

**Titre:** Application de la méthode inverse à l'interprétation de mesures de contraintes in situ avec la technique du doorstopper modifié  
Title: Application de la méthode inverse à l'interprétation de mesures de contraintes in situ avec la technique du doorstopper modifié

**Auteur:** Simon Delattre  
Author:

**Date:** 2017

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Delattre, S. (2017). Application de la méthode inverse à l'interprétation de mesures de contraintes in situ avec la technique du doorstopper modifié  
Citation: [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
<https://publications.polymtl.ca/2512/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/2512/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Robert Corthésy, & Maria-Helena Leite  
Advisors:

**Programme:** Génie minéral  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

APPLICATION DE LA MÉTHODE INVERSE À L'INTERPRÉTATION DE MESURES DE  
CONTRAINTE IN SITU AVEC LA TECHNIQUE DU DOORSTOPPER MODIFIÉ

SIMON DELATTRE

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE MINÉRAL)

AVRIL 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

APPLICATION DE LA MÉTHODE INVERSE À L'INTERPRÉTATION DE MESURES DE  
CONTRAINTE IN SITU AVEC LA TECHNIQUE DU DOORSTOPPER MODIFIÉ

présenté par : DELATTRE Simon

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées  
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BAUDRON Paul, Doctorat, président

M. CORTHÉSY Robert, Ph. D., membre et directeur de recherche

Mme LEITE Maria Helena, Ph. D., membre et codirectrice de recherche

Mme VÉZINA Caroline, M.Sc.A., membre

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier l'IRSST pour le soutien financier ainsi que mes professeurs pour l'aide qu'ils m'ont apportée pendant toute la durée de mon projet. Un merci tout particulier à ma famille qui m'a supporté tout au long de mes études.

## RÉSUMÉ

Ce mémoire traite de la détermination des contraintes in situ dans les massifs rocheux à partir de mesures faites avec le doorstopper modifié interprétées avec la méthode inverse. Il fait suite aux travaux de Ouellet (2012) et de Vézina (2014) qui ont respectivement généralisé les méthodes d'interprétation des mesures au doorstopper modifié pour les roches transversalement isotropes et étudié le potentiel de la méthode inverse comme nouvelle approche d'interprétation pour cette technique de mesure qui n'avait jusqu'ici été validée qu'en laboratoire sur des matériaux isotropes. L'objectif du présent travail consiste à appliquer la méthode inverse avec des résultats de mesures réalisées sur deux sites miniers.

En premier lieu, à l'aide de données de terrain, la comparaison entre les tenseurs trouvés avec les méthodes d'interprétation éprouvées et la méthode inverse est faite avec plusieurs mesures provenant de cellule du doorstopper modifié. L'interprétation de ces mesures a mis en lumière la grande influence que peut avoir la mesure de la progression de la saignée sur les contraintes estimées avec la méthode inverse.

En deuxième lieu, l'influence que peuvent avoir plusieurs éléments qui ne sont pas considérés dans la modélisation requise par la méthode inverse est analysée. Parmi ces éléments, notons entre autres la température, l'influence de la pression d'eau et du taillant ainsi que la présence d'un second coefficient de Poisson dans la roche. Enfin, l'effet d'une variation de déformabilité le long de l'axe de la carotte est étudié. Une méthodologie permettant de corriger l'effet de cette hétérogénéité est proposée.

## ABSTRACT

The subject of this thesis is the determination of rock mass in situ stresses from measurement performed with the modified doorstopper cell when interpreted using the inverse method. It follows the work of Ouellet (2012) and Vézina (2014) who have improved the stress calculation methods for transversely isotropic rock and proposed using the inverse method as a new way of interpreting field data obtained from the modified doorstopper technique. Up until now, these new approaches had only been validated with numerical and physical models. This work aims to apply these new interpretation methods with actual field data.

First, the comparison between the stress tensors found with one of the more commonly used methods and the inverse method is made using field measurements from the modified doorstopper technique. The data obtained show the importance of correctly measuring the drill bit advance while stress relief is in progress when interpreting the data using the inverse method.

Secondly, the influence various elements can have on the estimated stresses which are not considered in the numerical models used with the inverse method such as temperature, water pressure, drill bit pressure is analyzed. Subsequently, the influence of deformability heterogeneity along the borehole axis is studied and a methodology allowing to account for its effect on the estimated stresses is proposed.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT .....	v
TABLE DES MATIÈRES .....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES .....	xiv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	xxiv
LISTE DES ANNEXES .....	xxvii
<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte de l'étude.....	1
1.2 Objectif de l'étude .....	2
1.3 Structure du document.....	2
<b>CHAPITRE 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....</b>	<b>4</b>
2.1 Contraintes in situ.....	4
2.2 Technique du doorstopper .....	5
2.3 Technique du doorstopper modifiée .....	6
2.4 Méthodes d'interprétation pour le doorstopper .....	13
2.4.1 Cadre théorique .....	13
2.4.2 Méthode d'interprétation conventionnelle.....	24
2.4.3 Méthode d'interprétation RPR .....	25
2.4.4 Méthode inverse .....	29
<b>CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>33</b>
3.1 Méthode inverse appliquée à des données de terrain .....	33
3.1.1 Présentation du modèle 3D.....	33
3.1.1.1 Géométrie.....	34

3.1.1.2 Système de référence .....	34
3.1.1.3 Assignation des paramètres de déformabilité.....	35
3.1.1.4 Conditions aux frontières et initiales du modèle .....	36
3.1.1.5 Maillage .....	36
3.1.2 Courbes de récupération pour des chargements unitaires.....	38
3.1.3 Équations rationnelles polynomiales et principe de superposition .....	39
3.1.4 Estimation des contraintes in situ .....	40
3.1.5 Méthode inverse appliquée à des courbes partielles .....	40
3.1.6 Correction de l'avancement de la mesure du forage .....	41
3.2 Effet de l'hétérogénéité de la roche sur la méthode inverse.....	42
3.2.1 Modèle hétérogène .....	43
3.2.2 Effet de l'hétérogénéité sur l'essai de compression biaxiale isotrope .....	45
3.2.3 Effet de l'hétérogénéité sur les courbes de récupération .....	49
3.2.4 Effet de l'hétérogénéité sur le tenseur calculé .....	50
3.2.5 Correction du tenseur suite à la caractérisation de l'hétérogénéité.....	54
3.2.5.1 Caractérisation de l'hétérogénéité.....	54
3.2.5.2 Facteur de correction lié à l'hétérogénéité et leur application.....	56
3.2.5.3 Application des facteurs de correction .....	59
3.2.6 Combinaison des corrections de l'avancement et de l'hétérogénéité .....	63
<b>CHAPITRE 4 RÉSULTATS .....</b>	<b>77</b>
4.1 Interprétation des mesures, mine Alpha .....	77
4.2 Interprétation des mesures, mine Beta.....	129
4.3 Synthèse des résultats.....	171
<b>CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>172</b>
5.1 Discussion des résultats.....	172
5.2 Phénomènes extérieurs .....	173
<b>CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>179</b>
6.1 Conclusion.....	179
6.2 Limitations .....	179
6.3 Recommandation.....	180

6.4 Originalité du mémoire .....	180
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>182</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>186</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Paramètres de déformations des trois modèles hétérogènes.....	49
Tableau 3.2 : Paramètres de déformations déterminés sur les carottes extraites des modèles hétérogène ..	49
Tableau 3.3 : Comparaison entre le tenseur appliqué dans le modèle hétérogène et le tenseur trouvé à partir du modèle homogène utilisé avec la méthode inverse .....	52
Tableau 3.4 : Tenseurs trouvés pour chaque chargement unitaire appliqué à une carotte hétérogène composée de deux matériaux ayant des modules de Young différents .....	52
Tableau 3.5 : Tenseurs trouvés pour chaque chargement unitaire appliqué à une carotte composée de deux matériaux superposés ayant deux coefficients de Poisson différents .....	53
Tableau 3.6 : Illustration de la provenance des facteurs de correction.....	57
Tableau 3.7 : Comparaison des contraintes non corrigées et corrigées modèles anisotropes $L_h/D = 0.2$	61
Tableau 3.8 : Comparaison des contraintes non corrigées et corrigées modèles anisotropes $L_h/D = 0.561$	
Tableau 3.9 : Comparaison des contraintes non corrigées et corrigées, modèle hétérogène graduel.....	62
Tableau 4.1 : Paramètres de déformabilité, mine Alpha .....	78
Tableau 4.2 : Mesure T1-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	80
Tableau 4.3 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	81
Tableau 4.4 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	82
Tableau 4.5 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de $L/D$ .....	83
Tableau 4.6 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de $L/D$ .....	84
Tableau 4.7 : Mesure T1-M6 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	85
Tableau 4.8 : Mesure T1-M6 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	86
Tableau 4.9 : Mesure T1-M6 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	87
Tableau 4.10 : Mesure T1-M6 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de $L/D$ .....	88
Tableau 4.11 : Mesure T1-M6 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de $L/D$ .....	89
Tableau 4.12 : Mesure T1-M7 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	90
Tableau 4.13 : Mesure T1-M7 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	91
Tableau 4.14 : Mesure T1-M7 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	92

Tableau 4.15 : Mesure T1-M7 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	93
Tableau 4.16 : Mesure T1-M7 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	94
Tableau 4.17 : Mesure T2-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	95
Tableau 4.18 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	96
Tableau 4.19 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	97
Tableau 4.20 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	98
Tableau 4.21 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	99
Tableau 4.22 : Mesure T2-M2 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	100
Tableau 4.23 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	101
Tableau 4.24 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	102
Tableau 4.25 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	103
Tableau 4.26 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	104
Tableau 4.27 : Mesure T2-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	105
Tableau 4.28 : Mesure T2-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	106
Tableau 4.29 : Mesure T2-M3 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	107
Tableau 4.30 : Mesure T2-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	108
Tableau 4.31 : Mesure T2-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	109
Tableau 4.32 : Mesure T3-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	110
Tableau 4.33 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	111
Tableau 4.34 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	112
Tableau 4.35 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	113
Tableau 4.36 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	114
Tableau 4.37 : Mesure T3-M2 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	115

