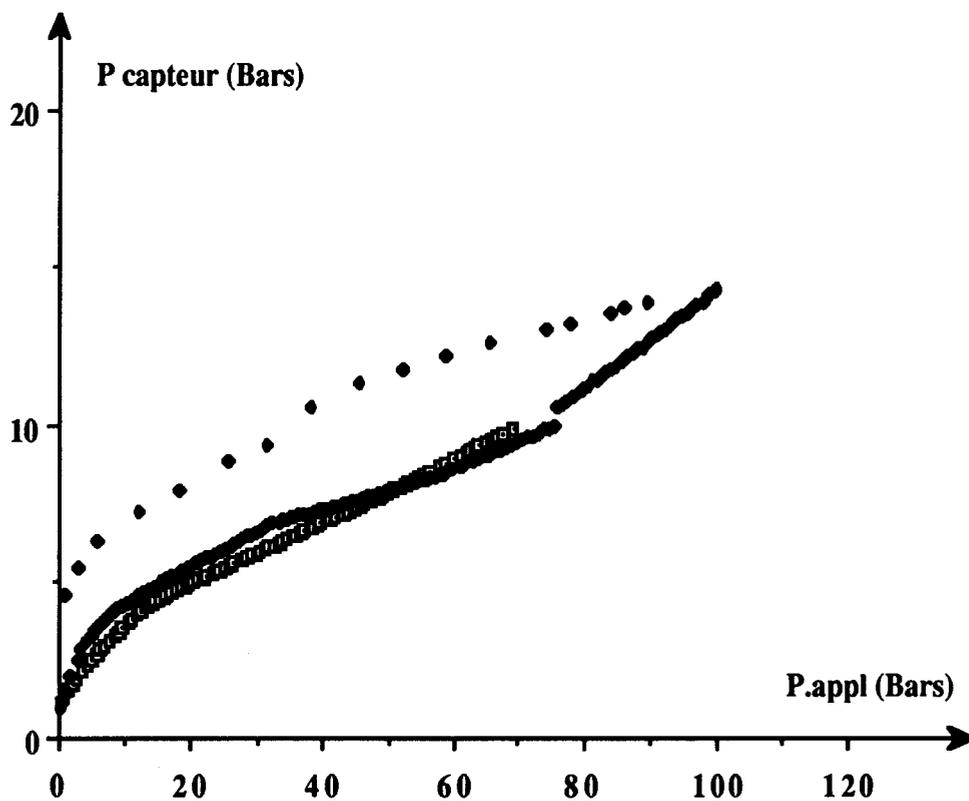


Figure A4.b : Transmission de la pression pendant la compaction du talc $P_{AF} = 100$ bars

Pour $PAF = 40$ bars, la pression reçue sur le capteur est de l'ordre de 8 bars. Lorsque $PAF = 100$ bars, le capteur reçoit une pression de 14 bars. Le coefficient de transmission de la pression (CT_p) est légèrement supérieur à $1/10$.

Nous avons ensuite testé la variation du CT_p en fonction du nombre de fois où un même chargement est appliqué à l'échantillon, sans qu'il y ait eu un apport de talc. Cette opération sera appelée *précompactage du talc* dans le chapitre 3.3.3. La figure A5 illustre parfaitement les résultats obtenus lors de ces manipulations.

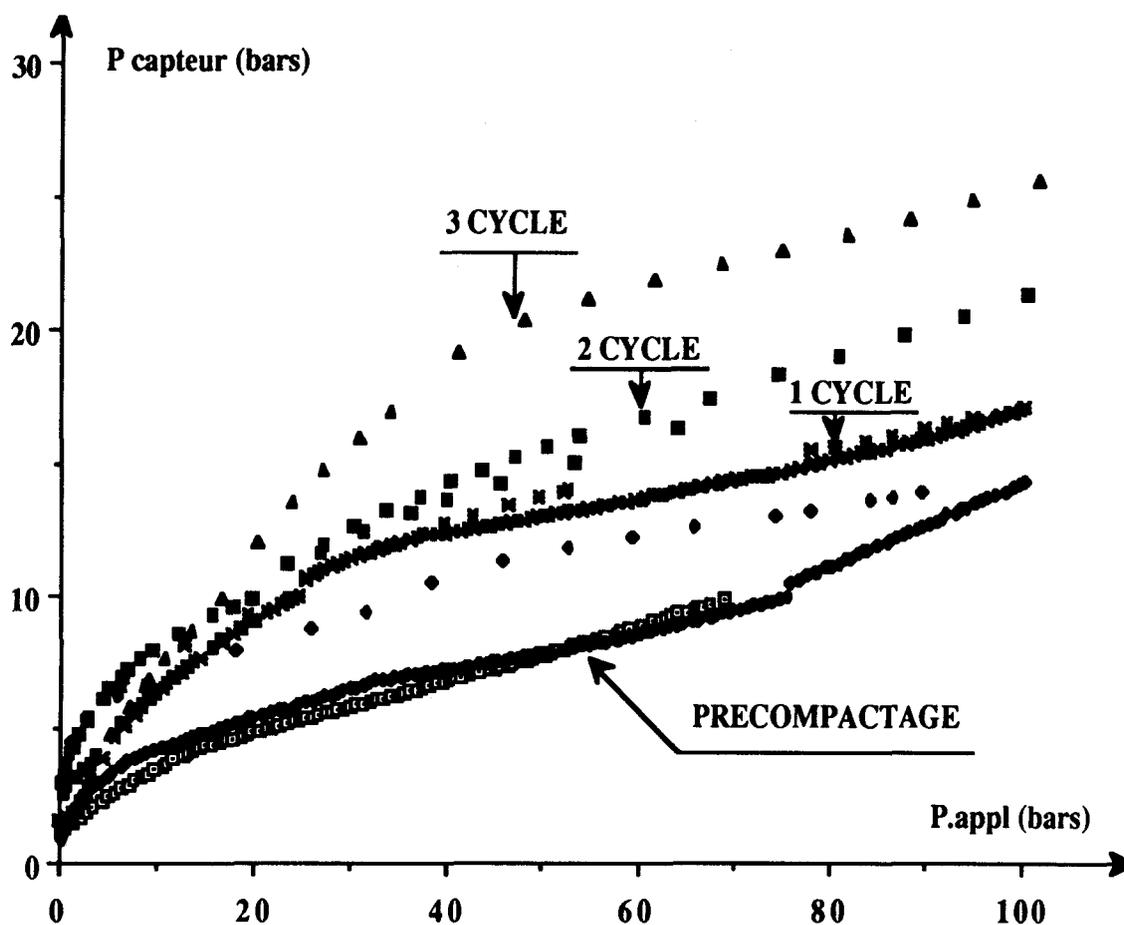


Figure A.5 : Variation des pressions reçues en fonction des pressions appliquées et du nombre de chargements

La pression exercée sur le capteur, après un précompactage du talc sous une pression PAF de 100 bars, est de 14 bars. Pour les trois cycles de chargement (jusqu'à une pression de 100 bars), elle passe successivement de 17 bars (1er cycle) à 21 bars (2e cycle) pour arriver à 25 bars au 3e cycle. Durant ces essais, l'enfoncement du piston n'a jamais excédé 1 mm. La densité du talc dans l'échantillon est donc restée sensiblement la même, alors que le coefficient de transmission de pression passe de 0,1 à 0,25.

Une étude complète du comportement du talc ne pouvant être envisagée, nous nous sommes servis, pour les essais réalisés au CERCHAR, de la capacité qu'a le talc à restituer une pression appliquée en fonction du nombre de précompactages reçus.

Trois types d'expérimentations seront réalisés :

- des essais de discage sans pression de "boue" qui nous donneront des informations quant au type de signaux émis lors de l'initialisation de la rupture,
- des essais de discage sous faible "densité de boue". Ils correspondront à un précompactage et à un préchargement faibles (PAF = 40 bars, les pressions finales de préchargement sont de 60 bars et de 100 bars avec un seul cycle de montée en pression). La figure A6 représente les pressions reçues en fond de saignée lors de ces différentes phases et correspondant aux pressions qui seront développées pendant l'essai de discage.

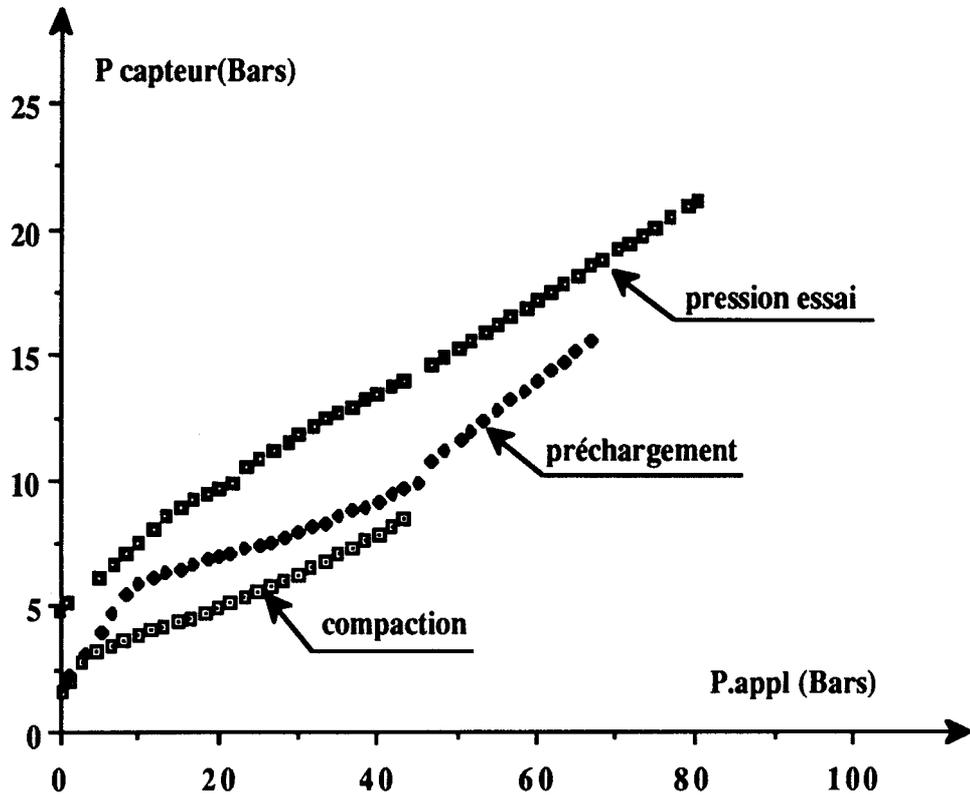


Figure A6 : Variations des pressions en fond de saignée pour une faible "densité de boue"

- des essais de discage sous forte "densité de boue". Le précompactage se fera sous une PAF de 100 bars, mais l'échantillon subira deux cycles de chargement de 100 bars. La figure A7 représente les valeurs des pressions en fond de saignée pendant l'essai de discage.

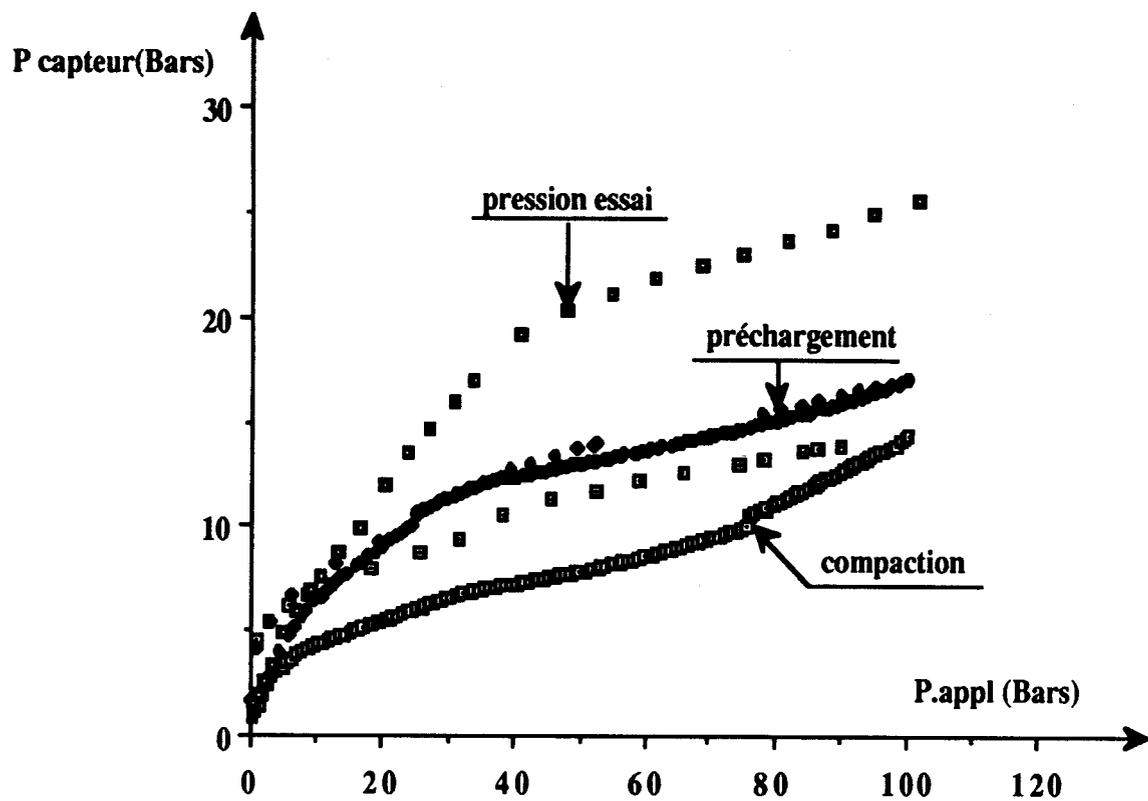
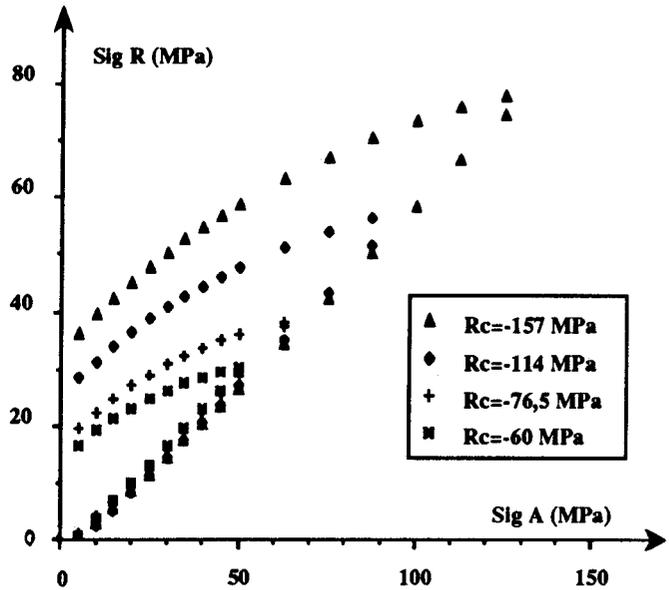
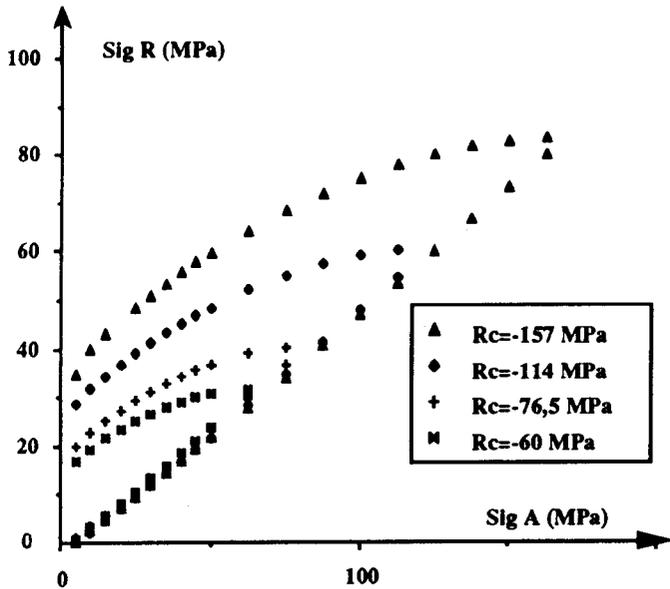
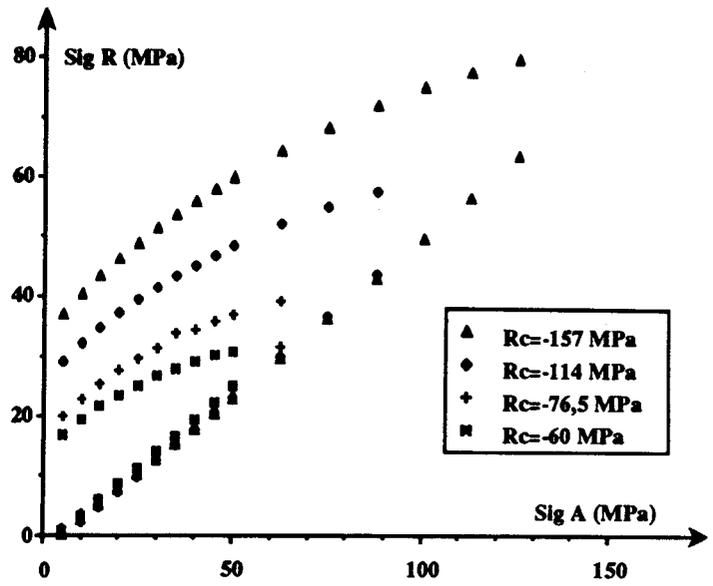
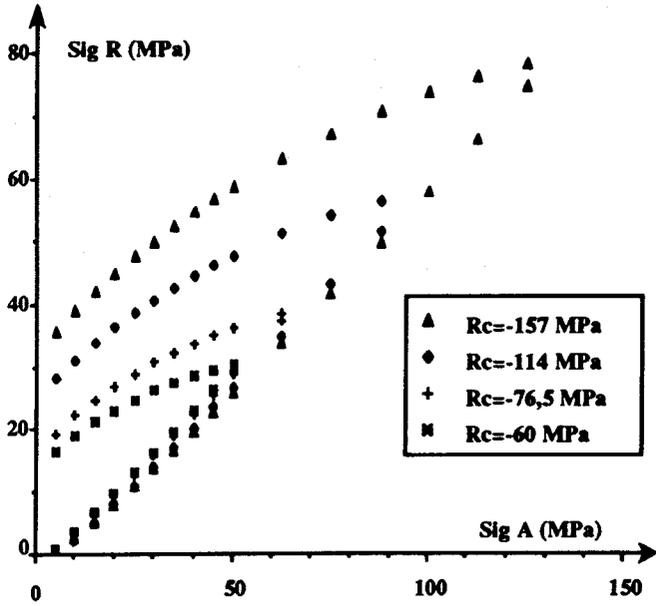