Tableau 4.38 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	116
Tableau 4.39 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	117
Tableau 4.40 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	118
Tableau 4.41 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	119
Tableau 4.42 : Mesure T3-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	120
Tableau 4.43 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	121
Tableau 4.44 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	122
Tableau 4.45 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	123
Tableau 4.46 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	124
Tableau 4.47 : Paramètres de déformabilité, mine Beta.....	131
Tableau 4.48 : Mesure T1-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	132
Tableau 4.49 : Mesure T1-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	133
Tableau 4.50 : Mesure T1-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	134
Tableau 4.51 : Mesure T1-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	135
Tableau 4.52 : Mesure T1-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	136
Tableau 4.53 : Mesure T1-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	137
Tableau 4.54 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	138
Tableau 4.55 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	139
Tableau 4.56 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	140
Tableau 4.57 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	141
Tableau 4.58 : Mesure T2-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	142
Tableau 4.59 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	143
Tableau 4.60 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	144
Tableau 4.61 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	145

Tableau 4.62 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	146
Tableau 4.63 : Mesure T2-M2 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	147
Tableau 4.64 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	148
Tableau 4.65 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	149
Tableau 4.66 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	150
Tableau 4.67 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	151
Tableau 4.68 : Mesure T3-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	152
Tableau 4.69 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	153
Tableau 4.70 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	154
Tableau 4.71 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	155
Tableau 4.72 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	156
Tableau 4.73 : Mesure T3-M2 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	157
Tableau 4.74 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	158
Tableau 4.75 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	159
Tableau 4.76 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	160
Tableau 4.77 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	161
Tableau 4.78 : Mesure T3-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR .....	162
Tableau 4.79 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle .....	163
Tableau 4.80 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles .....	164
Tableau 4.81 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	165
Tableau 4.82 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D.....	166
Tableau 5.1 : Variations de températures maximales pendant toute la durée de la saignée .....	174
Tableau 5.2 : Paramètres utilisés pour étudier l'impact de deux coefficients de Poisson différents sur la face de la carotte sur la méthode inverse .....	177

Tableau 5.3 : Paramètres déterminés sur les carottes composées de deux v de différentes valeurs sur la face de mesure en recourant au modèle anisotrope équivalent .....	177
Tableau D.1 : Tenseurs calculés avec la correction sur l'avancement et l'hétérogénéité pour le modèle anisotrope 0.2 .....	189
Tableau D.2 : Tenseurs calculés avec la correction sur l'avancement et l'hétérogénéité pour le modèle anisotrope 0.5 .....	189
Tableau D.3 : Tenseurs calculés avec la correction sur l'avancement et l'hétérogénéité pour le modèle hétérogène graduel .....	190
Tableau E.1 : Comparaison de la composante Sxx selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Alpha .....	191
Tableau E.2 : Comparaison de la composante Syy selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Alpha .....	191
Tableau E.3 : Comparaison de la composante Szz selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Alpha .....	192
Tableau E.4 : Comparaison de la composante Sxy selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Alpha .....	192
Tableau E.5 : Comparaison de $\Sigma e^2/N$ selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Alpha .....	193
Tableau E.6 : Tenseurs tridimensionnels, mine Alpha .....	193
Tableau E.7 : Tenseurs tridimensionnels sans T2-M2, mine Alpha .....	194
Tableau F.1 : Comparaison de la composante Sxx selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Beta .....	195
Tableau F.2 : Comparaison de la composante Syy selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Beta .....	195
Tableau F.3 : Comparaison de la composante Szz selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Beta .....	196
Tableau F.4 : Comparaison de la composante Sxy selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Beta .....	196
Tableau F.5 : Comparaison de $\Sigma e^2/N$ selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Beta .....	197
Tableau F.6 : Tenseurs tridimensionnels, mine Beta .....	197

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Cellule doorstopper proposée par Leeman en 1969 .....	5
Figure 2.2 : Courbes de récupération non corrigées .....	7
Figure 2.3 : Courbes de récupération corrigées.....	7
Figure 2.4: Illustration de l'angle $\beta$ .....	8
Figure 2.5 : Vues d'une cellule doorstopper modifiée (Corthésy, Leite, Gill, & Gaudin, 2003) .....	9
Figure 2.6 : Module d'acquisition intelligent (Corthésy, Leite, Gill, & Gaudin, 2003).....	9
Figure 2.7: MAI et doorstopper de seconde génération .....	10
Figure 2.8 : Mise en place d'une cellule doorstopper modifiée (Corthésy & Leite, 2013) .....	11
Figure 2.9 : Courbes récupérées pendant la saignée.....	12
Figure 2.10: Constantes élastiques du matériau transversalement isotrope. (Wittke, 1990) .....	16
Figure 2.11 : Modèle transversalement isotrope où $\omega$ est nul (Vézina, 2014) .....	17
Figure 2.12 : Schéma de l'essai de compression biaxiale (Corthésy & Leite, 2013) .....	18
Figure 2.13 : Modèle transversalement isotrope avec angle $\delta$ et $\omega$ nul .....	19
Figure 2.14 : Illustration de l'angle $\omega$ .....	19
Figure 2.15 : Schéma de l'essai de compression diamétrale (Corthésy & Leite, 2013).....	20
Figure 2.16 : Définition du RPR avec les courbes de déformations.....	26
Figure 2.17 : Relation SR-RPR pour un matériau transversalement isotrope (Ouellet, 2012).....	27
Figure 2.18 : Erreur relative sur les contraintes estimées par la méthode inverse due à une sous-estimation de -33% de l'avancement de la foreuse (Vézina, 2014).....	31
Figure 3.1 : Représentation 2D du modèle simulant la saignée et vue de la zone en fond de trou couverte par la rosette du doorstopper montrant les points utilisés pour calculer les déformations (Ouellet, 2012).....	34
Figure 3.2 : Système de référence du modèle simulant une saignée avec le doorstopper (Ouellet, 2012) ..	35
Figure 3.3 : Illustration de l'assignation des paramètres de déformabilité pour un matériau transversalement isotrope avec les angles $\omega$ et $\delta$ nuls .....	36
Figure 3.4 : Maillage au fond du trou pilote (Ouellet, 2012) .....	37
Figure 3.5 : Illustration du maillage sur les extrémités du modèle.....	38
Figure 3.6 : Utilisation des déformations pré-pic pour déterminer le tenseur partiel .....	41
Figure 3.7 : Carotte hétérogène créée par la saignée.....	43
Figure 3.8 : Illustration du maillage pour le modèle composé de deux matériaux de différente déformabilité .....	44

Figure 3.9 : Contrainte radiale le long de l'axe de la carotte hétérogène, pendant l'essai de compression biaxiale isotrope .....	46
Figure 3.10 : Pression ressentie aux jauge selon la position de séparation $L_h/D$ et le degré d'hétérogénéité .....	47
Figure 3.11 : Évolution du module de Young, $E$ , estimé à partir de carottes caractérisées par leur degré d'hétérogénéité $E_h/E_b$ et la limite $L_h/D$ .....	48
Figure 3.12 : Évolution du coefficient de Poisson, $\nu$ , estimé à partir de carottes caractérisées par leur degré d'hétérogénéité $E_h/E_b$ et la limite $L_h/D$ .....	48
Figure 3.13: Déformations normalisées pour des carottes hétérogènes et homogènes .....	50
Figure 3.14: Compression biaxiale pour déterminer le rapport $R_d$ .....	54
Figure 3.15 : Compression biaxiale avec chargement partiel sur une carotte d'aluminium.....	55
Figure 3.16 : Rapport de déformations en fonction du degré d'hétérogénéité et de la position $L_h/D$ entre les deux matériaux .....	56
Figure 3.17 : Facteur de correction moyen $f_{Sxx}$ pour les contraintes $S_{xx}$ et $S_{yy}$ .....	58
Figure 3.18 : Facteur de correction moyen $f_{Szz}$ pour la contrainte $S_{zz}$ .....	58
Figure 3.19 : Facteur de correction moyen $f_{Sxy}$ pour la contrainte $S_{xy}$ .....	59
Figure 3.20 : Illustration de la carotte hétérogène graduée créée dans Comsol .....	60
Figure 3.21: Comparaison entre les différentes contraintes corrigées et non corrigées moyennes selon les rapport de déformations.....	63
Figure 3.22 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.2$ – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle.....	65
Figure 3.23 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.2$ – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction linéaire .....	65
Figure 3.24 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.2$ – Correction linéaire apportée sur la mesure de l'avancement $L/D$ .....	66
Figure 3.25 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.2$ – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction polynomiale .....	66
Figure 3.26 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.2$ – Correction polynomiale apportée sur la mesure de l'avancement $L/D$ .....	67
Figure 3.27 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.5$ – Comparaison des contraintes trouvées selon le type de correction.....	67
Figure 3.28 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.5$ – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle.....	68

Figure 3.29 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.5$ – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction linéaire .....	68
Figure 3.30 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.5$ – Correction linéaire apportée sur la mesure de l'avancement $L/D$ .....	69
Figure 3.31 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.5$ – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction polynomiale .....	69
Figure 3.32 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.5$ – Correction polynomiale apportée sur la mesure de l'avancement $L/D$ .....	70
Figure 3.33 : Modèles anisotropes $L_h/D = 0.5$ – Comparaison des contraintes trouvées selon le type de correction.....	70
Figure 3.34 : Modèle hétérogène graduel – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle.....	71
Figure 3.35 : Modèle hétérogène graduel – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction linéaire .....	71
Figure 3.36 : Modèle hétérogène graduel – Correction linéaire apportée sur la mesure de l'avancement $L/D$ .....	72
Figure 3.37 : Modèle hétérogène graduel – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction polynomiale .....	72
Figure 3.38 : Modèle hétérogène graduel – Correction polynomiale apportée sur la mesure de l'avancement $L/D$ .....	73
Figure 3.39 : Modèle hétérogène graduel – Comparaison des contraintes trouvées selon le type de correction .....	73
Figure 3.40 : Comparaison des $(\Sigma e^2/N)$ pour les trois cas modélisés selon la méthode inverse appliquée .	74
Figure 3.41 : Résumé des différences relatives avec la correction sur l'avancement et l'hétérogénéité.....	75
Figure 4.1 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	80
Figure 4.2 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	81
Figure 4.3 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	82
Figure 4.4: Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de $L/D$ .....	83
Figure 4.5 : Mesure T1-M3 – Correction linéaire effectuée sur $L/D$ .....	83

Figure 4.6 : Mesure T1-M3 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	84
Figure 4.7 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	84
Figure 4.8 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	85
Figure 4.9 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	86
Figure 4.10 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles .....	87
Figure 4.12 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	88
Figure 4.11 : Mesure T1-M6 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	88
Figure 4.14 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	89
Figure 4.13 : Mesure T1-M6 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	89
Figure 4.15 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	90
Figure 4.16 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	91
Figure 4.17 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles .....	92
Figure 4.18 : Mesure T1-M7 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	93
Figure 4.19 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	93
Figure 4.20 : Mesure T1-M7 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	94
Figure 4.21 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	94
Figure 4.22 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	95
Figure 4.23 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	96
Figure 4.24 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles .....	97

Figure 4.26 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	98
Figure 4.25 : Mesure T2-M1 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	98
Figure 4.28 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	99
Figure 4.27 : Mesure T2-M1 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	99
Figure 4.29 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	100
Figure 4.30 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	101
Figure 4.31 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles .....	102
Figure 4.33 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	103
Figure 4.32 : Mesure T2-M2 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	103
Figure 4.35 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale .....	104
Figure 4.34 : Mesure T2-M2 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	104
Figure 4.36 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	105
Figure 4.37 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	106
Figure 4.38 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles .....	107
Figure 4.39 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	108
Figure 4.40 : Mesure T2-M3 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	108
Figure 4.41 : Mesure T2-M3 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	109
Figure 4.42 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	109
Figure 4.43 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	110

Figure 4.44 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	111
Figure 4.45 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	112
Figure 4.47 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	113
Figure 4.46 : Mesure T3-M1 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	113
Figure 4.48 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	114
Figure 4.49 : Mesure T3-M1 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	114
Figure 4.50 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	115
Figure 4.51 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	116
Figure 4.52 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	117
Figure 4.54 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	118
Figure 4.53 : Mesure T3-M2 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	118
Figure 4.56 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	119
Figure 4.55 : Mesure T3-M2 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	119
Figure 4.57 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	120
Figure 4.58 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	121
Figure 4.59 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	122
Figure 4.60 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	123
Figure 4.61 : Mesure T3-M3 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	123
Figure 4.63 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	124

Figure 4.62 : Mesure T3-M3 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	124
Figure 4.64 : Comparaison de la composante Sxx trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Alpha .....	125
Figure 4.65 : Comparaison de la composante Syy trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Alpha .....	125
Figure 4.66 : Comparaison de la composante Szz trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Alpha .....	126
Figure 4.67 : Comparaison de la composante Sxy trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Alpha .....	126
Figure 4.68 : Comparaison des différences aux carrés normalisées par type de correction pour chaque mesure, mine Alpha.....	127
Figure 4.69 : Comparaison des différences aux carrés normalisées par type de correction sans la méthode RPR, pour chaque mesure, mine Alpha.....	128
Figure 4.70 : Comparaison des différents tenseurs tridimensionnels trouvés par méthode d'interprétation, mine Alpha.....	128
Figure 4.71 : Comparaison des différents tenseurs tridimensionnels trouvés par méthode d'interprétation, sans T2-M2, mine Alpha.....	129
Figure 4.72 : Mesure T1-M2 – Courbes de terrain et variation de la température .....	130
Figure 4.73 : Mesure T1-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	132
Figure 4.74 : Mesure T1-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle.....	133
Figure 4.75 : Mesure T1-M1– Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	134
Figure 4.76: Mesure T1-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	135
Figure 4.77 : Mesure T1-M1 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	135
Figure 4.78 : Mesure T1-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	136
Figure 4.79 : Mesure T1-M1 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	136
Figure 4.80 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	137

Figure 4.81 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	138
Figure 4.82 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	139
Figure 4.83 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	140
Figure 4.84 : Mesure T1-M3 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	140
Figure 4.85 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	141
Figure 4.86 : Mesure T1-M3 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	141
Figure 4.87 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	142
Figure 4.88 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	143
Figure 4.89 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	144
Figure 4.90 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	145
Figure 4.91 : Mesure T2-M1 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	145
Figure 4.92 : Mesure T2-M1 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	146
Figure 4.93 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	146
Figure 4.94 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	147
Figure 4.95 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle.....	148
Figure 4.96 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	149
Figure 4.97 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	150
Figure 4.98 : Mesure T2-M2 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	150
Figure 4.99 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	151

Figure 4.100 : Mesure T2-M2 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	151
Figure 4.101 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	152
Figure 4.102 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	153
Figure 4.103 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	154
Figure 4.104 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	155
Figure 4.105 : Mesure T3-M1 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	155
Figure 4.106 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	156
Figure 4.107 : Mesure T3-M1 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	156
Figure 4.108 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	157
Figure 4.109 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	158
Figure 4.110 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	159
Figure 4.111 : Mesure T3-M2 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	160
Figure 4.112 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	160
Figure 4.114 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	161
Figure 4.113 : Mesure T3-M2 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	161
Figure 4.115 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR .....	162
Figure 4.116 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle .....	163
Figure 4.117 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles.....	164
Figure 4.118 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D .....	165

Figure 4.119 : Mesure T3-M3 – Correction linéaire effectuée sur L/D .....	165
Figure 4.120 : Mesure T3-M3 – Correction polynomiale effectuée sur L/D .....	166
Figure 4.121 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D .....	166
Figure 4.122 : Comparaison de la composante Sxx trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Beta.....	167
Figure 4.123 : Comparaison de la composante Syy trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Beta.....	167
Figure 4.124 : Comparaison de la composante Szz trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Beta.....	168
Figure 4.125 : Comparaison de la composante Sxy trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Beta.....	168
Figure 4.126 : Résidus normalisées par type de correction pour chaque mesure, mine Beta.....	169
Figure 4.127 : Comparaison des différences aux carrés normalisées par type de correction sans la méthode RPR, pour chaque mesure, mine Beta .....	170
Figure 4.128 : Comparaison des différents tenseurs tridimensionnels trouvés par méthode d'interprétation, mine Beta.....	170
Figure 5.1 : Déformations normalisées causées par la pression d'eau.....	175
Figure 5.2 : Déformations normalisées liées à la poussée de la foreuse .....	176
Figure 5.3 : Effet de la présence de deux coefficients de Poisson différents sur la face de la carotte .....	178
Figure C.1 : Comparaison entre les différentes contraintes corrigées et non corrigées pour les cas 1 à 15 étudiés dans le but de déterminer les facteurs de correction moyens .....	188
Figure C.2 : Comparaison entre les différentes contraintes corrigées et non corrigées pour les cas 16 à 30 étudiés dans le but de déterminer les facteurs de correction moyens .....	188

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

$A_x, A_y$	Facteurs de concentration de contraintes
$B_x, B_y$	Facteurs de concentration de contraintes
$\beta$	Angle entre $\varepsilon_0^\circ$ et l'horizontale
$C_x, C_y$	Facteurs de concentration de contraintes
$\delta_{(i)}$	Plongée de la normale au plan d'isotropie pour le forge $i$ : angle entre le plan $X_{(i)}Y_{(i)}$ et $x_3$
$\Sigma e^2$	somme des différences aux carrés
$D$	Facteur de concentration de contraintes
$\bar{D}$	Matrice des contraintes partielles
$\varepsilon = \{\varepsilon_{XX(i)}, \varepsilon_{YY(i)}, \varepsilon_{XY(i)}\}$	Tenseur des déformations en fond de trou dans le référentiel $\{X_i, Y_i, Z_i\}$
$\varepsilon_0^\circ, \varepsilon_{90^\circ}, \varepsilon_{45^\circ}, \varepsilon_{135^\circ}$	Déformations mesurées par une cellule doorstopper
$\varepsilon_1, \varepsilon_3$	Déformations principales mesurées lors de l'essai de compression biaxiale isotrope
$\varepsilon'_1, \varepsilon'_3$	Déformations principales mesurées lors de l'essai de compression diamétrale
$E$	Facteur de concentration de contraintes
$E_1$	Module de Young parallèle au plan d'isotropie
$E_2$	Module de Young perpendiculaire au plan d'isotropie
$E_i$	Module de Young parallèle à l'axe $i$
$F$	Facteur de concentration de contraintes
$F$	Pression appliquée pendant l'essai brésilien
$f_{Sij}$	Facteur de correction pour la contrainte $S_{ij}$

<b>G</b>	Facteur de concentration de contraintes
$G_{1,3}$	Module de cisaillement dans le plan d'isotropie
$G_{2,4}$	Module de cisaillement dans un plan incluant la direction perpendiculaire au plan d'isotropie
$G_{ij}$	Module de cisaillement dans le plan $ij$
<b>L/D</b>	Avancement normalisé de la longueur L parcourue par la foreuse pendant la saigné
<b>L<sub>c</sub>/D</b>	Longueur de la partie chargée pendant l'essai de compression biaxiale
<b>L<sub>nc</sub>/D</b>	Longueur de la partie non chargée pendant l'essai de compression biaxiale
<b>L<sub>h</sub>/D</b>	Position de séparation entre deux matériaux sur la carotte récupéré lorsque celle-ci est hétérogène
<b>J</b>	Matrice des cosinus directeurs
$l_{ij}$	Cosinus directeurs entre les référentiels $\{X_i, Y_i, Z_i\}$ et $\{X, Y, Z\}$
<b>L</b>	Longueur initiale des jauge de déformations
$\nu$	Coefficient de Poisson issu de l'hypothèse simplificatrice $\nu_1 = \nu_{12} = \nu$
$\nu_1$	Coefficient de Poisson dans le plan d'isotropie
$\nu_{12}$	Coefficient de Poisson associé à une contrainte dans le plan d'isotropie et une déformation perpendiculaire au plan d'isotropie
$\nu_{ij}$	Coefficient de Poisson associé à une contrainte selon l'axe $i$ et une déformation selon l'axe $j$ perpendiculaire
$\omega$	Angle entre $\epsilon_0^\circ$ et plan d'isotropie
$p_{ri}$	Paramètres de régression utilisés dans les équations générales des facteurs de concentration de contraintes
$\Psi_{(i)}$	Azimut du forage $i$ mesuré par rapport au nord
<b>P</b>	Pression appliquée pendant l'essai de compression biaxiale isotope
$P_1, P_2, \bar{P}$	Paramètres utilisés pour la détermination du tenseur des contraintes
$Q_1, Q_2$	Paramètres utilisés pour la détermination du tenseur des contraintes
$\rho_{(i)}$	Plongée d'un forage $i$ mesurée par rapport à l'horizontale et positive vers le haut
<b>Rd</b>	Rapport de déformations