Figure A7 : Variations des pressions en fond de saignée pour une "forte densité de boue"

ANNEXE B1 : INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES
GEOMECANIQUES DE LA ROCHE



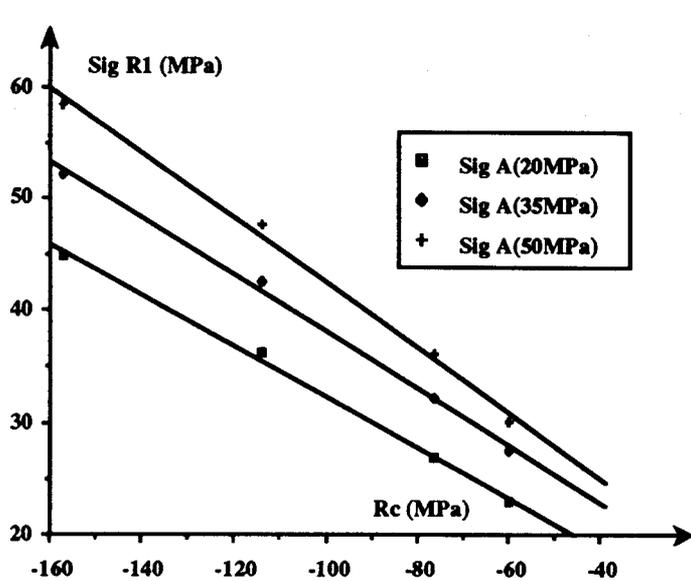


Figure B2.a : Variation de σ_{R1}
en fonction de R_C
IMAIL = 4

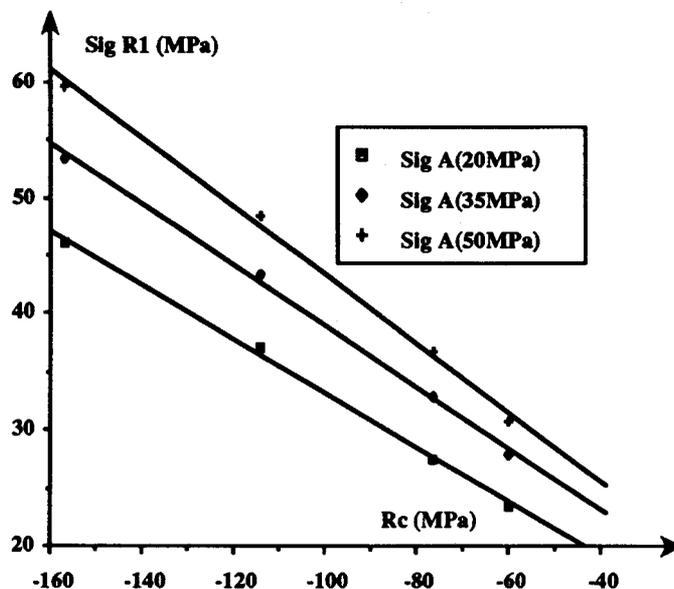


Figure B2.b : Variation de σ_{R1}
en fonction de R_C
IMAIL = 5

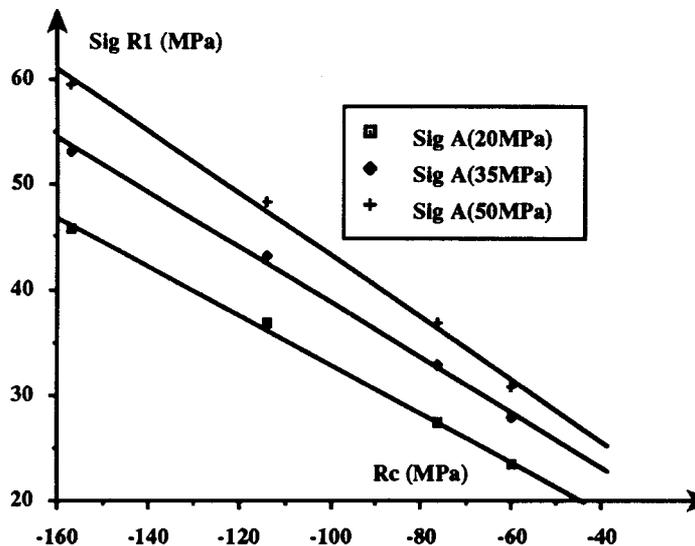


Figure B2.c : Variation de σ_{R1}
en fonction de R_C
IMAIL = 6

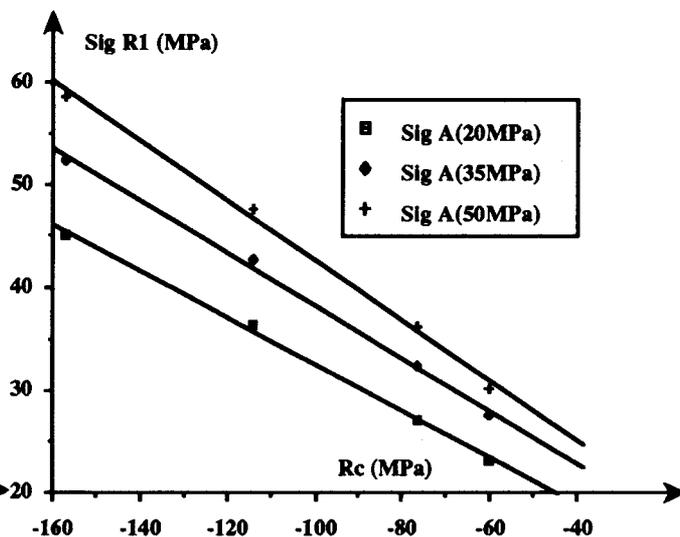


Figure B2.d : Variation de σ_{R1}
en fonction de R_C
IMAIL = 7

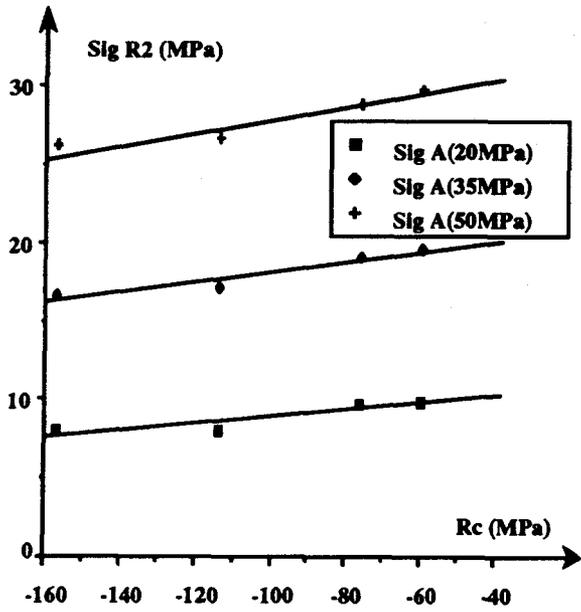


Figure B3.a : Variation de σ_{R2}
en fonction de R_C
IMAIL = 4

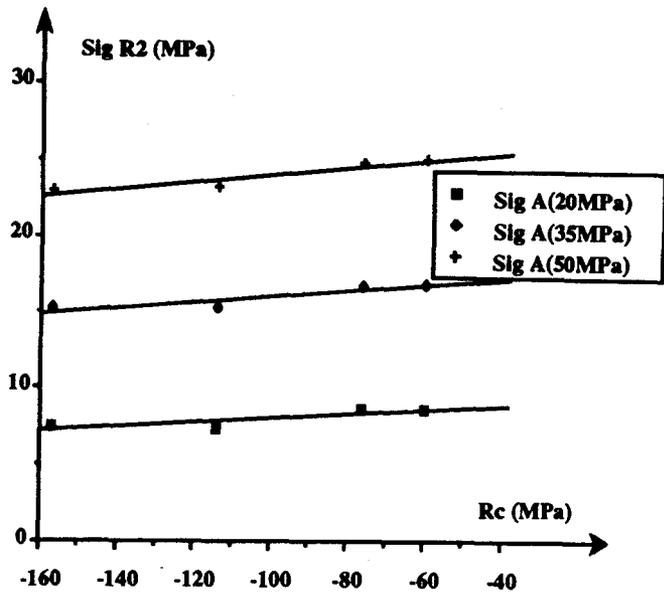


Figure B3.b : Variation de σ_{R2}
en fonction de R_C
IMAIL = 5

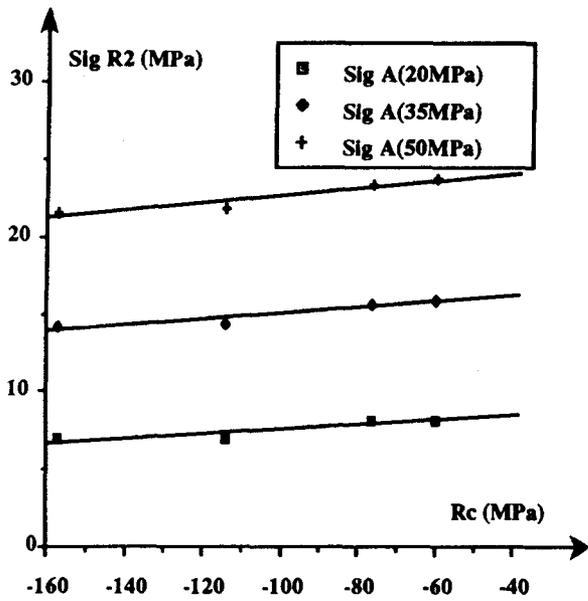


Figure B3.c : Variation de σ_{R2}
en fonction de R_C
IMAIL = 6

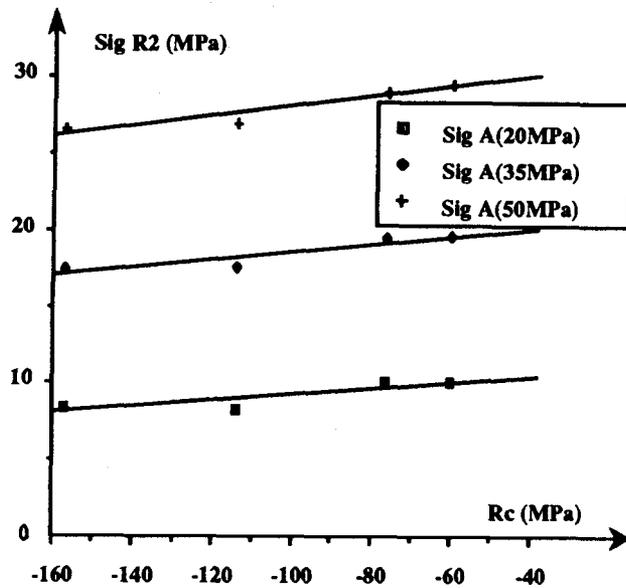


Figure B3.d : Variation de σ_{R2}
en fonction de R_C
IMAIL = 7

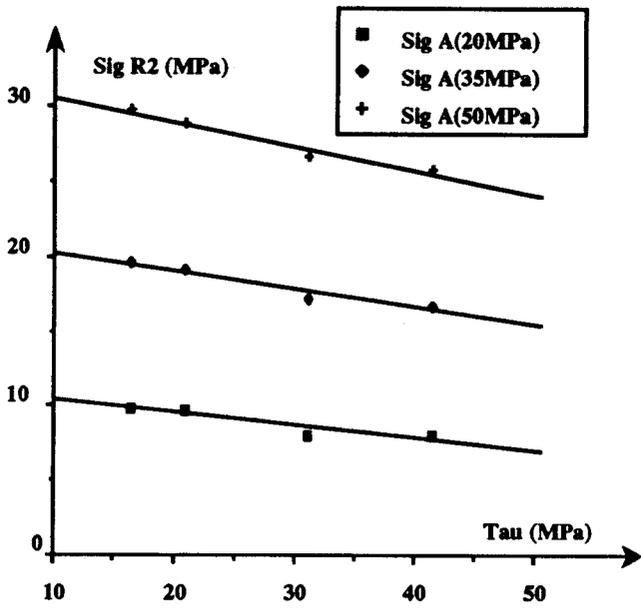


Figure B4.a : Variation de σ_{R2}
en fonction de τ_o
IMAIL = 4

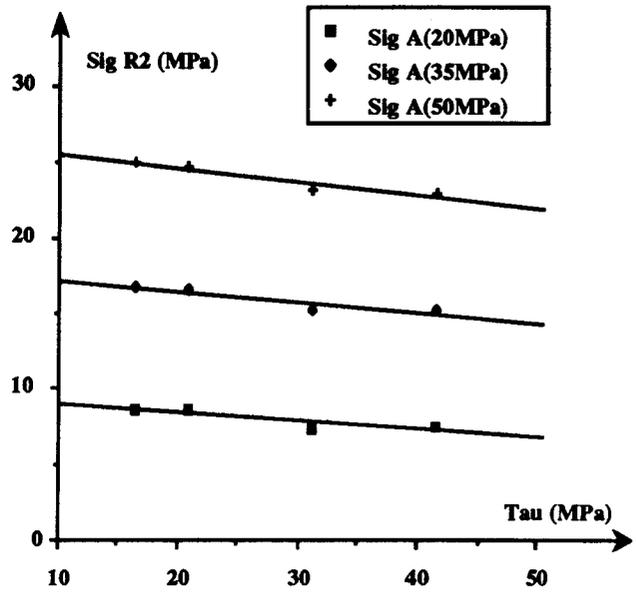


Figure B4.b : Variation de σ_{R2}
en fonction de τ_o
IMAIL = 5

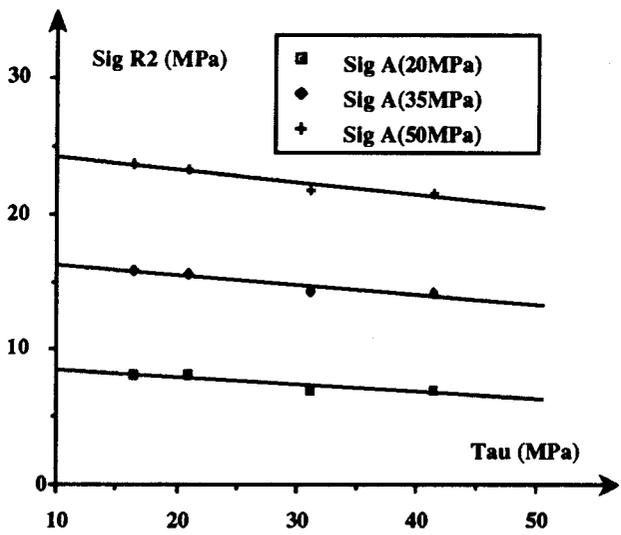


Figure B4.c : Variation de σ_{R2}
en fonction de τ_o
IMAIL = 6

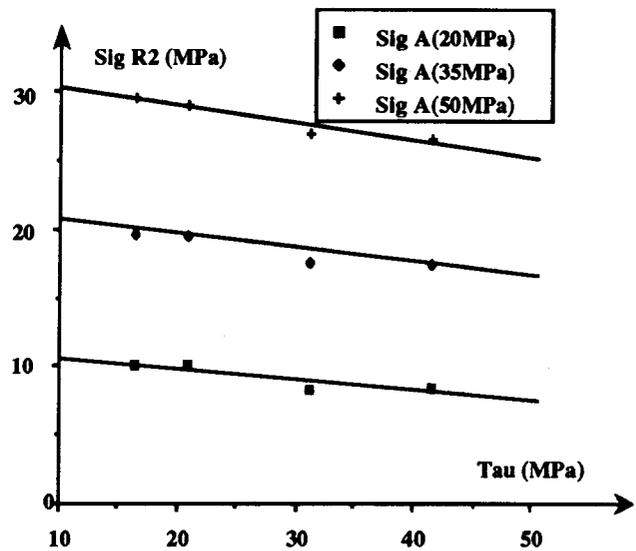


Figure B4.d : Variation de σ_{R2}
en fonction de τ_o
IMAIL = 7

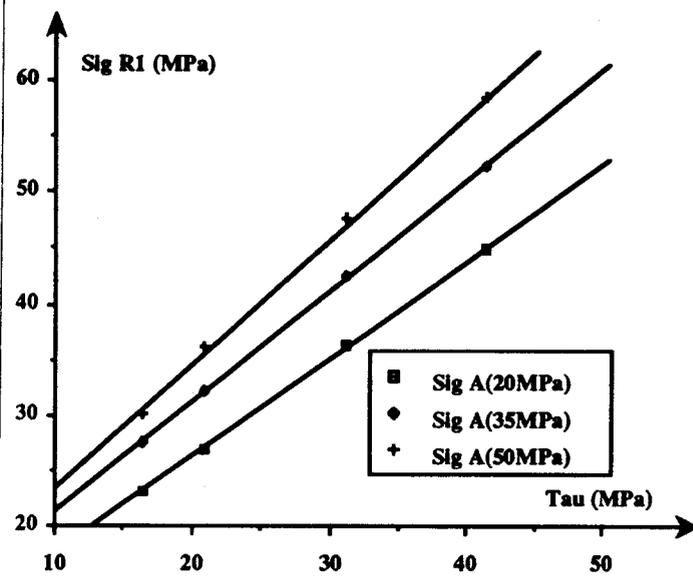


Figure B5.a : Variation de σ_{R1}
en fonction de τ_o
IMAIL = 4

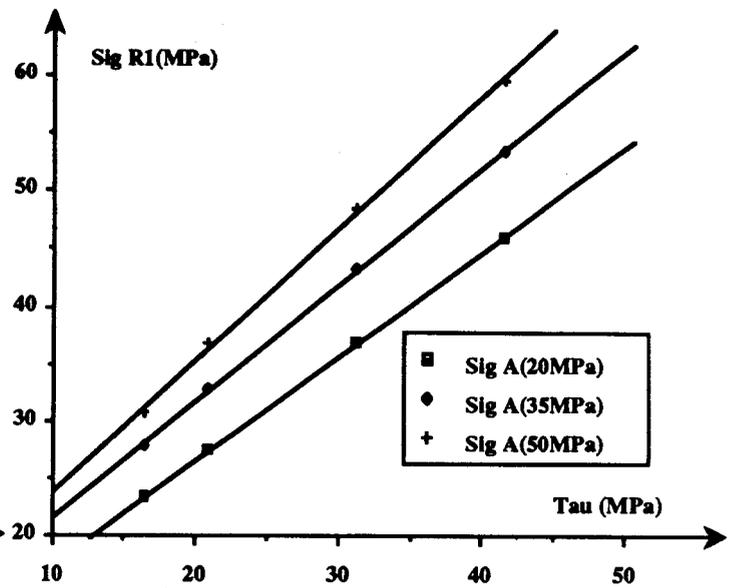


Figure B5.b : Variation de σ_{R1}
en fonction de τ_o
IMAIL = 5