RPR	Recovered to Peak strain invariant Ratio
$\{\sigma_{XX(i)}, \sigma_{YY(i)}, \sigma_{XY(i)}\}$	Tenseur des contraintes en fond de trou dans le référentiel $\{X(i), Y(i), Z(i)\}$
$\Sigma e^2/N$	Erreur normalisée ou résidu normalisé
S	Matrice du tenseur à six composantes
$S(i) = \{S_{XX(i)}, S_{YY(i)}, S_{ZZ(i)}, S_{XY(i)}, S_{XZ(i)}, S_{YZ(i)}\}$	Tenseur des contraintes dans le référentiel $\{X(i), Y(i), Z(i)\}$
$\bar{S}_{XX(i)}, \bar{S}_{YY(i)}, \bar{S}_{ZZ(i)}, \bar{S}_{XY(i)}$	Contraintes partielles dans le référentiel $\{X(i), Y(i), Z(i)\}$
SR	Stress Ratio
$\theta$	Angle des jauge de déformations sur le doorstopper
$u_i$	Déplacement selon X relevé à la jauge i
$v_i$	Déplacement selon Y relevé à la jauge i
$\{X, Y, Z\}$	Référentiel du modèle COMSOL Multiphysics®
$\{X_i, Y_i, Z_i\}$	Référentiel associé au forage Fi
$\{x_1, x_2, x_3\}$	Référentiel lié aux axes d'anisotropie

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe A – Validation du modèle .....	186
Annexe B – Différents cas utilisés pour déterminer les facteurs de correction moyens .....	187
Annexe C – Contraintes corrigées et non corrigées pour tous les cas étudiés.....	188
Annexe D – Résultats obtenus sur la combinaison de correction sur les matériaux hétérogènes complexes .....	189
Annexe E – Tableaux comparatifs des résultats obtenus de chaque mesure selon la méthode utilisée pour la mine alpha .....	191
Annexe F – Tableaux comparatifs des résultats obtenus de chaque mesure selon la méthode utilisée pour la mine beta .....	195

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

### 1.1 Contexte de l'étude

L'état des contraintes in situ dans un massif rocheux est à la base de la conception des excavations en rocher. La connaissance de la grandeur et de l'orientation de ces contraintes fait partie des éléments requis pour optimiser les infrastructures en surface ou souterraines. Ces contraintes sont déterminées à l'aide de techniques de mesure nécessitant une expertise dans le domaine de la mécanique des roches.

Trois grands principes sont à la base de plusieurs techniques permettant de déterminer le tenseur de contraintes in situ. Il s'agit des principes de rétablissement, de fracturation et de récupération. Le principe de récupération est à la base du plus grand nombre de techniques et consiste à relâcher les contraintes sur un certain volume de roche à l'aide d'une saignée et de mesurer les déformations ou déplacements provoqués par cette saignée à l'aide de capteurs installés au fond d'un forage ou sur sa paroi. En combinant les déformations mesurées pendant la saignée et le comportement mécanique de la roche au point de mesure dans des modèles de calcul, les contraintes in situ peuvent être obtenues.

Depuis plus de trois décennies, les chercheurs de Polytechnique Montréal utilisent la technique du doorstopper modifié, considérée très polyvalente, puisqu'elle peut être utilisée dans des milieux fracturés et dans des trous de forage inondés, ce que plusieurs autres techniques ne permettent pas. La technique du doorstopper modifié est basée sur la mesure des déformations lues par quatre jauge disposées à 45 degrés l'une de l'autre au fond d'un trou de forage pendant le relâchement des contraintes causé par le prolongement de ce forage, ce qui permet l'obtention de ce qui sera appelé courbes de récupérations.

Trois méthodes d'interprétation des mesures avec le doorstopper modifié existent. Celles-ci sont la méthode conventionnelle (Leeman, 1969), la méthode « Recovered to Peak strain invariant Ratio » ou RPR (Corthésy R. , Leite, He, & Gill, 1994) qui a ensuite été généralisée aux roches transversalement isotropes (Oullet, 2012) et plus récemment la méthode inverse (Vézina, 2012), elle aussi applicable aux roches transversalement isotropes. La différence entre ces trois méthodes vient du nombre de points considérés sur la courbe de récupération pour le calcul des contraintes.

En effet, la méthode conventionnelle utilise seulement les déformations récupérées au moment où les contraintes sont totalement relâchées, il s'agit des déformations récupérées. Dans ce cas, lorsqu'une seule mesure est disponible, un système de trois équations pour quatre inconnues est disponible. Seule la répétition de mesures dans deux autres sondages d'orientations différentes permet d'obtenir un système comportant autant d'équations que d'inconnues. La méthode RPR (Corthésy R. et al. , 1994) ajoute une équation liée au rapport entre l'invariant des déformations lorsque les contraintes en fond de trou sont totalement relâchées (déformations récupérées) et l'invariant au pic lorsque les contraintes en fond de trou sont minimales (généralement en tension) lors de la progression de la saignée. Cette méthode permet d'introduire une équation supplémentaire permettant le calcul de quatre des six composantes du tenseur de contraintes *in situ*, à partir d'une seule mesure, soit les composantes dans le plan normal à l'axe du forage de même que la composante parallèle à cet axe. Les travaux de Ouellet (2012) ont permis de généraliser ces deux méthodes à des roches montrant un comportement transversalement isotrope.

Récemment, Vézina (2014) a étudié l'applicabilité d'une troisième méthode d'interprétation appelée méthode inverse pour le doorstopper modifié. Cette méthode permet, dans certaines conditions, de déterminer toutes les composantes du tenseur tridimensionnel avec une mesure réalisée dans un seul forage. Cette méthode fait appel à l'ensemble des déformations récupérées pendant le relâchement de contraintes. La précision et la fiabilité de cette méthode ont été démontrées (Corthésy, Leite, Vézina, & Ouellet, 2016). Toutefois, elle n'a pas été utilisée avec des données provenant de mesures réalisées sur le terrain. Seules des données synthétiques provenant de modèles numériques ou encore des données de laboratoire obtenues sur des modèles physiques ont été utilisées afin de valider l'efficacité de la méthode inverse.

## 1.2 Objectif de l'étude

L'objectif général de ce travail est d'appliquer la méthode inverse à des données de terrain afin de vérifier son efficacité en comparant les résultats obtenus de cette méthode avec ceux obtenus des autres approches.

## 1.3 Structure du document

L'état des connaissances est abordé au Chapitre 2. Celui-ci explique sommairement ce que sont les contraintes *in situ* et les principes utilisés pour les déterminer. Ensuite, la méthode de mesure du doorstopper modifié est brièvement décrite. Les méthodes d'interprétation conventionnelle, RPR

et inverse sont présentées. Les conclusions de Vézina (2014) sur l'influence de certains paramètres sur la méthode inverse sont présentées. Le travail de Colin (2014) sur les effets de la température sur la technique du doorstopper modifié en région froide termine ce chapitre.

La méthodologie utilisée pour atteindre l'objectif est présentée au Chapitre 3. Le modèle simulant la prise de données avec le doorstopper modifié pendant une saignée, développé par Ouellet (2012) est décrit. La méthode inverse développée par Vézina (2014) ainsi que certains ajouts pour son application à des données de terrain est ensuite détaillée. La prise en compte des effets de l'hétérogénéité de déformabilité de la roche sur les contraintes calculées avec la méthode inverse concluent le chapitre.

Le Chapitre 4 présente les résultats de l'application de la méthode inverse à des mesures provenant de deux mines ainsi que la comparaison de ces résultats avec la méthode conventionnelle et RPR. L'influence de possibles erreurs sur la mesure de la progression du forage de relaxation y est aussi présentée. La discussion des différents résultats produits est présentée au Chapitre 5. La conclusion et les recommandations de même que les contributions sont présentées au Chapitre 6.

## CHAPITRE 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

Ce chapitre débute avec une brève description des contraintes in situ et traite ensuite de la technique du doorstopper modifié et des méthodes d'interprétation liées à celle-ci pour le calcul des contraintes.

### 2.1 Contraintes in situ

Les contraintes in situ sont celles présentes dans un massif rocheux. Elles peuvent être une combinaison de contraintes naturelles et induites. Les contraintes naturelles sont dues à la gravité et aux forces tectoniques. Les contraintes engendrées par la gravité en un point sont liées au poids des matériaux au-dessus de celui-ci tandis que les contraintes tectoniques sont causées par les plaques continentales en mouvement. Plusieurs autres paramètres peuvent influencer leurs distributions. La lithologie, l'hétérogénéité, l'anisotropie, la présence de fractures et l'eau en sont quelques-uns. Les contraintes induites, quant à elles, sont liées à la zone d'influence des excavations. Dans un référentiel en trois dimensions, les composantes du tenseur de contraintes sont au nombre de six, soit trois composantes normales et trois composantes de cisaillement indépendantes. L'équation 2.1 ci-dessous est une matrice symétrique représentant les six composantes du tenseur tridimensionnel dans un référentiel x, y, et z.

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

où  $S_{ii}$  sont les composantes normales et  $S_{ij}$  sont les composantes de cisaillement. Notons que  $S_{ij} = S_{ji}$  ce qui fait que la matrice (2.1) ne comporte que 6 termes indépendants

Les contraintes en place peuvent être déterminées de manière empirique ou analytique mais l'utilisation d'une technique de mesure reste la meilleure façon de les déterminer. La majorité des techniques de mesure de contraintes sont liées à l'un des trois principes suivants : le principe de rétablissement, le principe de fracturation et le principe de récupération. (Corthésy & Leite, 2013). Une revue de la littérature a déjà été faite par Amadei et Stephanson (1997) sur les différentes techniques existantes et le lecteur intéressé à en connaître davantage pourra s'y référer.

## 2.2 Technique du doorstopper

La technique faisant appel à la cellule doorstopper a été proposée par Leeman en 1969. La figure 2.1 présente la rosette à quatre jauge espacées à 45 degrés, qui mesurent les déformations en fond de trou identifiées par les symboles  $\varepsilon_{0^\circ}$ ,  $\varepsilon_{45^\circ}$ ,  $\varepsilon_{90^\circ}$  et  $\varepsilon_{135^\circ}$ .



Figure 2.1 : Cellule doorstopper proposée par Leeman en 1969

La mise en place de la cellule est relativement simple en comparaison avec les autres techniques. Un forage de dimension NX ou NQ, d'un diamètre de 75 mm, est fait jusqu'à l'endroit de la prise de donnée. Le fond du trou est poli afin de coller correctement la cellule. Pour le collage, le fond du trou doit être propre et sec. Une fois la cellule collée, une première lecture des jauge est faite. L'appareil de mise en place lié au câble de connexion est retiré du trou et la saignée de calibre NX (carotte de 54.7 mm de diamètre) est ensuite effectuée pour relâcher les contraintes en fond de trou. Une fois les contraintes complètement relâchées, une nouvelle lecture des déformations est faite en rebranchant la cellule à l'appareil de mise en place. La différence entre les déformations finales et initiales donne les déformations totales récupérées. Les avantages de cette technique par rapport aux autres techniques populaires est que la saignée demande seulement une longueur d'environ 10 cm et ne requiert que l'utilisation d'un seul calibre de forage alors que les autres techniques nécessitent deux diamètre de forage différents et l'un d'eux est de plus gros calibre que NX.

Étant donné que les déformations récupérées sont contenues dans un plan, trois forages non-parallèles doivent être faits pour déterminer le tenseur tridimensionnel. Une première mesure dans un forage permet d'avoir trois équations indépendantes pour six inconnues. Une seconde mesure dans un autre forage permet d'avoir deux équations supplémentaires indépendantes et le troisième forage permet d'obtenir la dernière équation indépendante nécessaire pour déterminer le tenseur

tridimensionnel. Le système à résoudre est donc surdéterminé une fois que les trois mesures dans trois forages d'orientation différente ont été obtenues. La méthode d'interprétation, liée à certaines hypothèses, utilise les déformations totales récupérées, les paramètres de déformabilité de la carotte extraite et les facteurs de concentration de contrainte comme par exemple, ceux proposés par Rahn (1984). Ces facteurs font le lien entre les contraintes *in situ* et les contraintes en fond de trou afin de déterminer le tenseur tridimensionnel. Cette technique peut être utilisée dans un massif très fracturé étant donnée la faible longueur de saignée requise.

### 2.3 Technique du doorstopper modifiée

Afin d'améliorer le niveau de confiance dans les résultats des mesures, des modifications aux équipements et aux méthodes de calcul utilisées avec la technique du doorstopper ont été proposées. Des modifications à la cellule doorstopper conventionnelle ont été faites afin de pouvoir mesurer la température au point de mesure, de permettre la lecture des jauge de déformations pendant le relâchement des contraintes et de vérifier la stabilité du pont de Wheatstone utilisé pour la lecture des jauge en ajoutant une jauge témoin (Gill et al., 1987). Ces modifications permettent de prendre en compte les effets des variations de température au point de mesure et de vérifier la qualité de la mesure en analysant l'allure de la courbe de récupération. La prise en compte de l'anisotropie et de l'hétérogénéité dans le modèle d'interprétation fait aussi partie des modifications apportées à la méthode (Corthésy, 1982). Les différentes modifications apportées à la cellule ainsi que les améliorations liées à la méthode de calcul des contraintes sont expliquées en détail dans Corthésy (1982), Gill al. (1987), Corthésy et Gill (1990) et Corthésy et al. (1993a,b) et sont résumées ici.

Tout d'abord, la lecture en continu des déformations pendant la saignée a été réalisée afin de vérifier la qualité des mesures et a consisté au départ à relier avec un câble de conducteurs, le doorstopper à un pont de Wheatstone situé à l'extérieur du trou de forage. Cette modification permet de poser un diagnostic sur la qualité des données en comparant l'allure des courbes de terrain avec celles obtenues par modélisation numérique.

Un thermistor permettant la mesure des variations de température à proximité des jauge est ajouté sur la même face que ces dernières afin de permettre la correction des effets thermoélectriques et thermomécaniques causés par les variations de température de l'eau de forage. Les travaux de Colin

(2014) ont permis d'étudier les effets que les contraintes thermiques peuvent avoir sur l'interprétation des mesures de contraintes avec le doorstopper modifié et démontrent que si les variations de température sont faibles, les effets thermomécaniques sont négligeables relativement à la grandeur des contraintes généralement mesurées dans les mines. Les figures 2.2 et 2.3 qui suivent montrent toutefois de quelle façon les effets thermiques peuvent être corrigés lorsque les variations de température sont faibles.

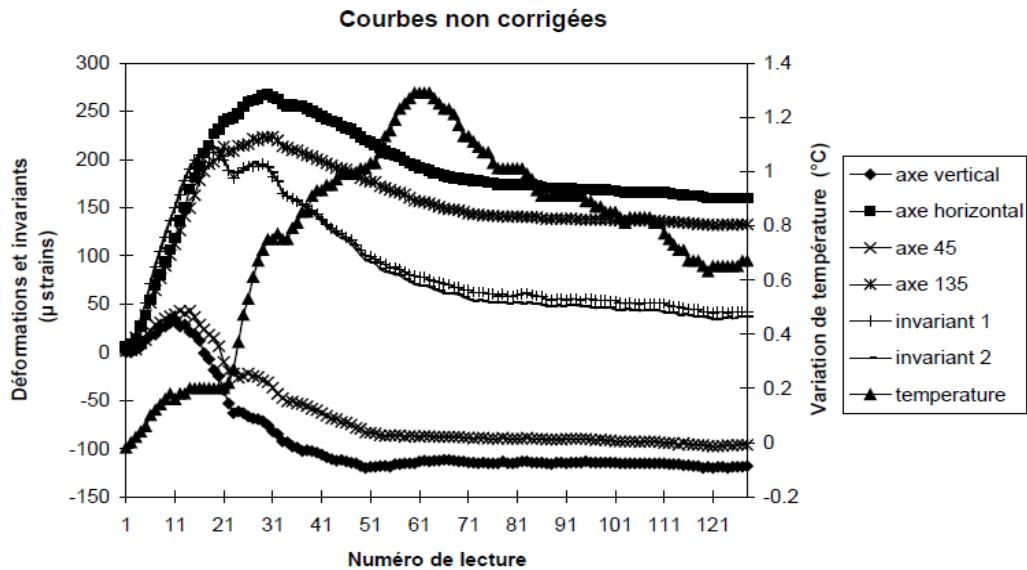


Figure 2.2 : Courbes de récupération non corrigées

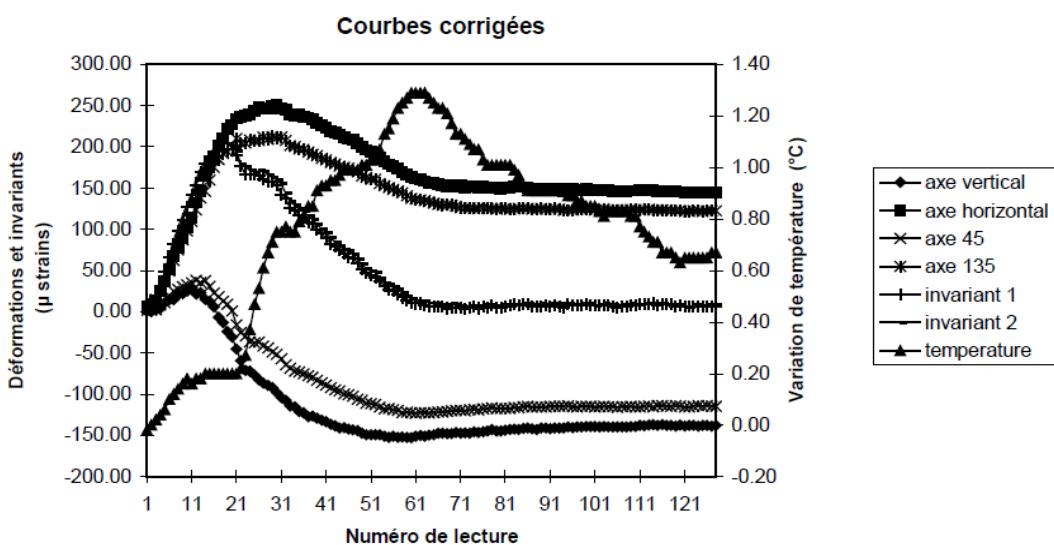


Figure 2.3 : Courbes de récupération corrigées

Le développement du MAI ou module d'acquisition intelligent permet de faire la lecture et l'enregistrement des jauge de déformations, d'une jauge de référence et de la température sans avoir de câble dans le train de tige pendant le forage de relâchement de contrainte comme c'était le cas avec les premières versions du doorstopper modifié. Ce module de première génération a été développé à Polytechnique Montréal dans les années 90. (Leite, Corthésy, Gill, St-Onge E, & Nguyen, 1996) Il mesure 30 cm de long et son autonomie est assurée par deux piles de 9V. Il comporte sept canaux, quatre pour les jauge de déformations, un pour le thermistor, un pour une résistance étalon et le dernier est utilisé pour y brancher un capteur de pression pour les essais en laboratoire. L'utilisation du MAI permet d'avoir des lectures de meilleure qualité puisque le problème des longs fils qui diminue la sensibilité des jauge de déformations est éliminé. Un clinomètre électronique indépendant du MAI est utilisé pour la mesure de l'angle  $\beta$  entre la jauge de référence  $\varepsilon_0^\circ$  et l'horizontale (figure 2.4). Un tube de plastique de 3 mm d'épaisseur est aussi ajouté autour de la cellule doorstopper pour augmenter la surface de contact au moment du collage en fond de trou. Un joint d'étanchéité torique est installé pour imperméabiliser les composantes électriques liant le MAI à la cellule.