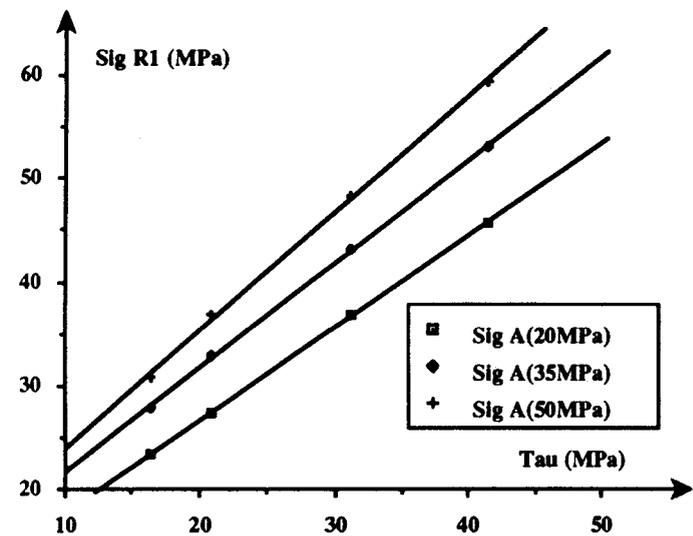


Figure B5.c : Variation de σ_{R1}
en fonction de τ_o
IMAIL = 6

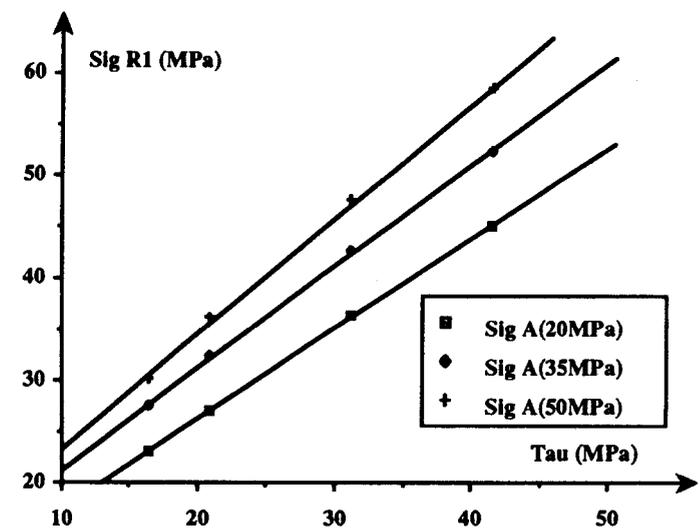


Figure B5.d : Variation de σ_{R1}
en fonction de τ_o
IMAIL = 7

ANNEXE B2 : INFLUENCE DE LA DENSITE DE BOUE

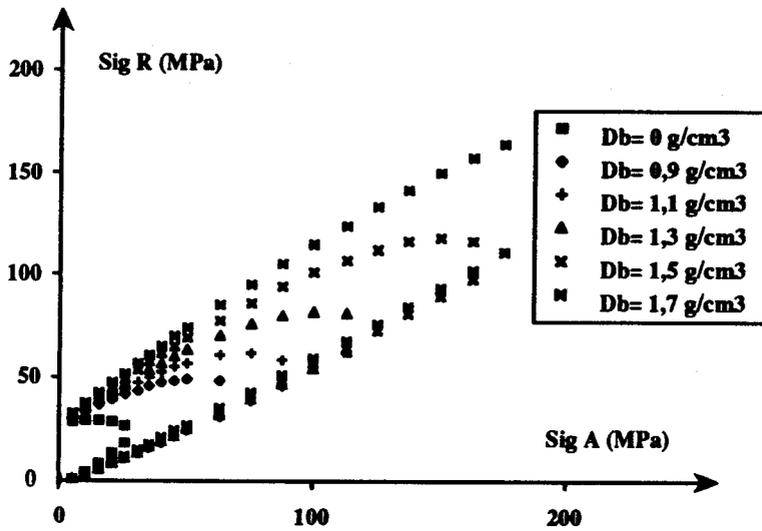


Figure B6.a : Variation du domaine de non discage en fonction de la densité de boue IMAIL = 2 $R_o/R_i = 1.2$

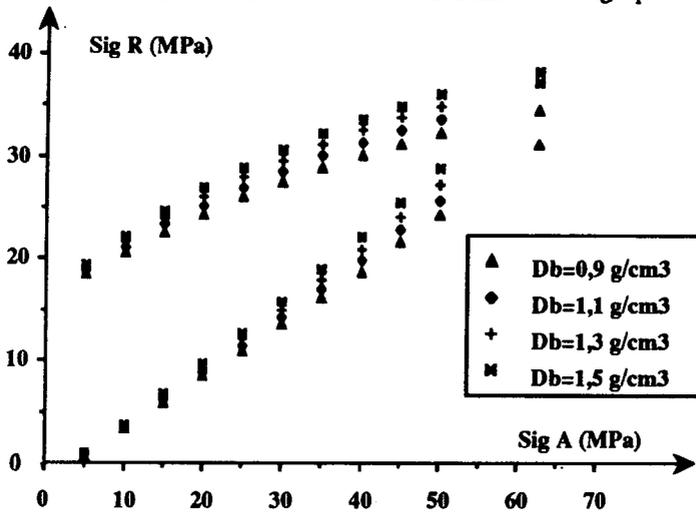


Figure B6.b : Variation du domaine de non discage en fonction de la densité de boue IMAIL = 4 $R_o/R_i = 1.2$

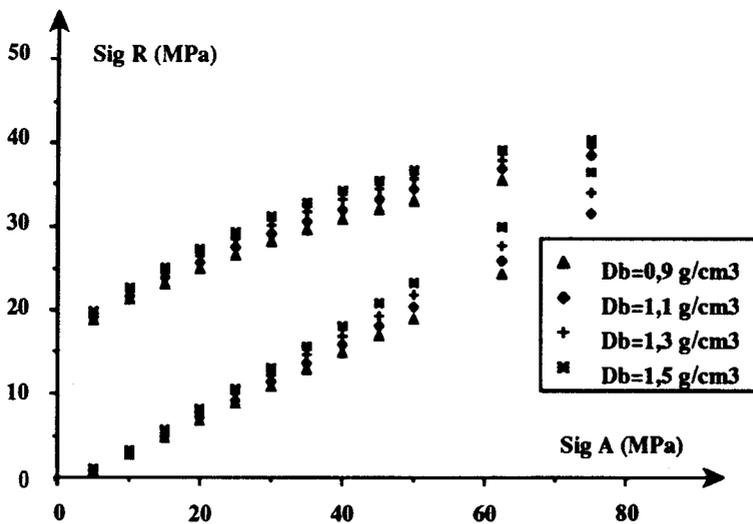


Figure B6.c : Variation du domaine de non discage en fonction de la densité de boue IMAIL = 6 $R_o/R_i = 1.2$

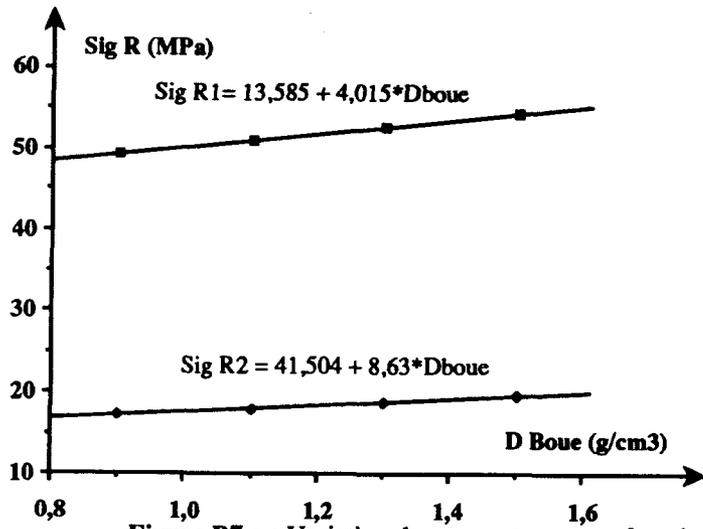


Figure B7.a : Variation de σ_{R1} et σ_{R2} en fonction de la densité de boue IMAIL = 4 $\sigma_A = 40$ MPa

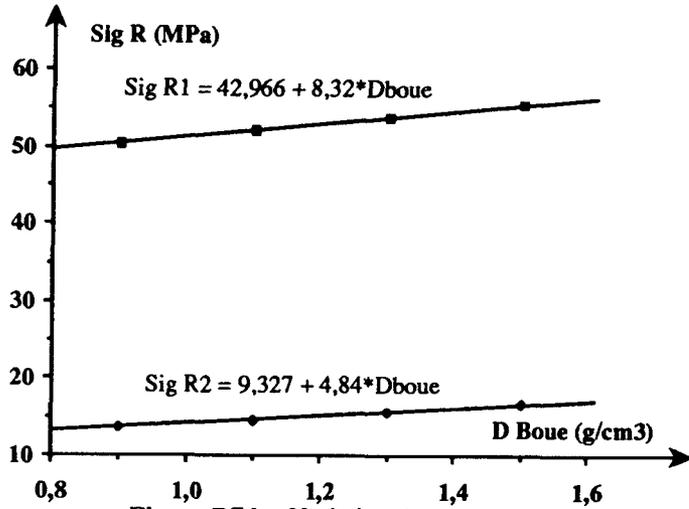


Figure B7.b : Variation de σ_{R1} et σ_{R2} en fonction de la densité de boue IMAIL = 6 $\sigma_A = 40$ MPa

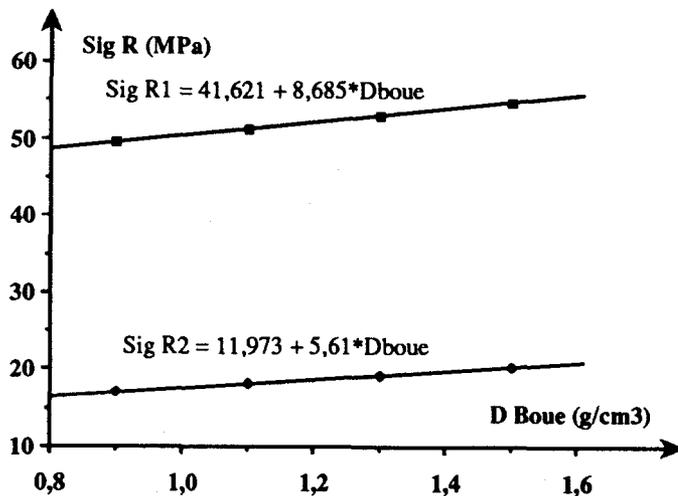


Figure B7.c : Variation de σ_{R1} et σ_{R2} en fonction de la densité de boue IMAIL = 7 $\sigma_A = 40$ MPa

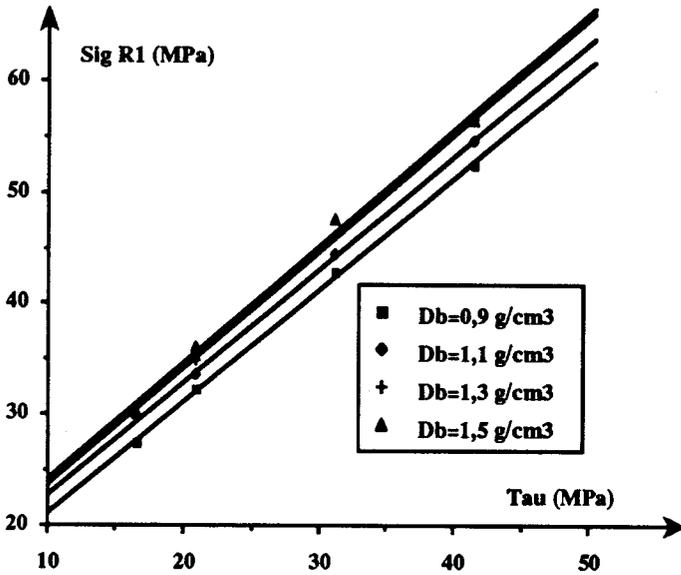


Figure B8.a : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0 et de la densité de boue
 IMAIL = 4 $\sigma_A = 50$ MPa

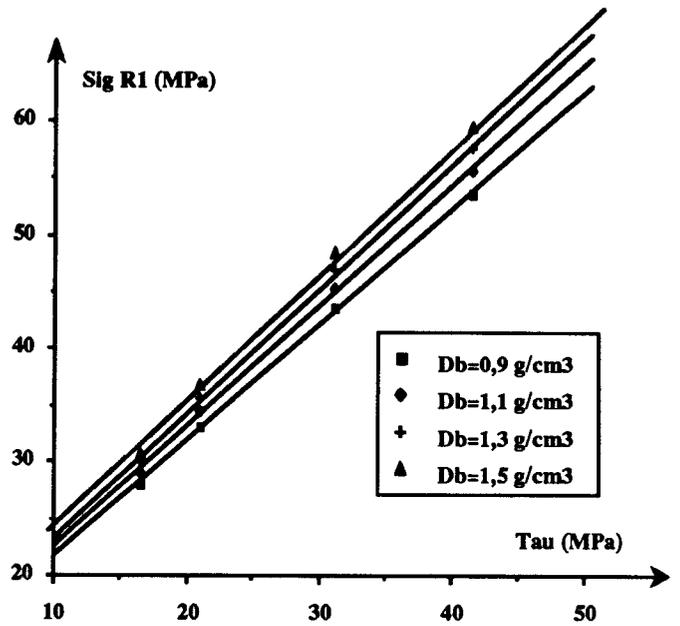


Figure B8.b : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0 et de la densité de boue
 IMAIL = 6 $\sigma_A = 50$ MPa

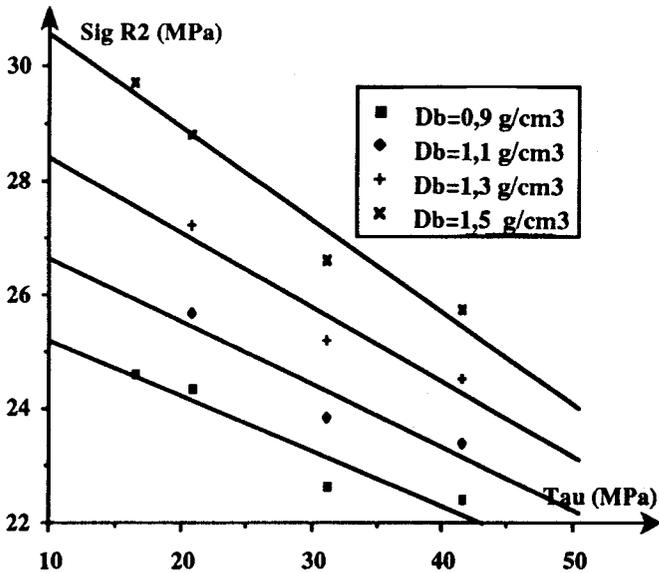


Figure B9.a : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0 et de la densité de boue
 IMAIL = 4 $\sigma_A = 50$ MPa