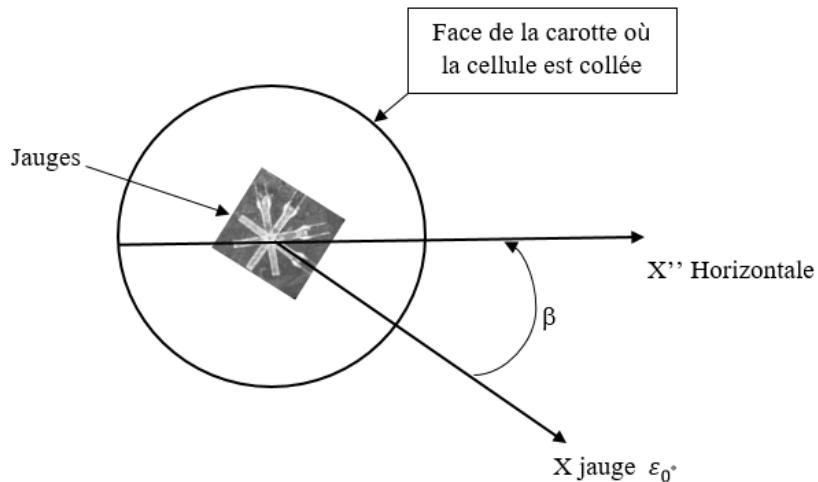


Figure 2.4: Illustration de l'angle  $\beta$

La figure 2.5 présente la cellule doorstopper modifiée de deux angles différents pour voir ces améliorations et la figure 2.6 montre le MAI. (Gill, Corthésy, Ouellet, Dubé, & Nguyen, 1987)

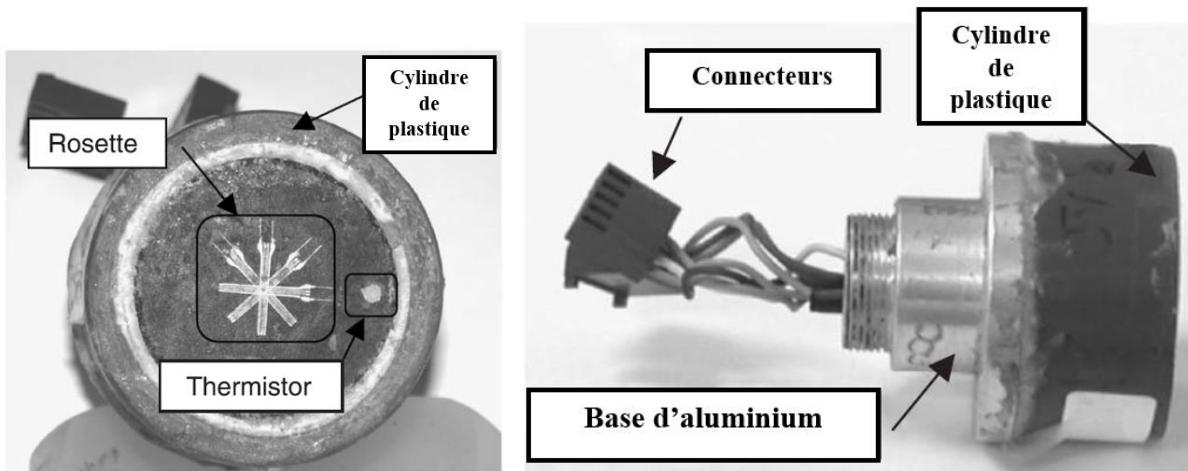


Figure 2.5 : Vues d'une cellule doorstopper modifiée (Corthésy, Leite, Gill, & Gaudin, 2003)

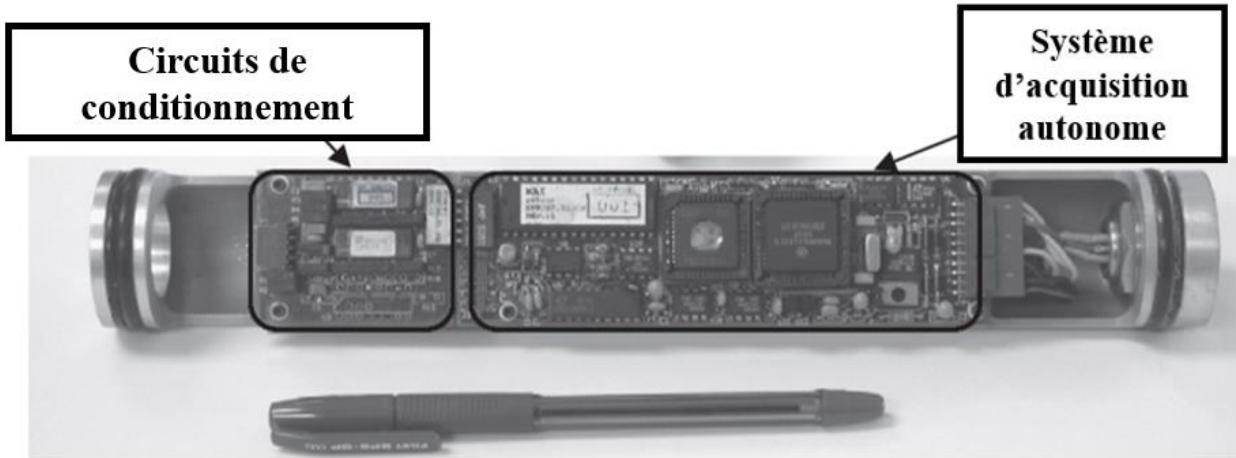


Figure 2.6 : Module d'acquisition intelligent (Corthésy, Leite, Gill, & Gaudin, 2003)

Le MAI a subi des modifications récemment afin de remplacer les modules de première génération devenus irréparables suite à la non-disponibilité de certaines de leurs composantes sur le marché. Ces modifications ont pris avantage des avancées dans le domaine de l'électronique, ce qui a permis de faire les modifications suivantes :

- Diminuer la longueur (20 cm) et le poids du MAI;
- Utiliser la communication sans fil pour la configuration du module avant la saignée et le transfert des données (peuvent aussi être transférées par lien USB);
- Ajouter un inclinomètre qui mesure la plongée et l'inclinaison par rapport à l'horizontale, pour orienter les jauge précisément après le collage en fond de trou;

- Améliorer sa résistance à l'environnement (saumure, température, vibration);
- Améliorer la capacité de stockage des données;
- Ajout d'une mémoire non volatile au cas où la pile perde sa charge;
- Améliorer la durée de fonctionnement avec alimentation par piles de 9V;
- Ajouter un système externe de mesure de l'avancement synchronisé avec le MAI;
- Mettre en place la compatibilité avec les systèmes d'exploitation Windows récents;

La figure 2.7 illustre la nouvelle cellule développée pour se connecter au module plus aisément et le MAI de seconde génération.

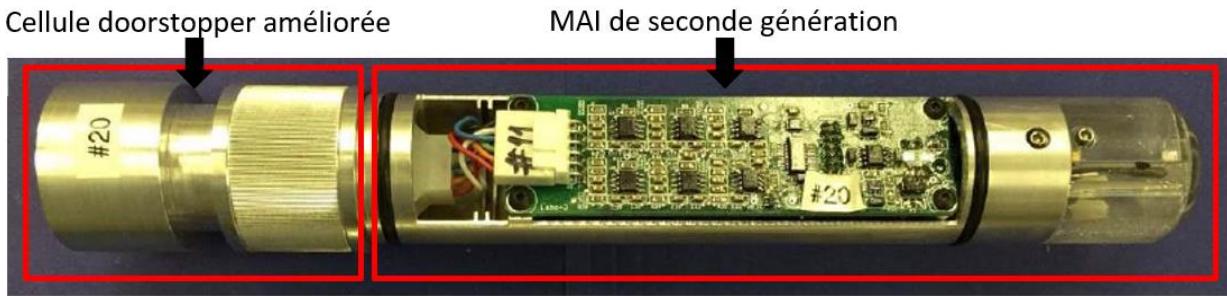


Figure 2.7: MAI et doorstopper de seconde génération

La lecture en continu a permis de développer une méthode d'interprétation demandant seulement deux forages pour calculer le tenseur tridimensionnel. Cette méthode appelée RPR, sera détaillée plus loin dans le document. Toutefois, selon Cloix (2010), il est quand même recommandé d'effectuer trois forages divergents pour obtenir un tenseur plus représentatif des contraintes présentes dans le massif. Les trous divergents permettent à la foreuse de demeurer au même endroit pour le forage des trois trous. Lorsque le doorstopper modifié est collé, le MAI est synchronisé avec un ordinateur situé à l'extérieur du trou. Une fois la mise à zéro des jauge effectuée et l'intervalle de lecture choisi, l'injection d'eau dans le forage est faite pendant approximativement quinze minutes afin de stabiliser la température en fond de trou. Par la suite, la saignée est effectuée et les déformations sont enregistrées en continu. Une fois la saignée terminée, un temps d'attente de quinze minutes est requis pour permettre au point de mesure de retourner à sa température initiale et ensuite la carotte, liée au doorstopper modifié et au MAI, est extraite du trou. La figure 2.8 illustre les différentes étapes liées à la technique.

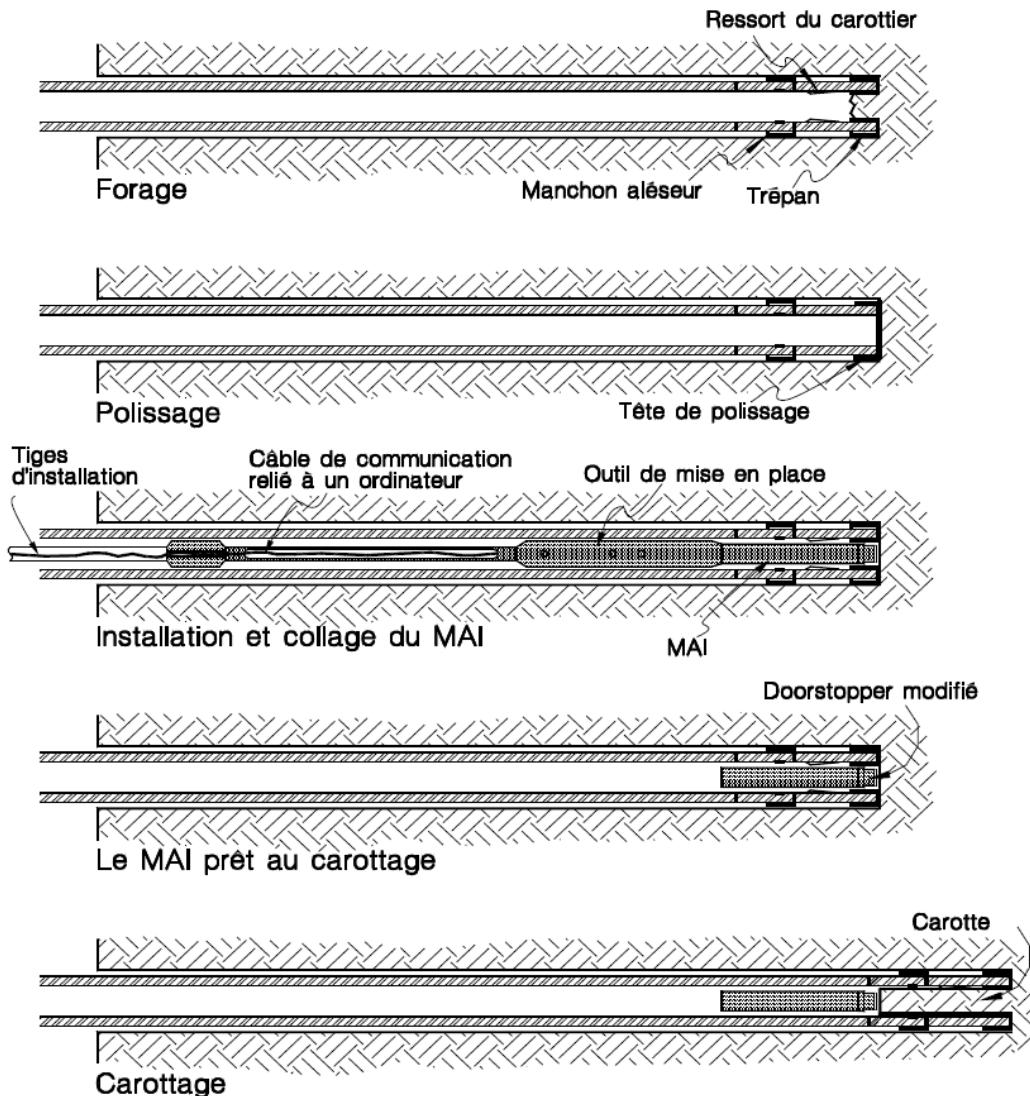


Figure 2.8 : Mise en place d'une cellule doorstopper modifiée (Corthésy & Leite, 2013)

Une fois que le MAI et sa cellule collée à la carotte sont recueillis, les données sont extraites de la mémoire. La figure 2.9 est un exemple des courbes récupérées avec la prise en compte de la variation de température. Sur celle-ci, il est possible de voir les trois parties des courbes de déformations qui sont : la partie pré-pic, le pic et les déformations résiduelles ou plus communément appelées le plateau des déformations qui correspond au relâchement complet des contraintes au point de mesure. Le pic de déformation se produit lorsque la géométrie de la carotte en formation est telle qu'il se développe très souvent des contraintes de tension au point de mesure, ces dernières étant liées aux rapports entre les intensités des composantes de contraintes in situ et au coefficient de Poisson de la roche. Les invariants de déformations sont aussi présentés sur cette

courbe. L'égalité de ces invariants de déformations (jauge  $0^\circ$  + jauge  $90^\circ$  et jauge  $45^\circ$  + jauge  $135^\circ$ ) est un indicateur de la qualité de la mesure.

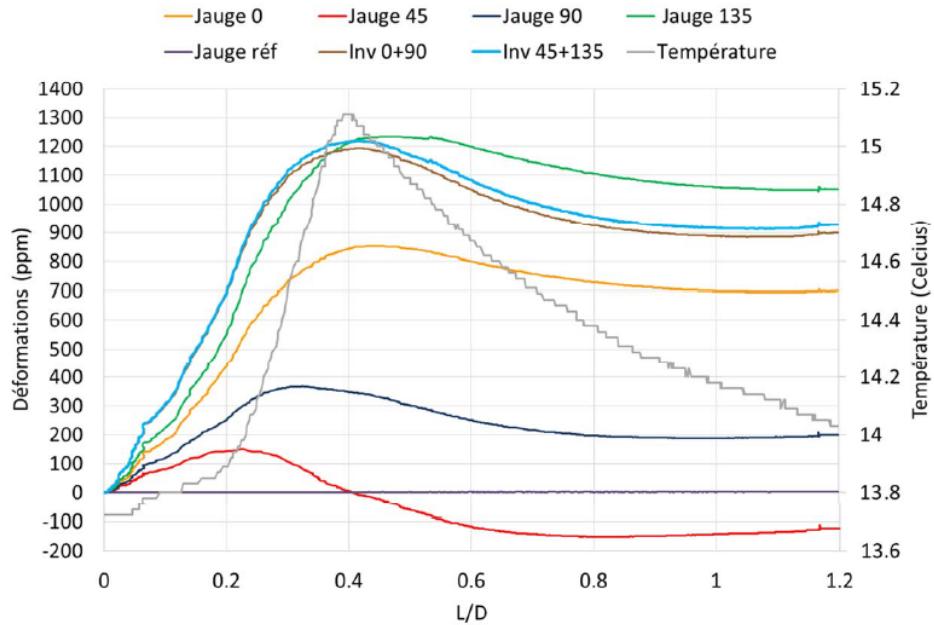


Figure 2.9 : Courbes récupérées pendant la saignée

La carotte recueillie est ensuite utilisée pour établir les relations contraintes-déformations au point de mesure qui tiennent compte des effets de l'hétérogénéité et de l'anisotropie selon la méthodologie proposée par Corthésy (1982). Cette méthodologie comporte deux essais en laboratoire soit l'essai de compression biaxiale isotrope et de compression diamétrale qui seront détaillés à la section 2.4.1.3.

Les effets de l'hétérogénéité évoqués peuvent être liés à des facteurs extrinsèques ou intrinsèques. La cellule de mesure utilisée et la colle sont responsables des facteurs extrinsèques alors que les effets intrinsèques sont liés à la nature de la roche qui est hétérogène. Ceci fait en sorte que des mesures prises à seulement quelques centimètres d'intervalle peuvent donner des déformations différentes. Ces deux facteurs sont pris en compte lors des recharges en laboratoire alors que les paramètres liant les contraintes appliquées et les déformations mesurées lors des essais le sont avec les mêmes jauge et les même éventuels défauts de collage que ceux présents lors des mesures sur le terrain.

Les travaux de Yaméogo (2013) sur l'hétérogénéité de la carotte à l'échelle du grain ont permis de conclure que plus la taille de ceux-ci est grande en comparaison avec la longueur des jauge (10 mm), plus les deux invariants de déformations peuvent être différents l'un de l'autre. Yaméogo a aussi vérifié l'influence de l'endommagement en modélisant un comportement élasto-plastique de la roche. Selon le matériau qu'il a modélisé, la présence d'un comportement plastique donne des courbes de déformations irrégulières lorsque comparées à celles de la figure 2-9.

## 2.4 Méthodes d'interprétation pour le doorstopper

### 2.4.1 Cadre théorique

Cinq hypothèses de base sont énoncées afin d'appliquer les méthodes d'interprétation du doorstopper modifié : (Corthésy, Leite, He, & Gill, 1994)

- la roche est élastique linéaire ( $\sigma=E\varepsilon$ ) et homogène ;
- les mesures de déformations récupérées suite à la saignée sont ponctuelles ;
- le tenseur de contrainte est constant à l'échelle de la portion du massif rocheux visée par les forages;
- les paramètres de déformabilité ou constantes élastiques (modules de Young et coefficient de Poisson) de la portion du massif rocheux étudié sont connus;
- les facteurs de concentration de contraintes en fond de trou sont connus.

#### 2.4.1.1 Déformations en fond de trou

Les déformations aux quatre jauge sont transformées en déformations en fond de trou avec le système d'équation 2.2 obtenu des moindres carrés étant donné qu'il s'agit d'un système surdéterminé. Les trois déformations en fond de trou  $\{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy} \text{ et } \gamma_{xy}\}$  forment un tenseur bidimensionnel où la déformation  $\varepsilon_{0^\circ}$  coïncide avec l'axe X et la déformation  $\varepsilon_{90^\circ}$  coïncide avec l'axe Y lorsque l'axe du forage est parallèle à l'axe Z.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{4} & -\frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{0^\circ} \\ \varepsilon_{90^\circ} \\ \varepsilon_{45^\circ} \\ \varepsilon_{135^\circ} \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

#### 2.4.1.2 Contraintes en fond de trou

Les contraintes en fond de trou identifiées  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{xy}$  sont liées aux déformations en fond de trou avec la loi de comportement du matériau composant la carotte. Des années 60 à 80, un

comportement linéaire élastique et isotrope était utilisé pour calculer l'état des contraintes en fond de trou. Ce comportement est caractérisé par un module de Young  $E$  et un coefficient de Poisson  $v$ . Pour modéliser un comportement anisotrope, d'autres constantes de déformabilité doivent être déterminées. Le recours à un cas précis de comportement anisotrope appelé le comportement transversalement isotrope est fait puisque celui-ci requiert la connaissance de cinq paramètres de déformabilité indépendants ainsi que l'orientation des axes d'anisotropie (Jaeger, 2013) :

- la direction  $\omega$  et la plongée  $\delta$  de la normale au plan d'isotropie ;
- le module de Young  $E_1$  dans le plan d'isotropie ;
- le module de Young  $E_2$  perpendiculaire au plan d'isotropie;
- le module de cisaillement  $G_2$  dans les plans perpendiculaires au plan d'isotropie;
- le coefficient de Poisson  $v_1$  lié à une déformation dans le plan d'isotropie pour un chargement dans ce même plan mais perpendiculairement à la direction de la déformation;
- le coefficient de Poisson  $v_{12}$  lié à un chargement dans le plan d'isotropie (1) causant une déformation dans un plan perpendiculaire à celui-ci (2).

Corthésy (1982) a proposé le modèle anisotrope équivalent pour calculer les contraintes en fond de trou pour un tel matériau en énonçant deux hypothèses simplificatrices, à savoir que  $v_{12} = v_1$  et que le module de cisaillement  $G_2$  peut être obtenu à partir d'une relation empirique proposée par Batugin et Nirenburg (1972) ce qui ramène à trois le nombre de paramètres de déformabilité déterminés en laboratoire à l'aide de deux essais. Il est important de comprendre que le comportement anisotrope est utilisé pour prendre en compte à la fois l'hétérogénéité et les erreurs expérimentales liées aux mesures avec le doorstopper mais aussi l'anisotropie réelle au point de mesure si elle est présente dans la roche.