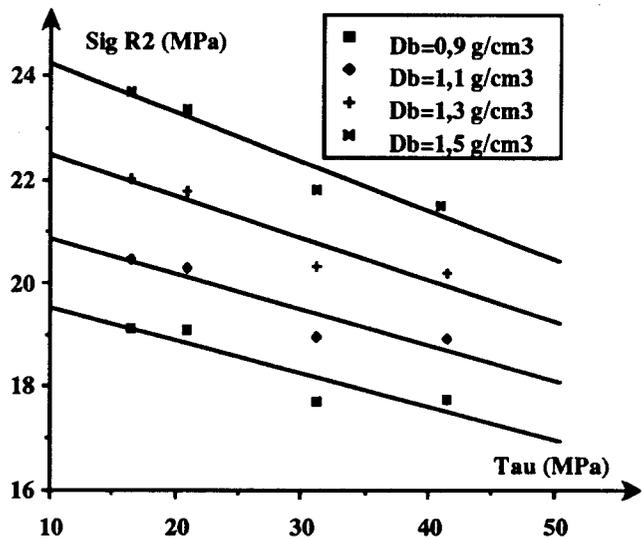


Figure B9.b : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0 et de la densité de boue
 IMAIL = 6 $\sigma_A = 50$ MPa

ANNEXE B3 : INFLUENCE DU RAPPORT DES RAYONS DU
CAROTTIER

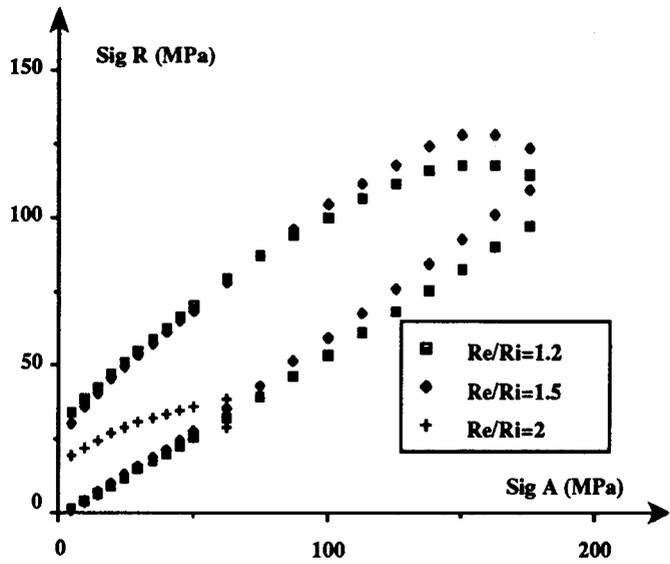


Figure B10.a : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de la profondeur et de R_e/R_i
 IMAIL = 4 densité de boue = 1,5 g/cm³

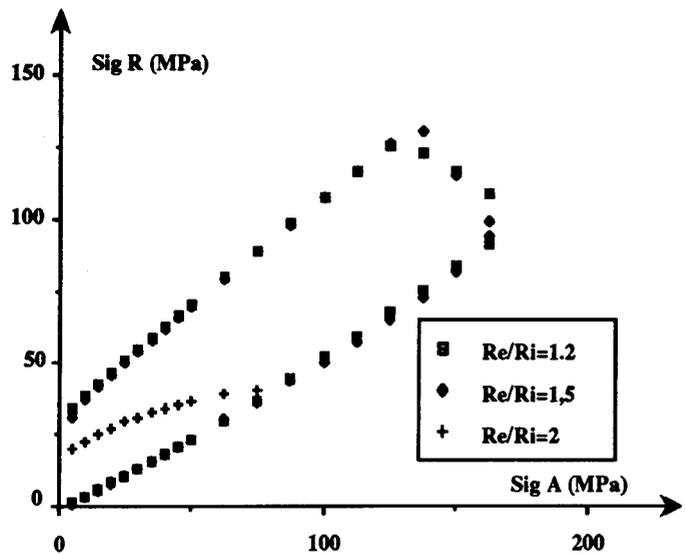


Figure B10.b : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de la profondeur et de R_e/R_i
 IMAIL = 5 densité de boue = 1,5 g/cm³

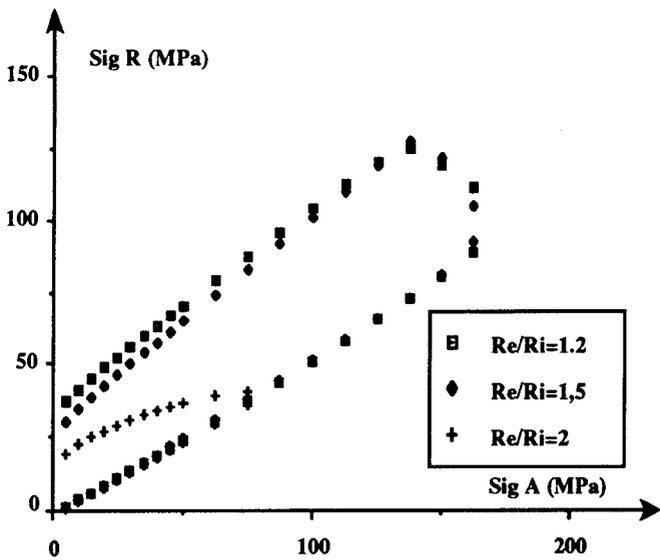


Figure B10.c : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de la profondeur et de R_e/R_i
 IMAIL = 6 densité de boue = 1,5 g/cm³

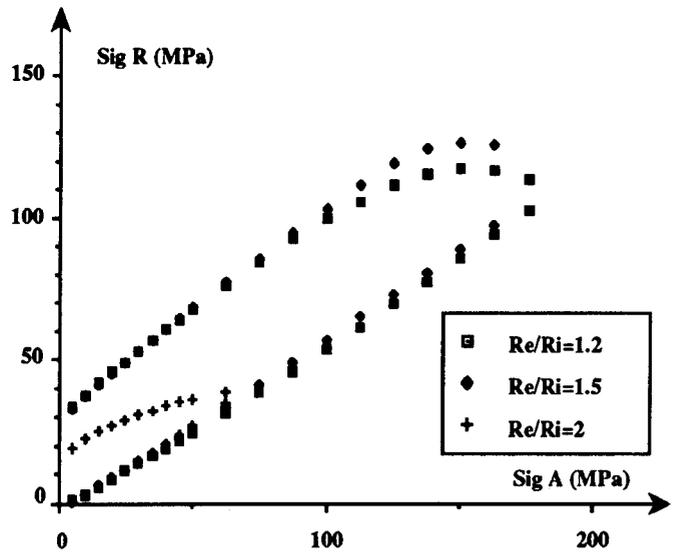


Figure B10.d : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de la profondeur et de R_e/R_i
 IMAIL = 7 densité de boue = 1,5 g/cm³

ANNEXE B4 : INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR

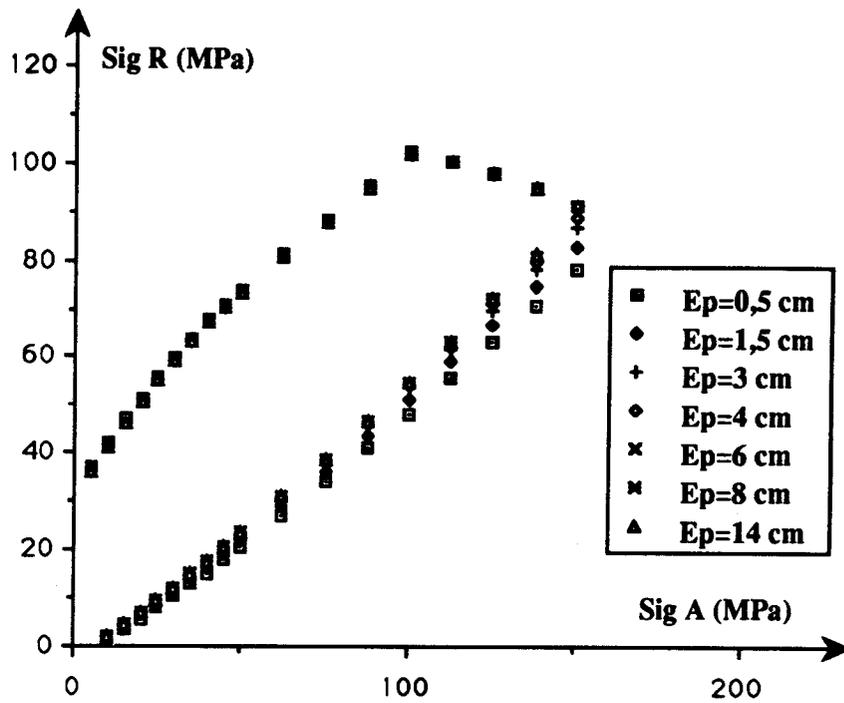


Figure B11.a : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de la profondeur et de l'épaisseur des disques
 IMAIL = 3 densité de boue = 1,5 g/cm³

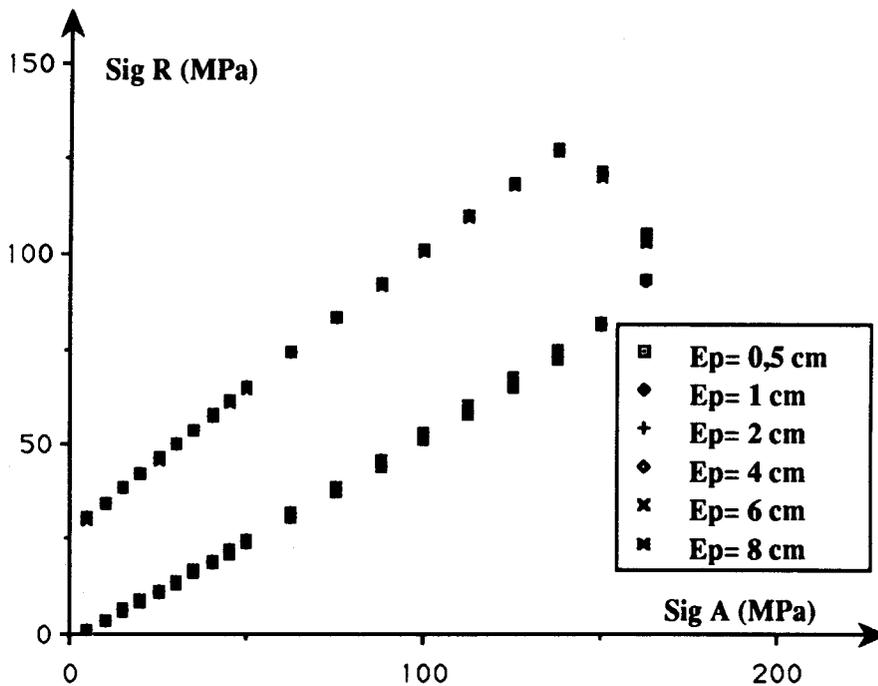


Figure B11.b : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de la profondeur et de l'épaisseur des disques
 IMAIL = 6 densité de boue = 1,5 g/cm³

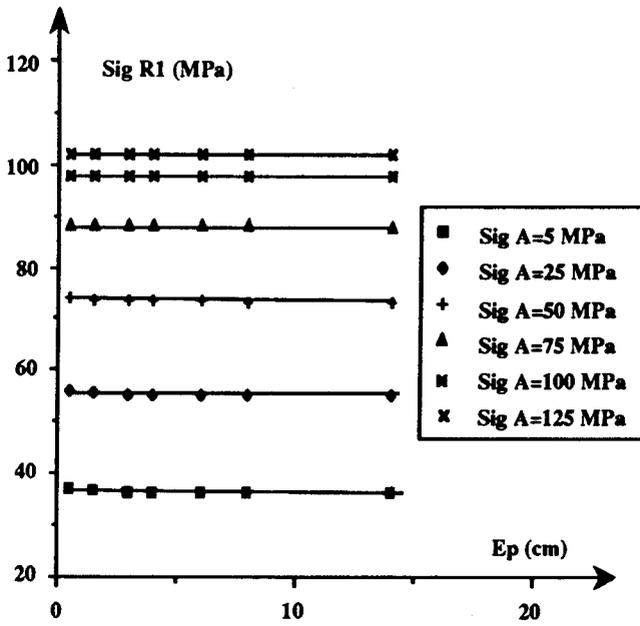


Figure B12.a : $\sigma_{R1} = f(Ep)$
 IMAIL 3 densité de boue = 1,5 g cm³

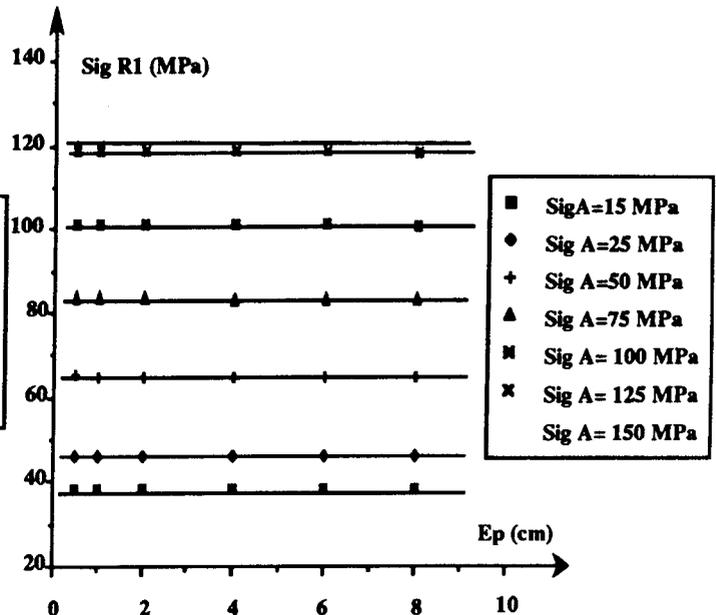


Figure B12.b : $\sigma_{R1} = f(Ep)$
 IMAIL 6 densité de boue = 1,5 g cm³

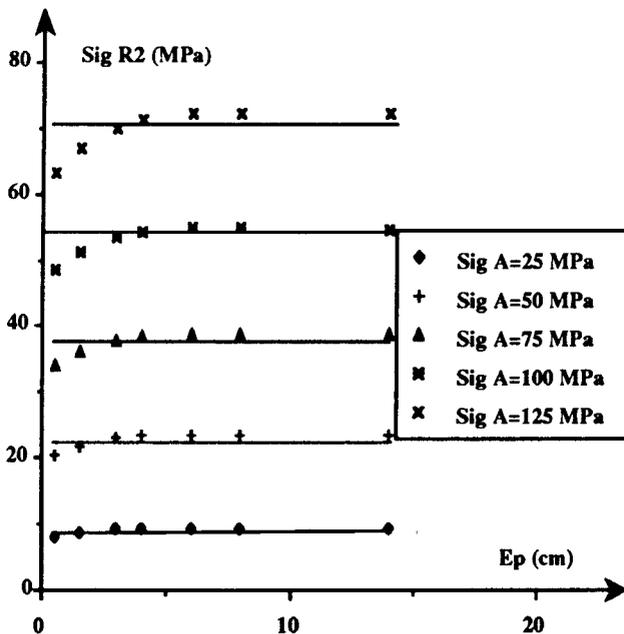


Figure B13.a : $\sigma_{R2} = f(Ep)$
 IMAIL 3 densité de boue = 1,5 g cm³

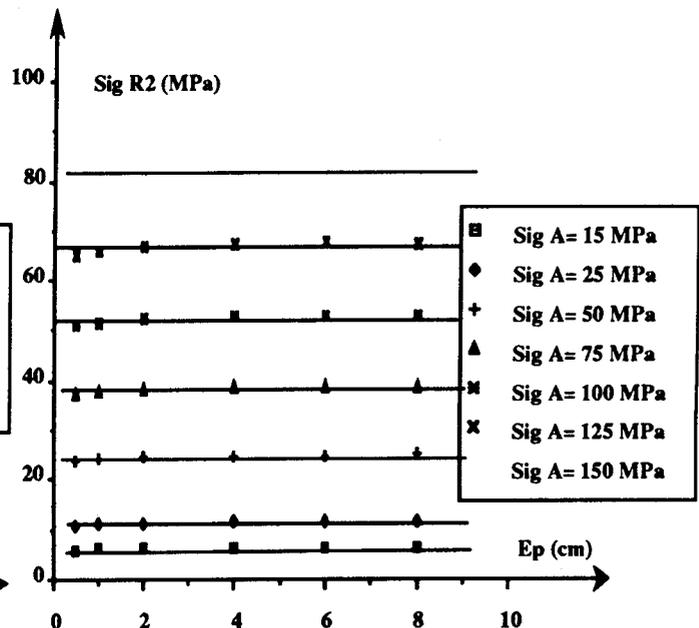


Figure B13.b : $\sigma_{R2} = f(Ep)$
 IMAIL 6 densité de boue = 1,5 g cm³

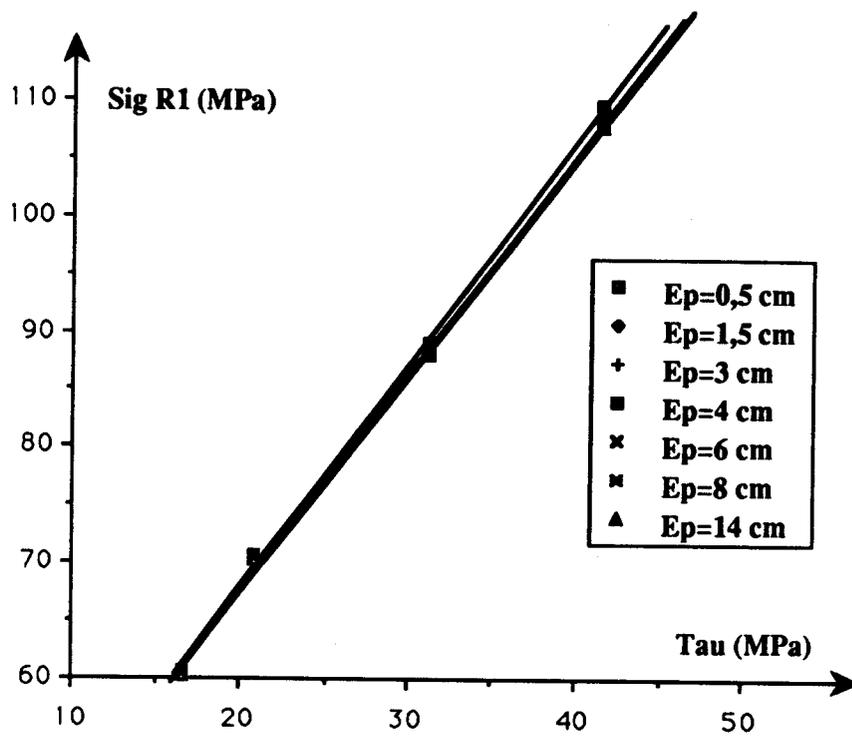


Figure B14.a : $\sigma_{R1} = f(\tau_o)$
 IMAIL = 3 densité de boue = 1,5 g/cm³

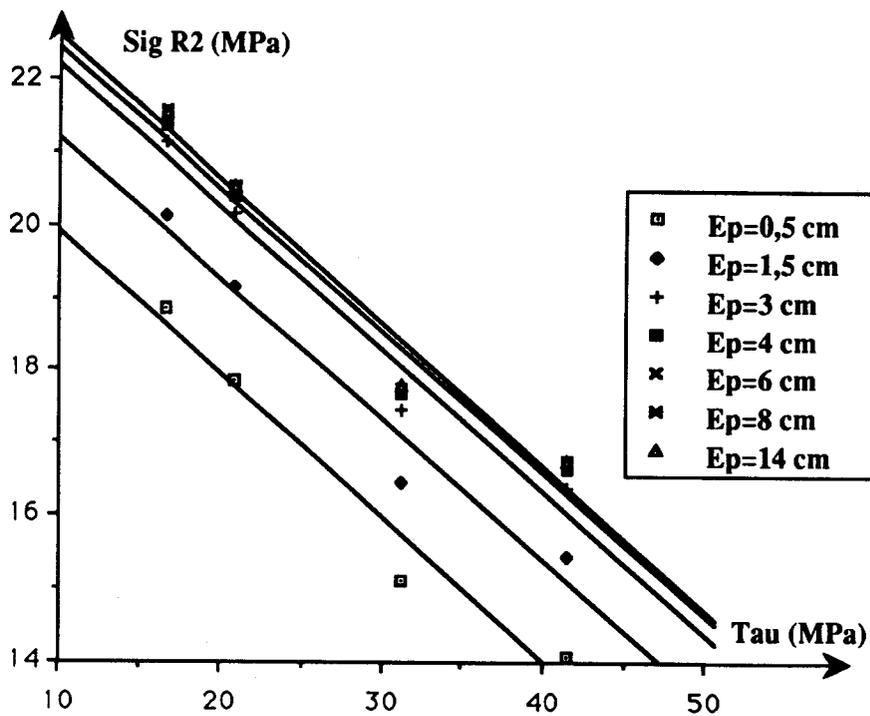


Figure B14.b : $\sigma_{R2} = f(\tau_o)$
 IMAIL = 3 densité de boue = 1,5 g/cm³

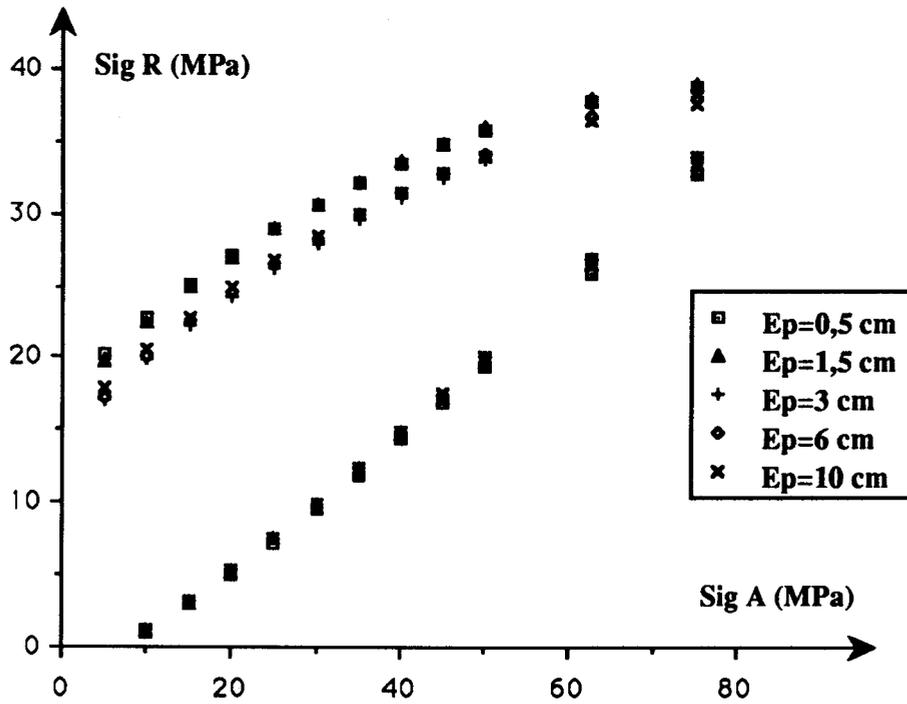


Figure B15.a : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de la profondeur et de l'épaisseur des disques
 IMAIL = 3 densité de boue = 1,5 g/cm³

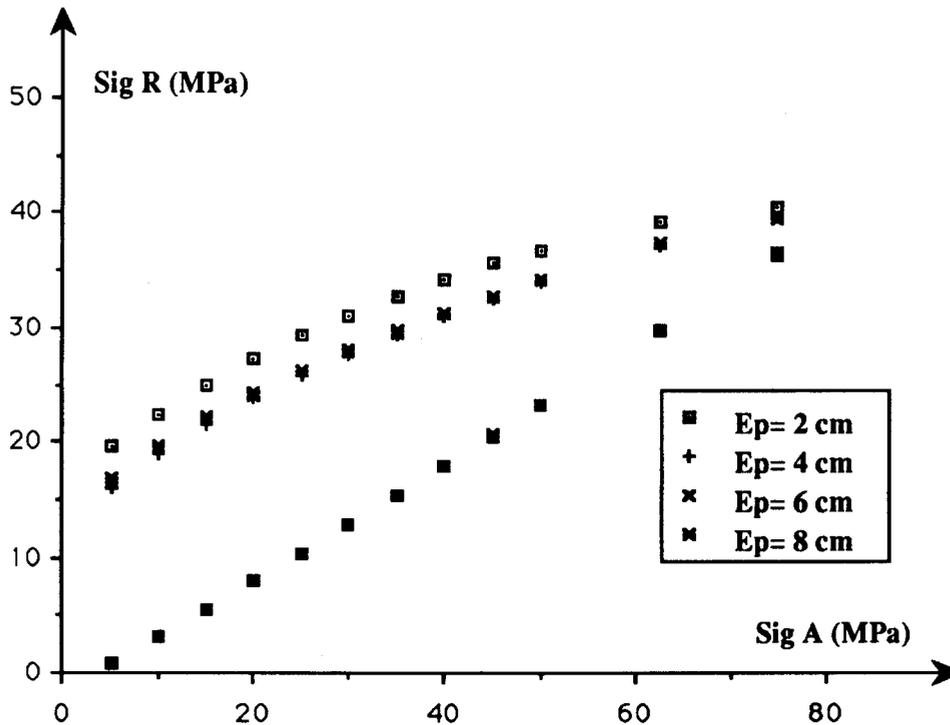


Figure B15.b : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de la profondeur et de l'épaisseur des disques
 IMAIL = 6 densité de boue = 1,5 g/cm³

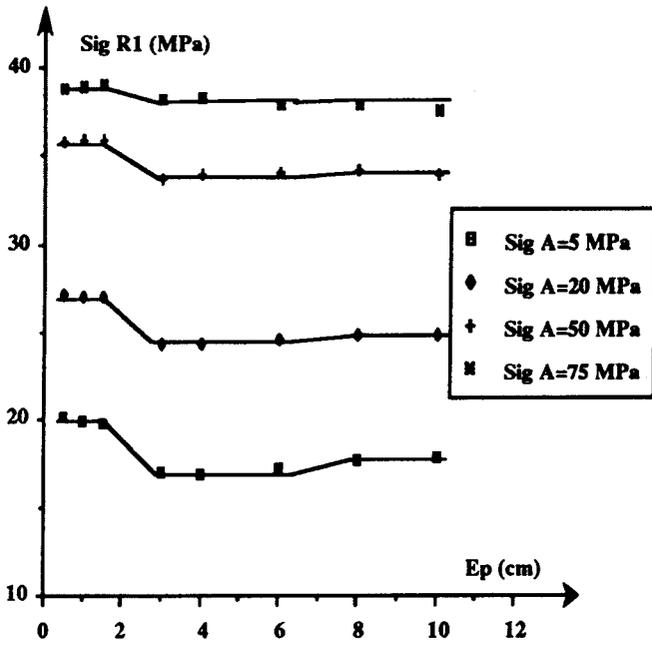


Figure B16.a : $\sigma_{R1} = f(Ep)$
 IMAIL 3 densité de boue = 1,5 g cm³

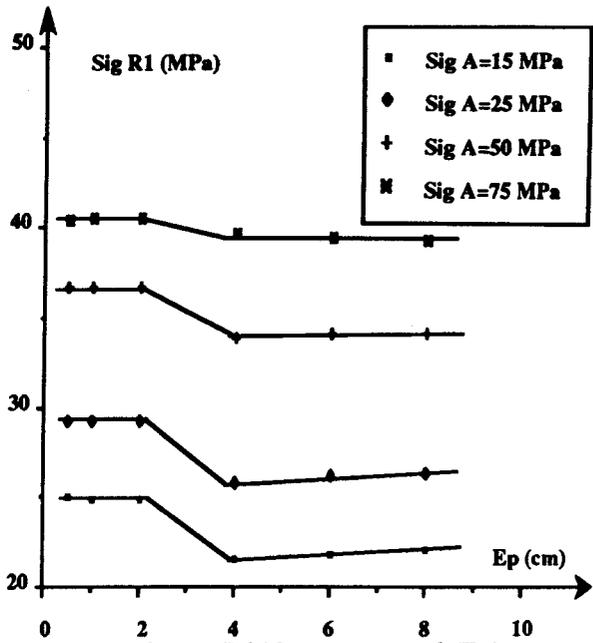


Figure B16.b : $\sigma_{R1} = f(Ep)$
 IMAIL 6 densité de boue = 1,5 g cm³

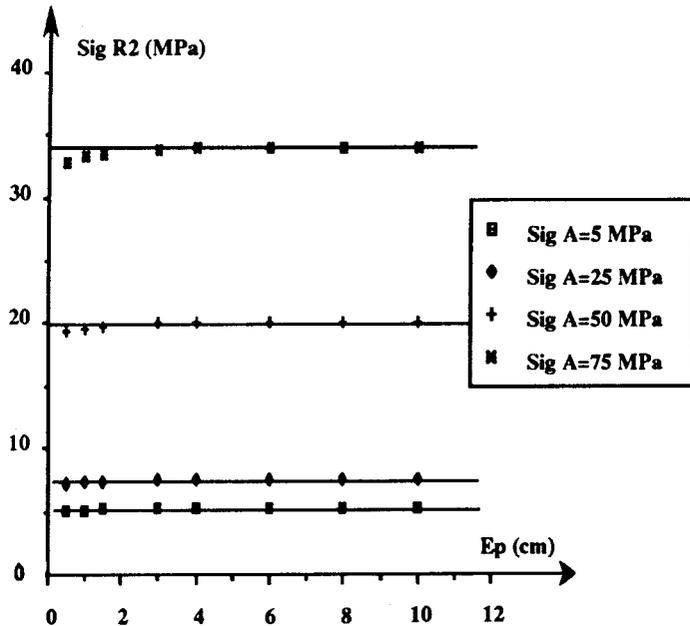


Figure B17.a : $\sigma_{R2} = f(Ep)$
 IMAIL 3 densité de boue = 1,5 g cm³

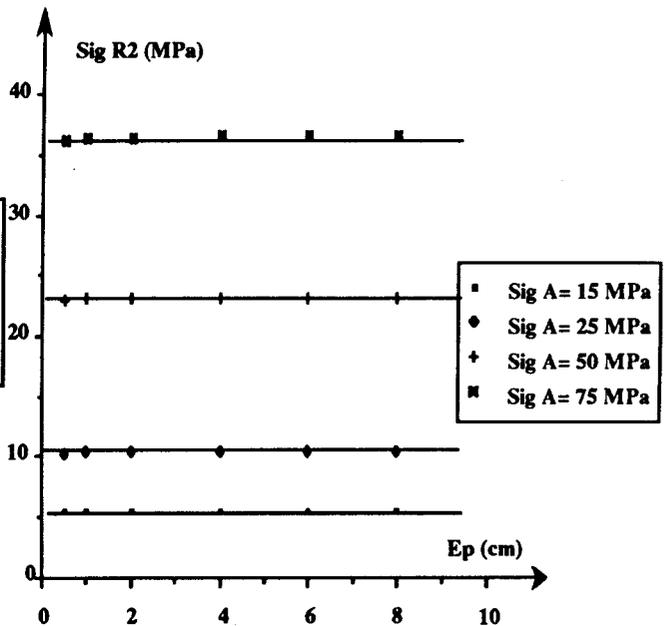


Figure B17.b : $\sigma_{R2} = f(Ep)$
 IMAIL 6 densité de boue = 1,5 g cm³

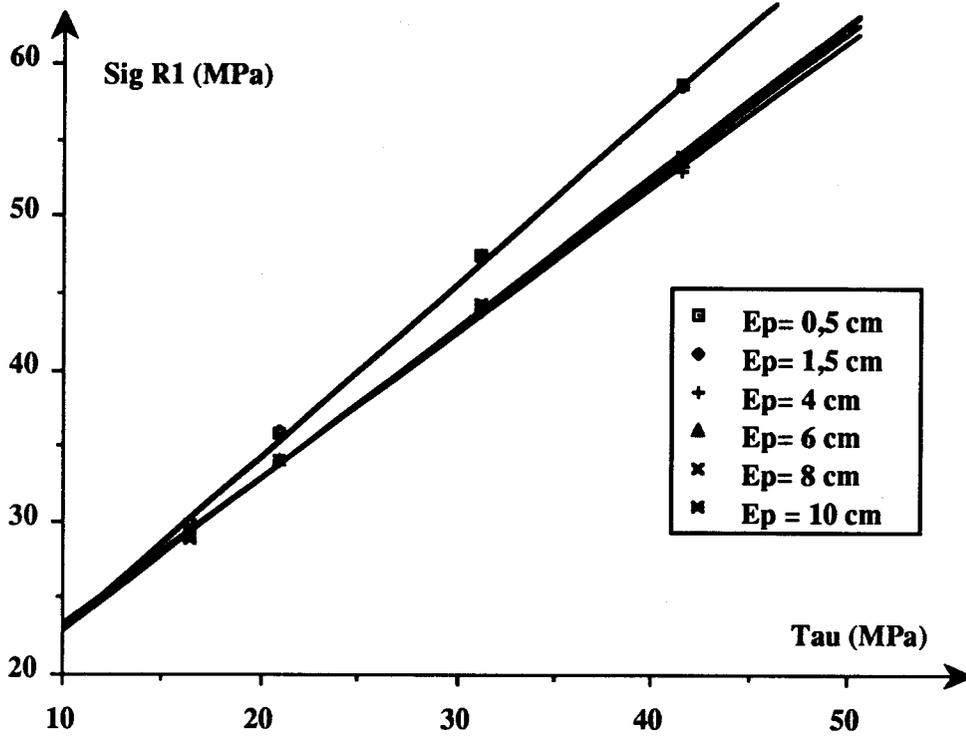


Figure B18.a : $\sigma_{R1} = f(\tau_o)$
 IMAIL = 3 densité de boue = 1,5 g/cm³

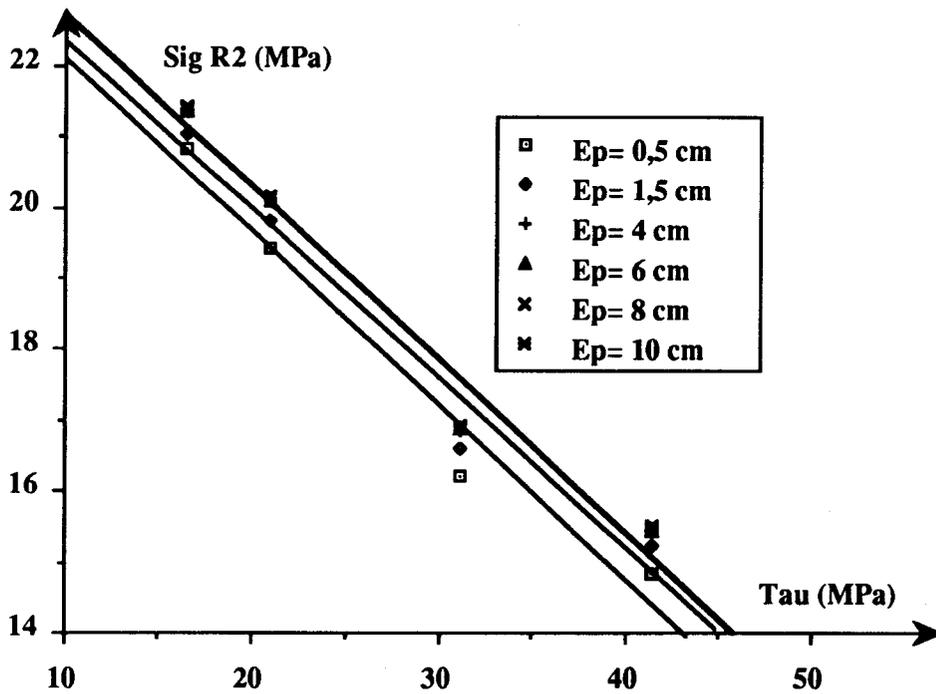


Figure B18.b : $\sigma_{R2} = f(\tau_o)$
 IMAIL = 3 densité de boue = 1,5 g/cm³

ANNEXE B5 : INFLUENCE DE LA FORME DU CAROTTIER

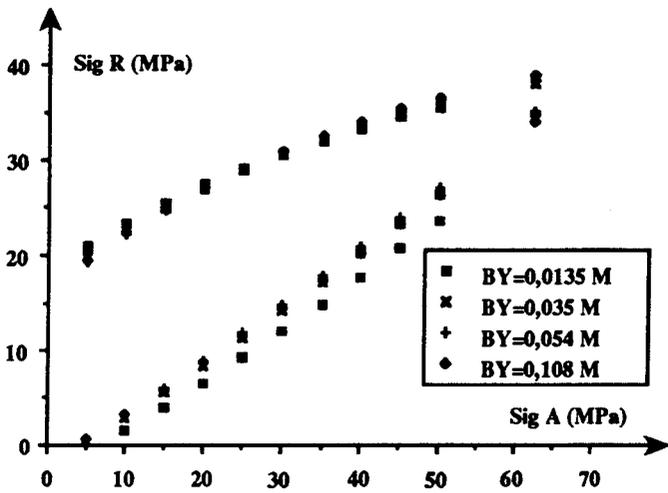


Figure B19.a : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de BY et de la profondeur
 IMAIL = 4, $R_e/R_i = 2$, $R_T = 5,3$ MPa, $R_C = - 76,5$ MPa

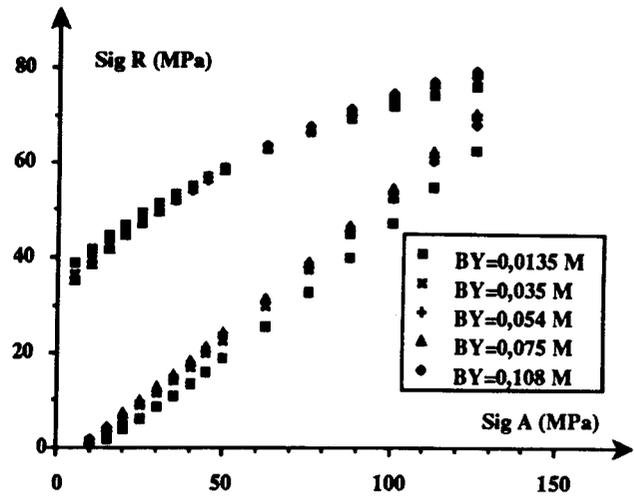


Figure B19.b : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de BY de la profondeur
 IMAIL = 4, $R_e/R_i = 2$, $R_T = 9$ MPa, $R_C = - 157$ MPa

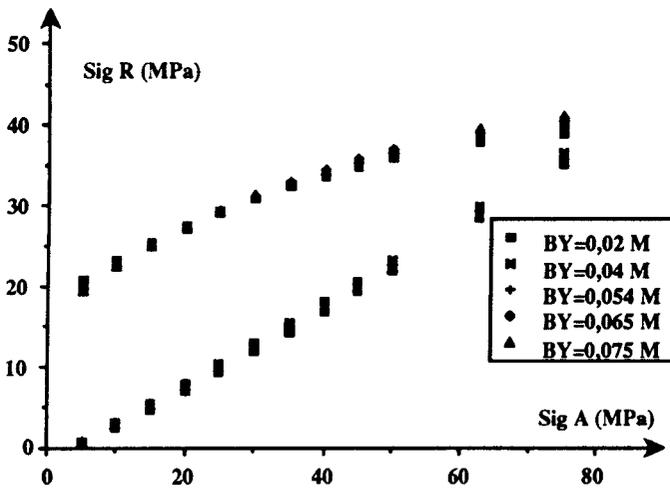


Figure B19.c : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de BY et de la profondeur
 IMAIL = 6, $R_e/R_i = 2$, $R_T = 5,3$ MPa, $R_C = - 76,5$ MPa

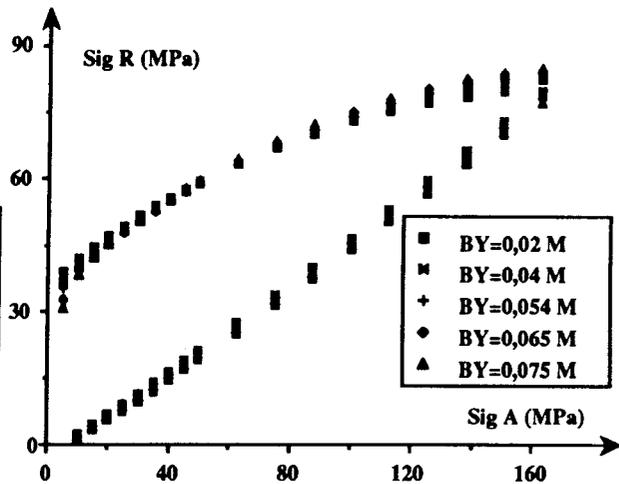


Figure B19.d : Variation de σ_{R1} σ_{R2} en fonction de BY de la profondeur
 IMAIL = 6, $R_e/R_i = 2$, $R_T = 9$ MPa, $R_C = - 157$ MPa

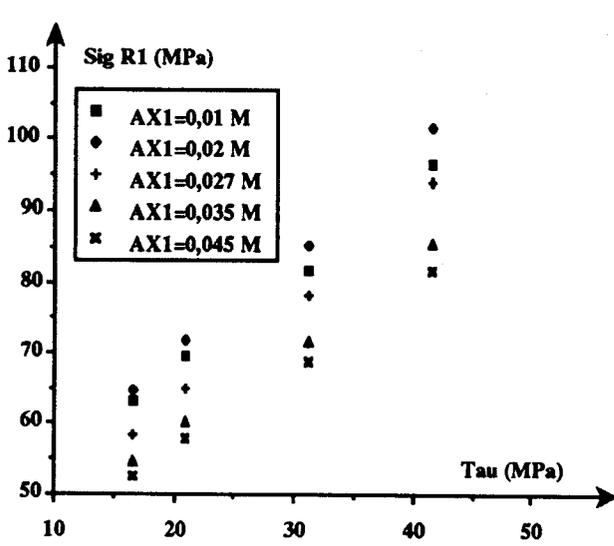


Figure B20.a : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0 et de AX1
 IMAIL = 6, $\sigma_A = 50$ MPa, $R_e/R_i = 1.5$

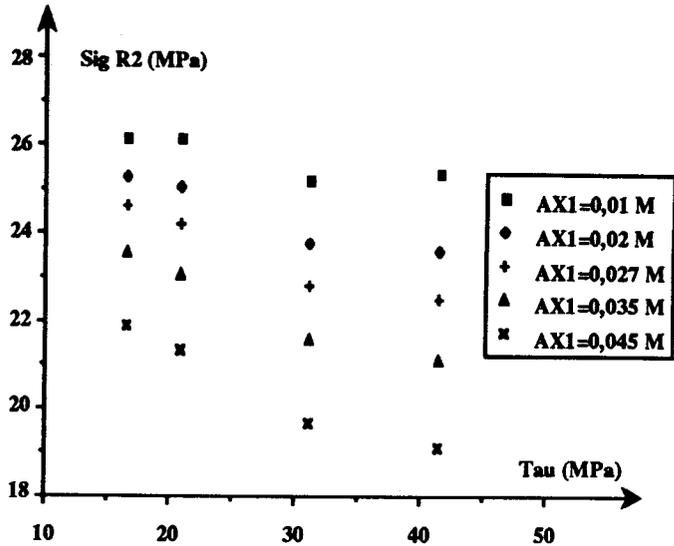


Figure B20.b : Variation de σ_{R2} en fonction de τ_0 et de AX1
 IMAIL = 6, $\sigma_A = 50$ MPa, $R_e/R_i = 1.5$

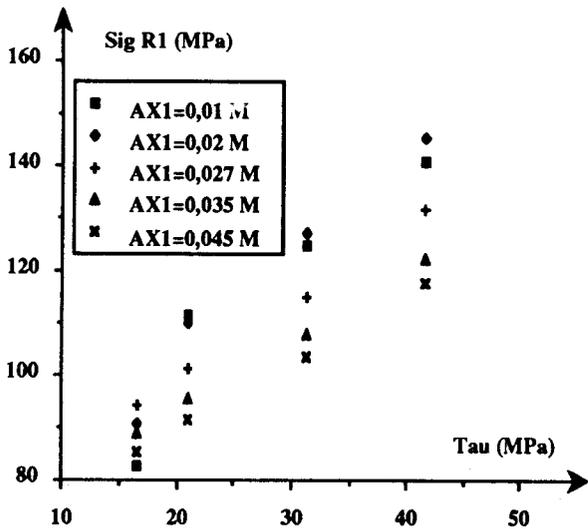


Figure B20.c : Variation de σ_{R1} en fonction de τ_0 et de AX1
 IMAIL = 6, $\sigma_A = 100$ MPa, $R_e/R_i = 1.5$

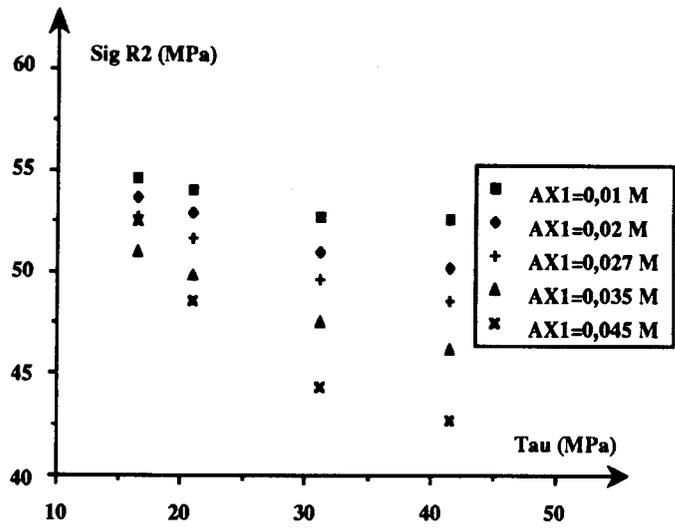


Figure B20.d : Variation de σ_{R2} en fonction de τ_0 et de AX1
 MAIL = 6, $\sigma_A = 100$ MPa, $R_e/R_i = 1.5$

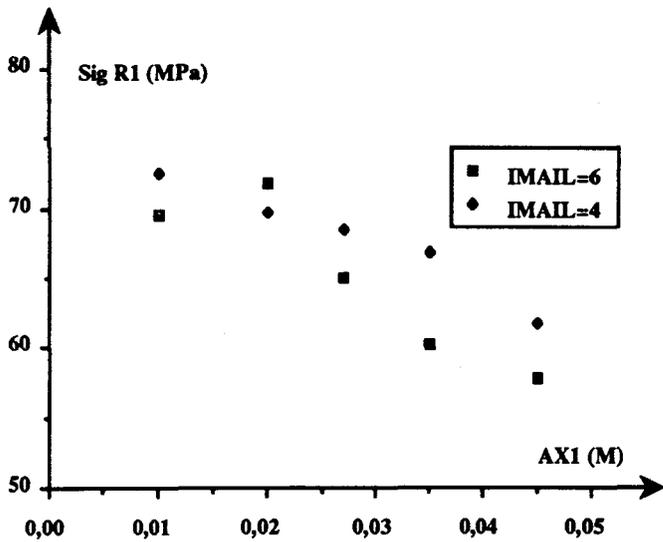


Figure B21.a : Variation de σ_{R1} en fonction de AX1 et de IMAIL

$R_o/R_i = 1,5, \sigma_A = 50 \text{ MPa}, R_T = 5,3 \text{ MPa}, R_C = -76,5 \text{ MPa}$

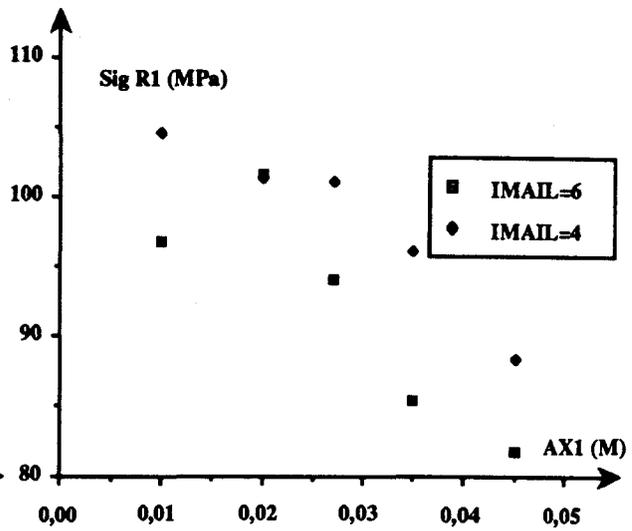


Figure B21.b : Variation de σ_{R1} en fonction de AX1 et de IMAIL

$R_o/R_i = 1,5, \sigma_A = 50 \text{ MPa}, R_T = 9 \text{ MPa}, R_C = -157 \text{ MPa}$

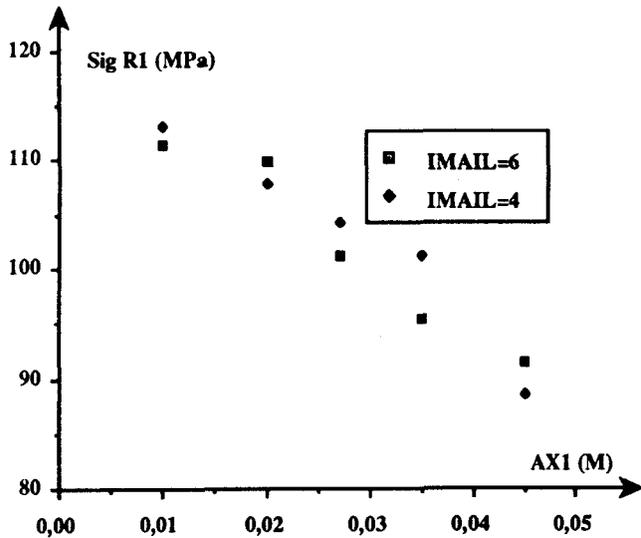


Figure B21.c : Variation de σ_{R1} en fonction de AX1 et de IMAIL

$R_o/R_i = 1,5, \sigma_A = 100 \text{ MPa}, R_T = 5,3 \text{ MPa}, R_C = -76,5 \text{ MPa}$

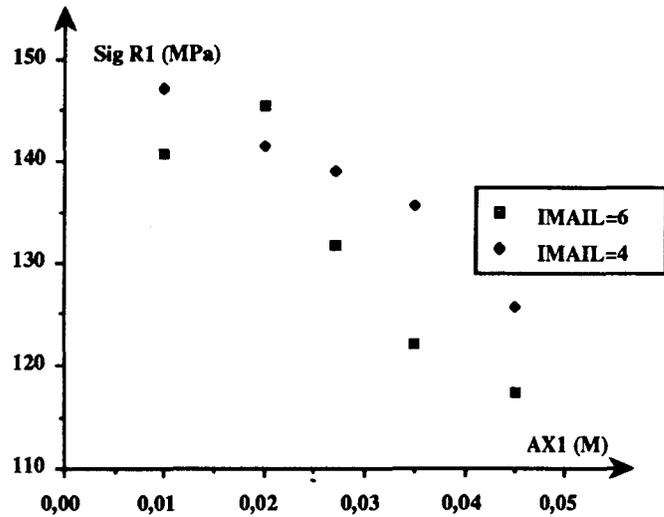


Figure B21.d : Variation de σ_{R1} en fonction de AX1 et de IMAIL

$R_o/R_i = 1,5, \sigma_A = 100 \text{ MPa}, R_T = 9 \text{ MPa}, R_C = -157 \text{ MPa}$

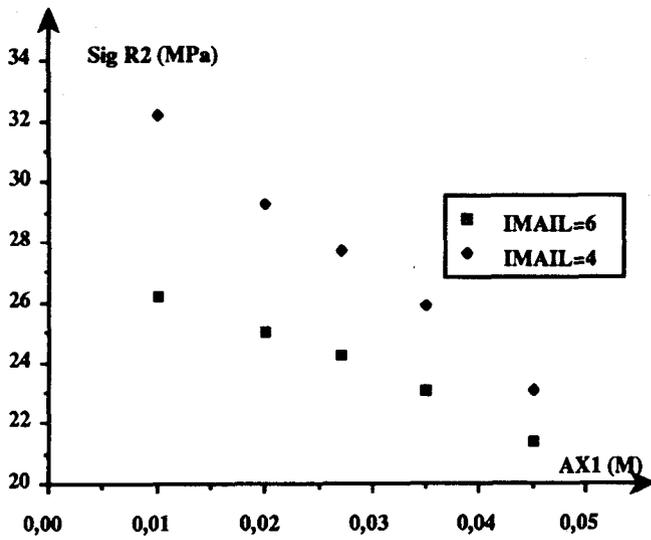


Figure B22.a : Variation de σ_{R2} en fonction de AX1 et de IMAIL

$R_e/R_i = 1.5, \sigma_A = 50 \text{ MPa}, R_T = 5.3 \text{ MPa}, R_C = -76.5 \text{ MPa}$

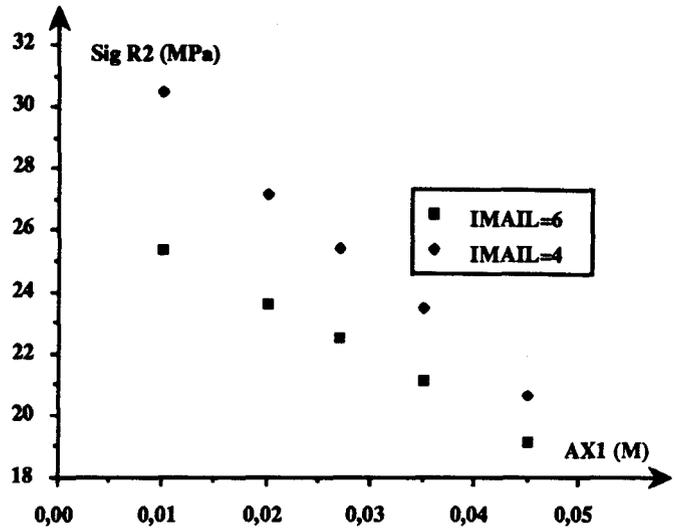


Figure B22.b : Variation de σ_{R2} en fonction de AX1 et de IMAIL

$R_e/R_i = 1.5, \sigma_A = 50 \text{ MPa}, R_T = 9 \text{ MPa}, R_C = -157 \text{ MPa}$

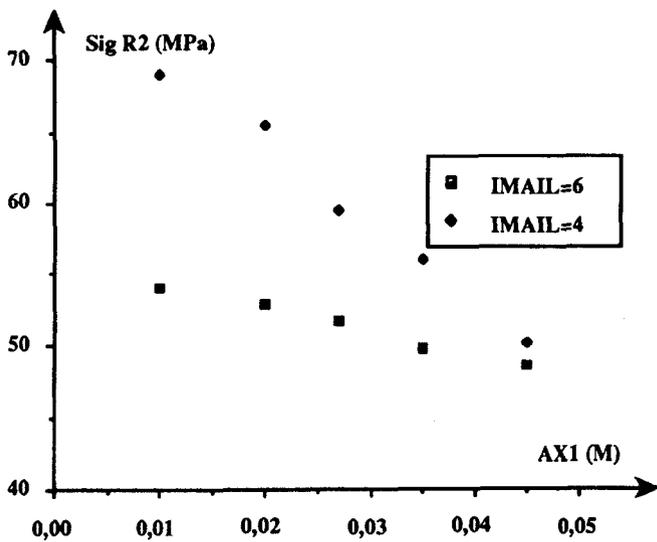


Figure B22.c : Variation de σ_{R2} en fonction de AX1 et de IMAIL

$R_e/R_i = 1.5, \sigma_A = 100 \text{ MPa}, R_T = 5.3 \text{ MPa}, R_C = -76.5 \text{ MPa}$

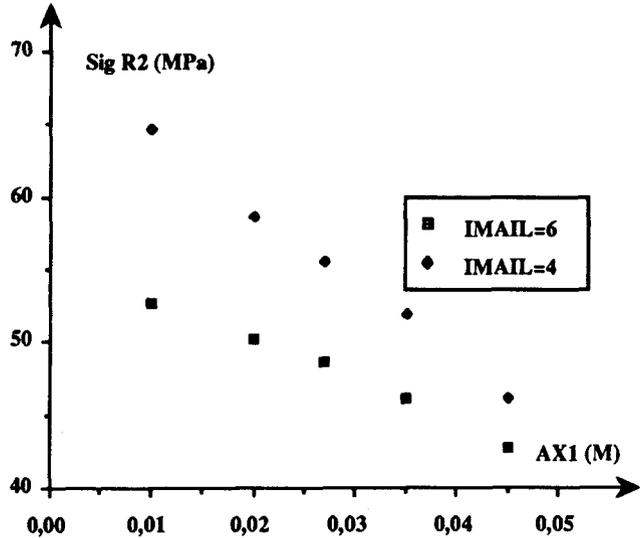


Figure B22.d : Variation de σ_{R2} en fonction de AX1 et de IMAIL

$R_e/R_i = 1.5, \sigma_A = 100 \text{ MPa}, R_T = 9 \text{ MPa}, R_C = -157 \text{ MPa}$

ANNEXE C : FORME DES DISQUES

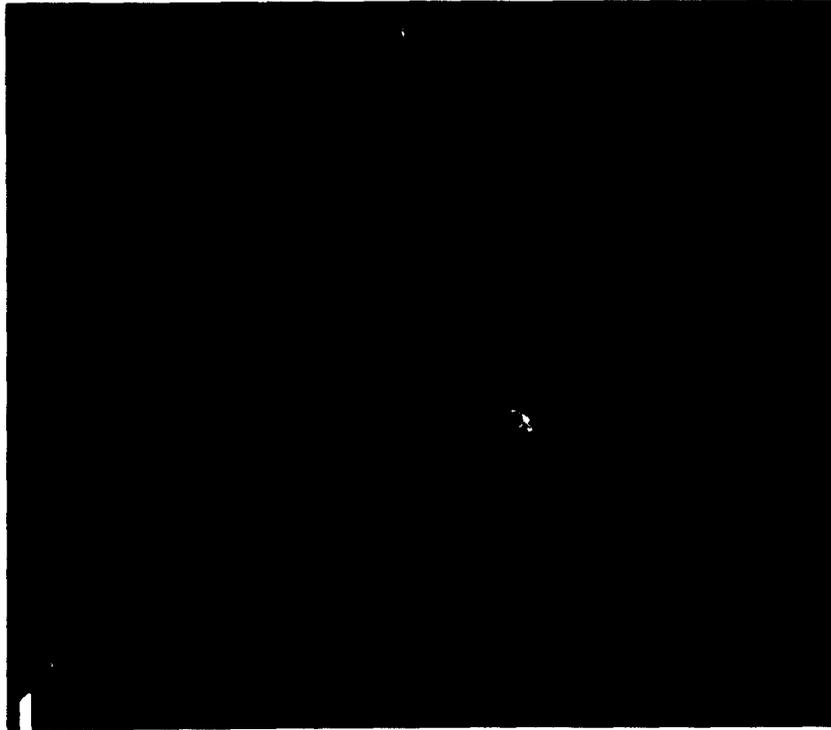


Figure C1.a : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ ep. = 4 cm

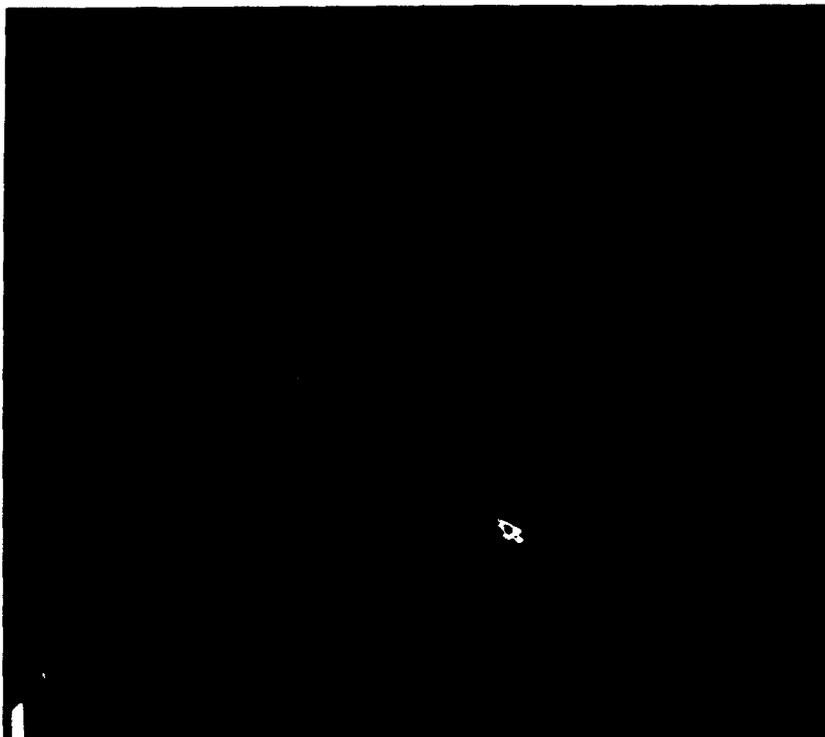


Figure C1.b : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ ep. = 10 cm

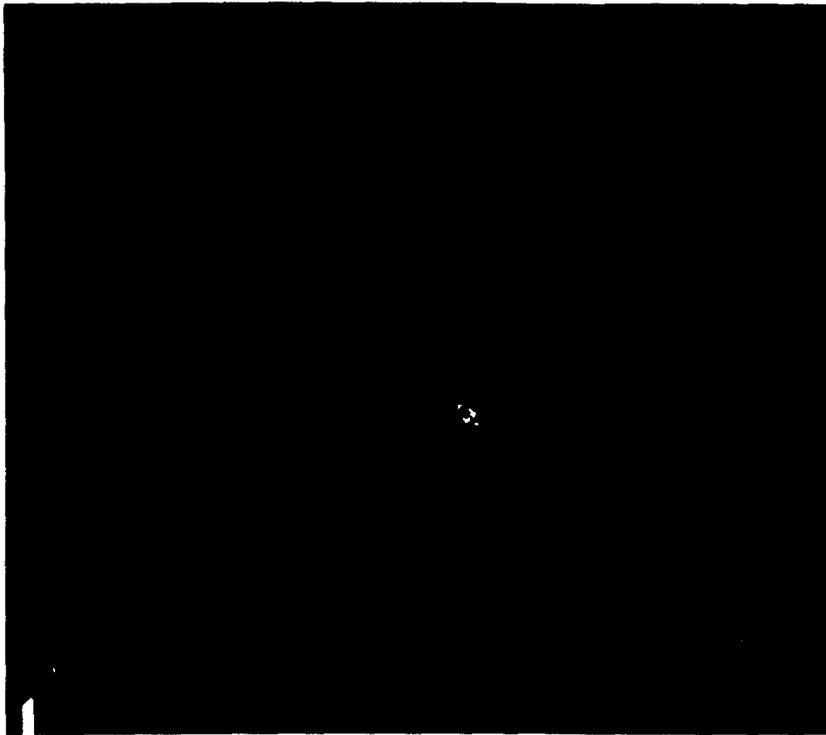


Figure C2.a : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ ep. = 4 cm



Figure C2.b : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ ep. = 10 cm

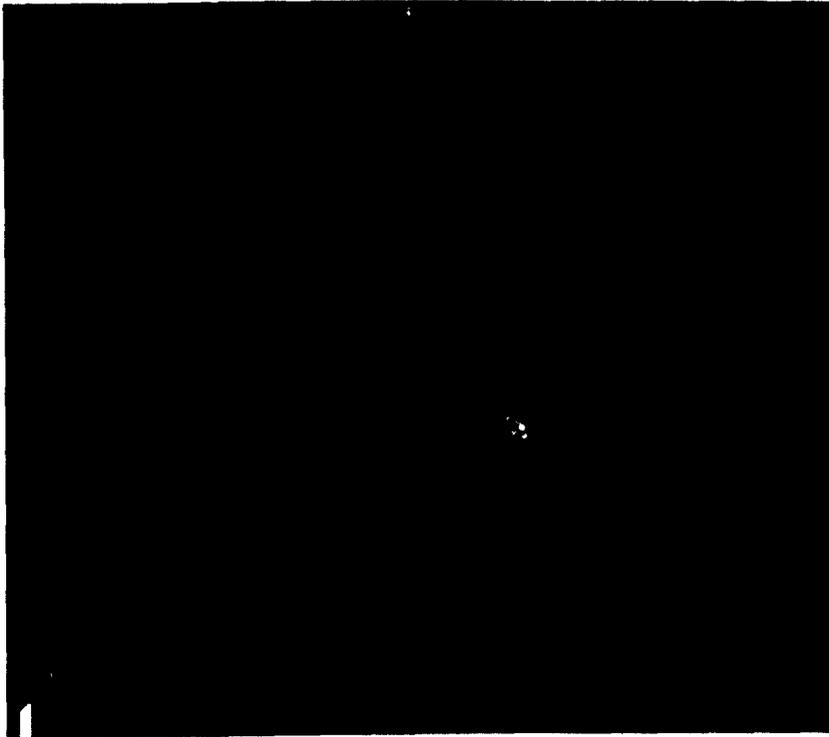


Figure C3.a : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ $\sigma_A = 50$ MPa

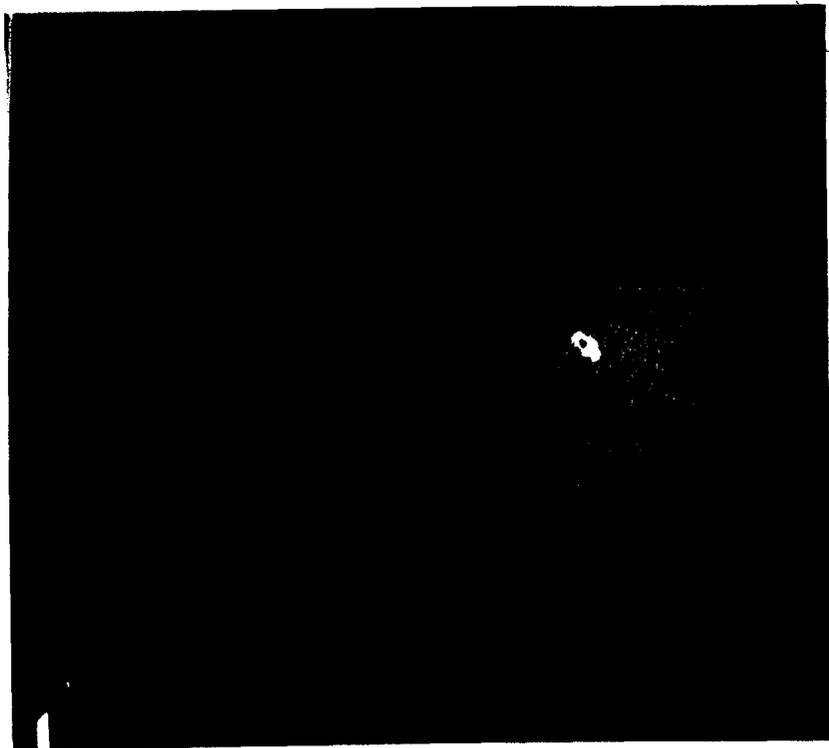


Figure C3.b : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ $\sigma_A = 100$ MPa



Figure C4.a : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ $\sigma_A = 50$ MPa

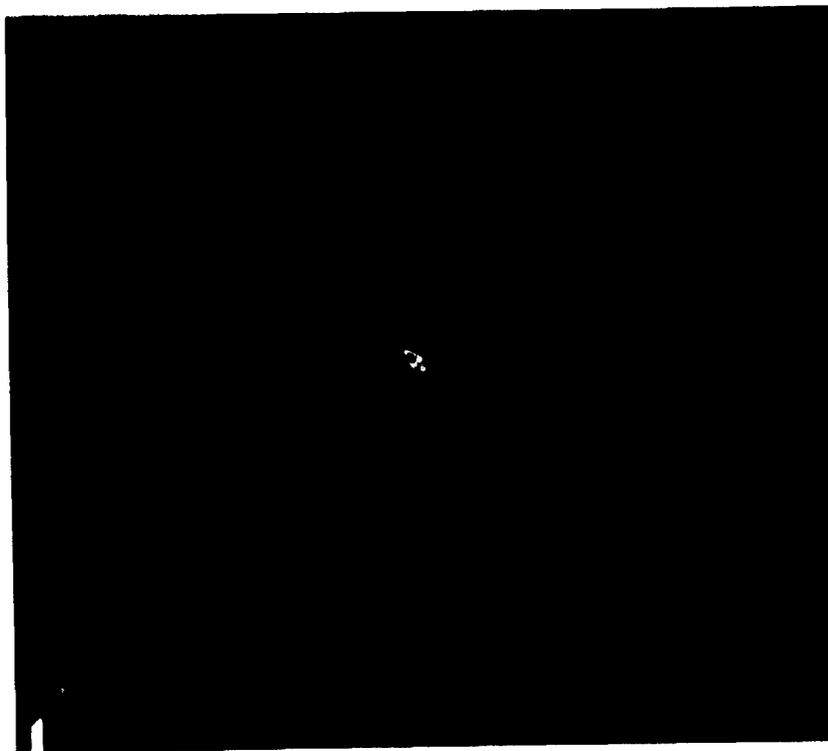


Figure C4.b : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ $\sigma_A = 100$ MPa

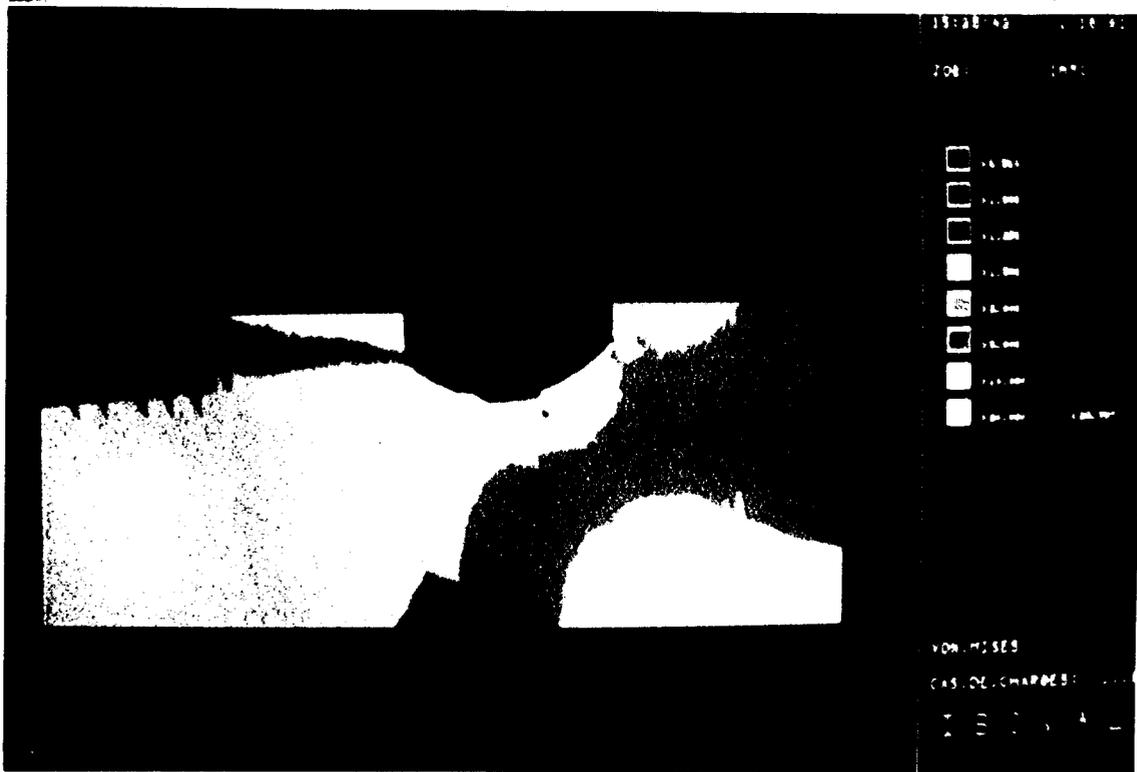


Figure C5.a : Courbes isocritères correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ BY = AX1/2



Figure C5.b : Courbes isocritères correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_o/R_i = 1.5$ BY = 4 x AX1

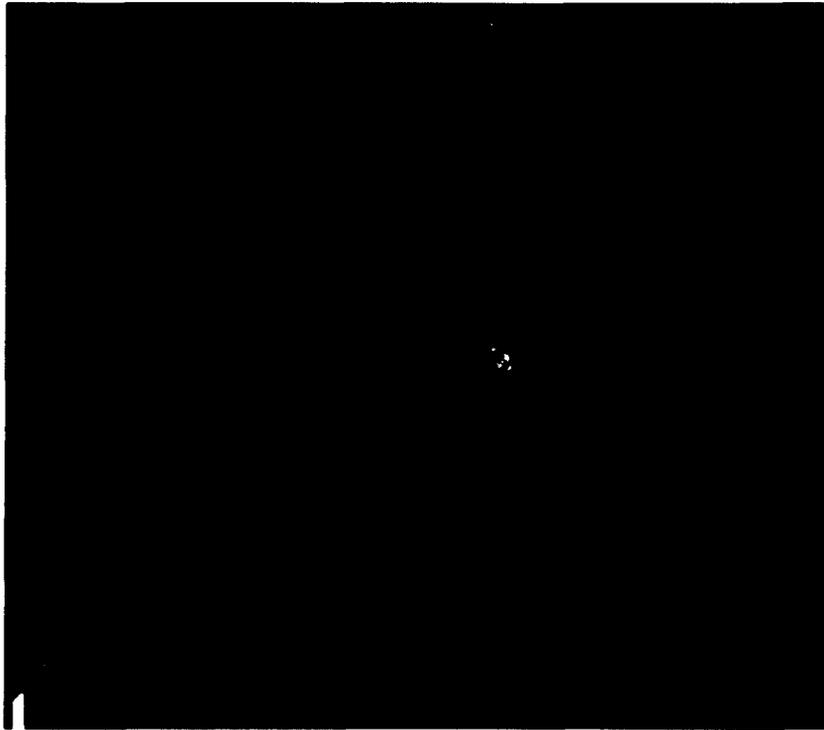


Figure C6.a : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ $BY = AX1/2$

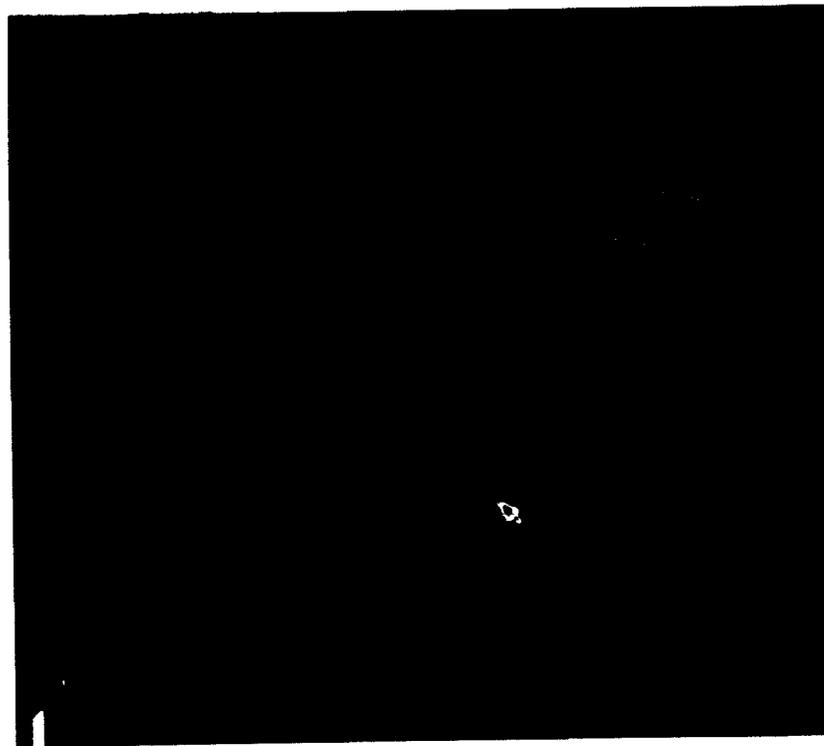


Figure C6.b : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R1}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ $BY = 4 \times AX1$

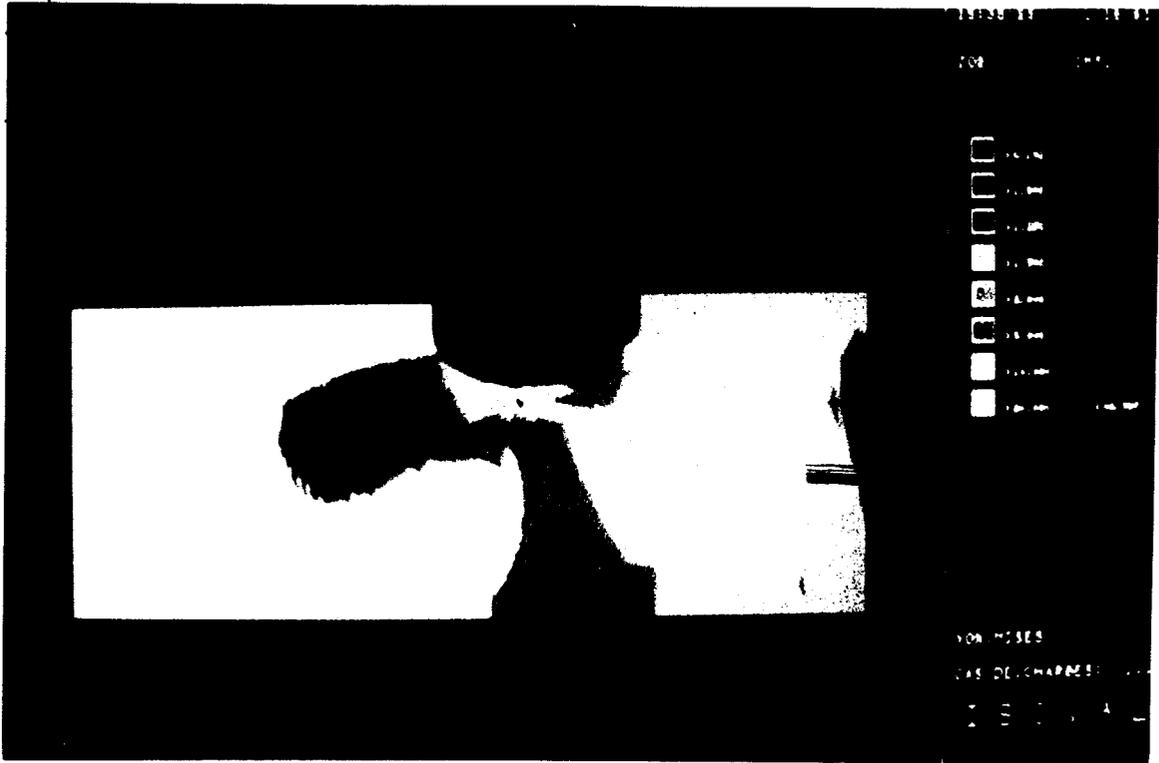


Figure C7.a : Courbes isocritères correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ BY = AX1/2

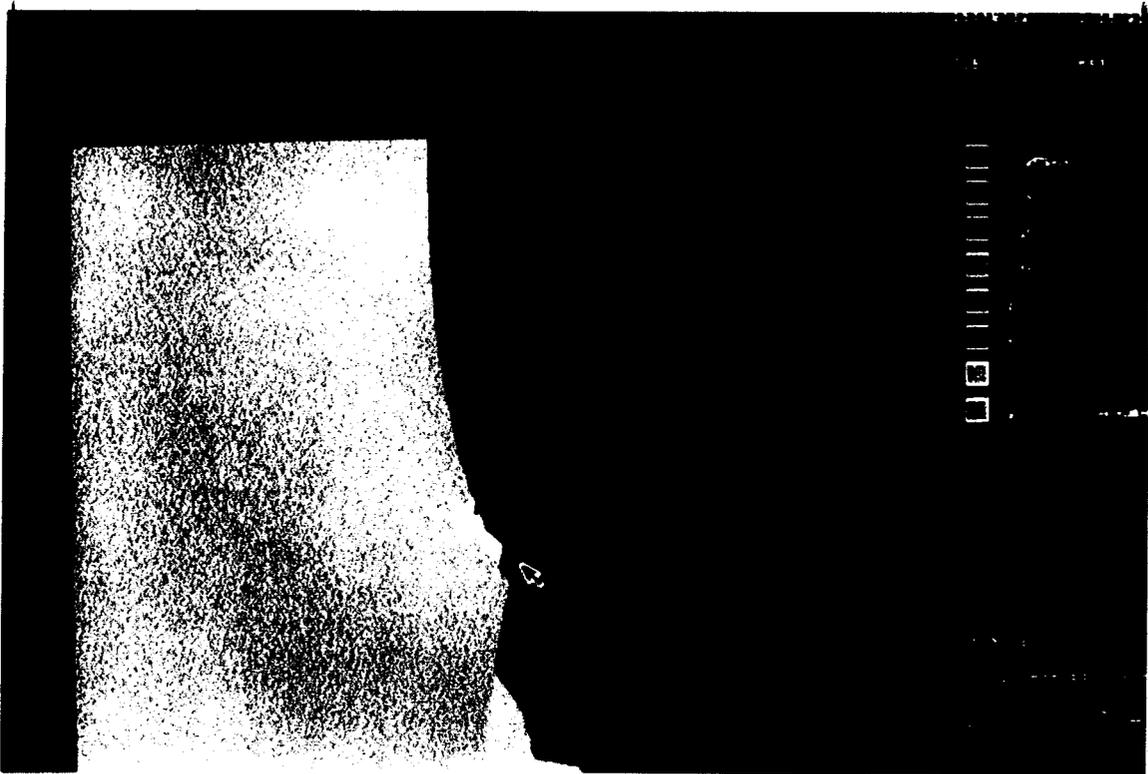


Figure C7.b : Courbes isocritères correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ BY = 4 x AX1

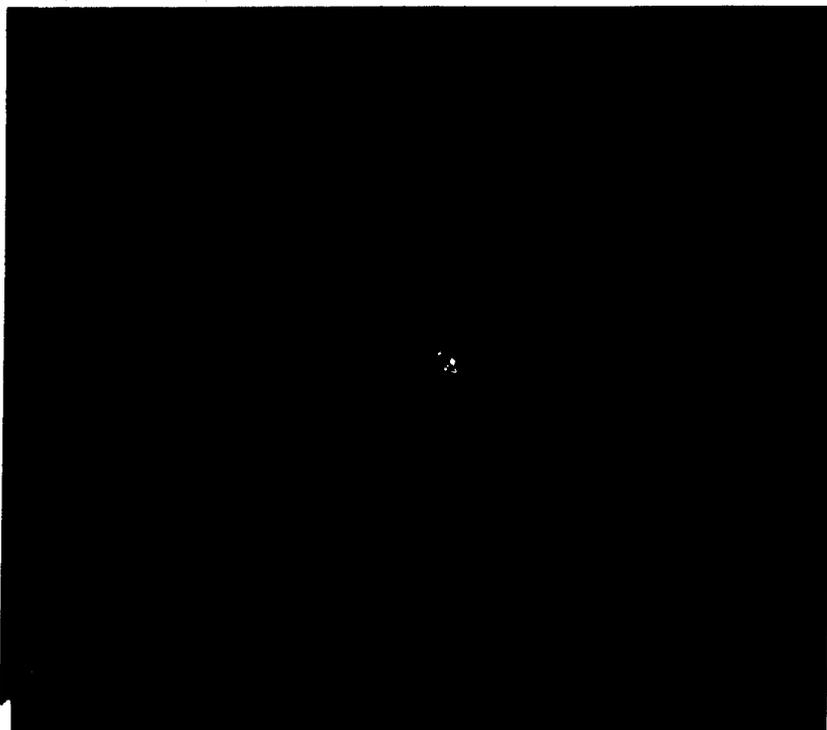


Figure C8.a : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ BY = AX1/2



Figure C8.b : Direction des contraintes principales correspondant à σ_{R2}
IMAIL = 5 $R_e/R_i = 1.5$ BY = 4 x AX1

MODELISATION DE L'INITIALISATION DU DISCAGE PAR ELEMENTS FINIS :
ELABORATION D'UNE METHODE D'OPTIMISATION DU CAROTTAGE.

Véronique VENET

Un problème essentiel en Mécanique des Roches appliquée au Génie Pétrolier est la connaissance des contraintes in-situ à de grandes profondeurs, connaissance qui permettrait de prévoir, et donc d'optimiser la stabilité des puits. Le thème de notre recherche est l'étude du discage lorsque celui-ci apparaît dans les carottes pétrolières ; ce phénomène se révèle être un moyen peu coûteux pour estimer les contraintes in-situ.

Notre travail s'est décomposé en deux parties.

Dans un premier temps, un programme en éléments finis (DISCAGELF), en symétrie de révolution, a été mis au point. Une discrétisation automatique du domaine, ainsi que la possibilité d'effectuer des loupes sur la zone à haute probabilité de rupture, assurent son accessibilité et son implantation éventuelle sur des micro-ordinateurs de type P.C. Une validation de ce logiciel, à partir d'essais effectués sur le triaxial vrai de Lille (sans pression de boue), et sur la machine à disquer du CERCHAR (avec simulation de la pression de boue) a ensuite été effectuée. Les résultats expérimentaux coïncident avec les valeurs obtenues par DISCAGELF.

Dans la seconde partie, nous présenterons les résultats numériques, relatifs à l'influence des paramètres (caractéristiques géomécaniques de la roche, densité de la boue, rapport des rayons du carottier, épaisseur de la carotte, type et forme de l'outil de forage, poids sur l'outil) sur les contraintes d'initialisation de discage et sur la position du point d'initialisation de la rupture. Nous avons ainsi principalement mis en évidence que :

- deux contraintes radiales délimitant un domaine de non discage (à contrainte axiale fixée) provoquent la rupture,
- le point d'initialisation du discage peut se situer à trois endroits distincts selon les valeurs du jeu de paramètres entré (le mode de rupture étant différent),
- la variation des contraintes radiales de discage en fonction de l'épaisseur des disques permet de répertorier trois familles de disques selon les épaisseurs mais ce phénomène dépend du rapport des rayons du carottier.



Mots Clés : Discage - Contraintes in-situ - Méthodes numériques - Eléments Finis - Validation - Pression de boue
Epaisseur - Forme des disques.