Les équations 2.3 à 2.5 permettent de calculer les contraintes en fond de trou à partir des déformations en fond de trou et des paramètres de déformabilité. Le module de cisaillement dans le plan d'isotropie  $G_1$  se calcule en remplaçant  $E_2$  par  $E_1$  dans l'équation 2.4. Il est possible de calculer  $v_{21}$  avec l'équation 2.5. De plus, tel que mentionné, l'hypothèse voulant que  $v_1 = v_{12} = v$  est faites pour simplifier les essais requis pour la détermination des paramètres.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{(E_1 - E_2 \nu_{12}^2)} \begin{bmatrix} E_1^2 & E_1 E_2 \nu_{12} & 0 \\ E_1 E_2 \nu_{12} & E_1 E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12}(E_1 - E_2 \nu_{12}^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

$$G_{12} = \frac{E_1 E_2}{(E_1 + E_2 + 2\nu_{12} E_2)} \quad (2.4)$$

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} (\nu_{12}) \quad (2.5)$$

où  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{xy}$  sont les contraintes en fond de trou,  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  et  $\gamma_{xy}$  sont les déformations en fond de trou,  $E_i$  est le module de Young selon l'axe  $i$ , le coefficient de Poisson  $\nu_{ij}$  est le coefficient de Poisson lié à une contrainte normale dans l'axe  $i$  causant une déformation dans l'axe  $j$ , et  $G_{ij}$  est le module de cisaillement dans le plan  $ij$ . (Jaeger, 2013)

La figure 2.10 est inspirée de Wittke (1990) et permet de bien représenter chacun des termes précédemment évoqués.

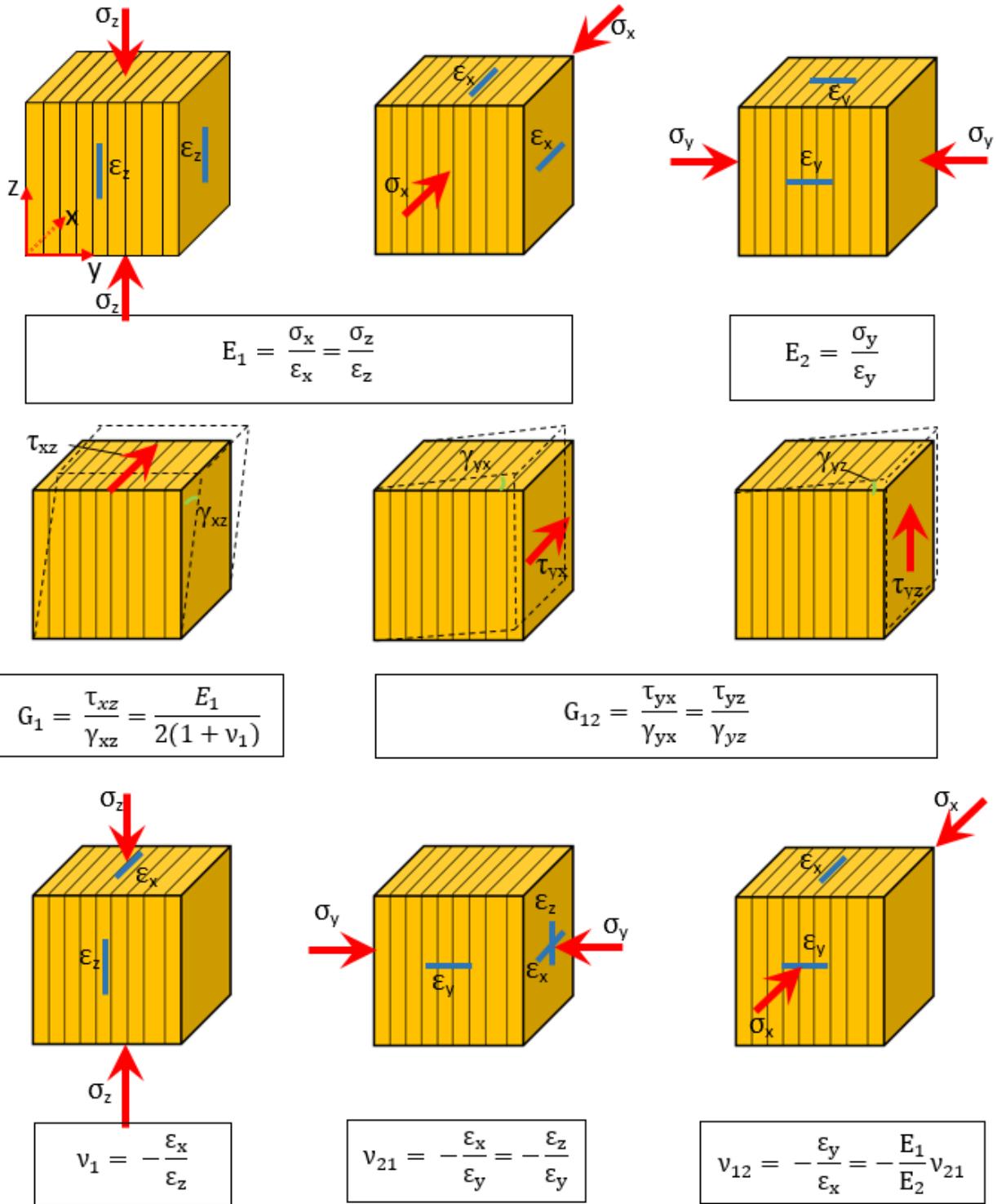


Figure 2.10: Constantes élastiques du matériau transversalement isotrope. (Wittke, 1990)

La figure 2.11, tirée de Vézina (2014), représente l'agencement des plans d'isotropie sur une carotte lorsque les plans d'isotropie sont définis par les axes XZ, l'angle  $\delta$  entre la normale au plan d'isotropie et l'axe Y et l'emplacement de paramètres de déformabilité.

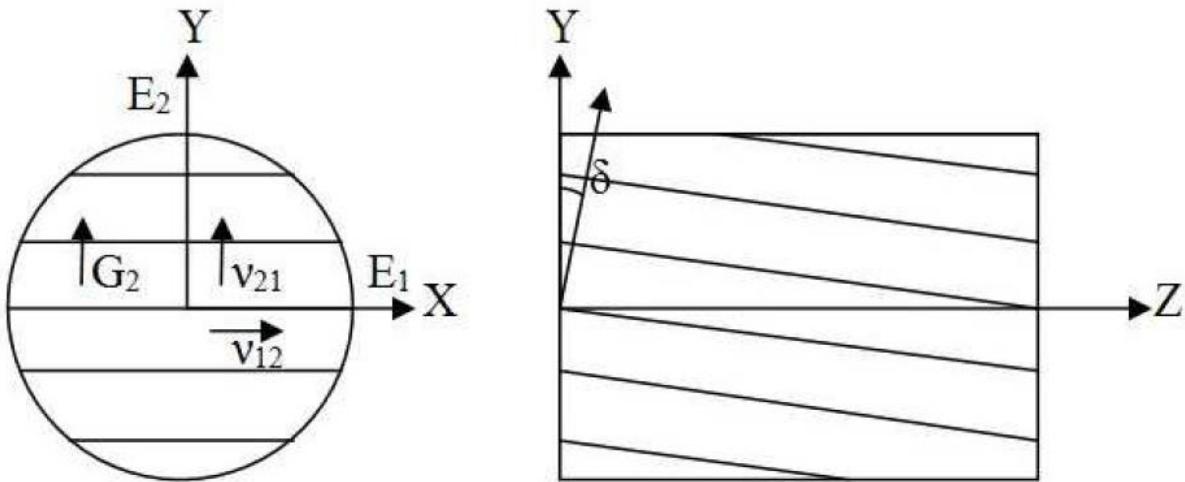


Figure 2.11 : Modèle transversalement isotrope où  $\omega$  est nul (Vézina, 2014)

#### 2.4.1.3 Détermination des paramètres de déformabilité

Des essais en laboratoire sont requis pour la détermination des paramètres de déformabilité. Ceux-ci sont réalisés sur la carotte de roche récupérée suite à la saignée et ils permettent de déterminer les paramètres de déformabilité au point de mesure qui sont associés aux déformations lues par les jauge pendant la saignée, éliminant ainsi certains problèmes liés à l'hétérogénéité de la roche ou encore à des défauts de collage des jauge.

Deux essais en laboratoire doivent être faits afin de déterminer les modules de Young  $E_1$ ,  $E_2$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ . Le premier essai est la compression biaxiale isotrope qui consiste à appliquer une pression uniforme isotrope sur toute la surface latérale de la carotte. La pression appliquée ( $P$ ) occasionne des déformations aux jauge  $\varepsilon_{0^\circ}$ ,  $\varepsilon_{45^\circ}$ ,  $\varepsilon_{90^\circ}$  et  $\varepsilon_{135^\circ}$ . La figure 2.12 est un schéma du montage utilisé pour l'essai de compression biaxiale isotrope.

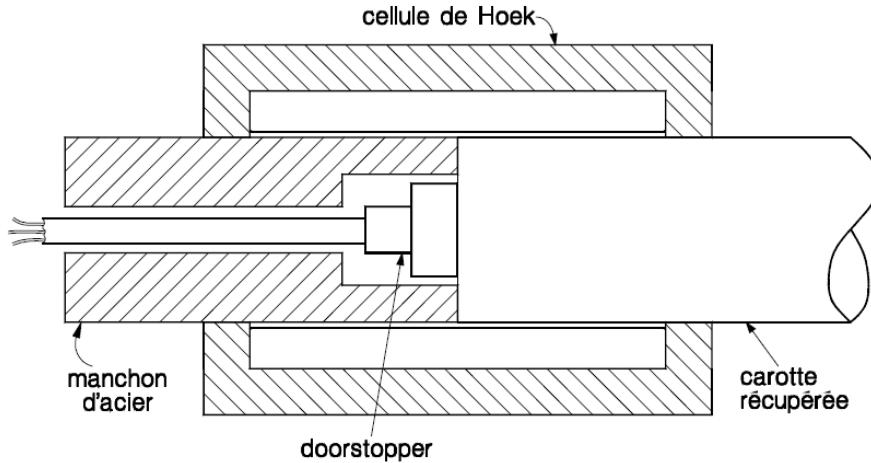


Figure 2.12 : Schéma de l'essai de compression biaxiale (Corthésy & Leite, 2013)

À partir des déformations sous les jauge, les déformations  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  et  $\gamma_{xy}$  sont calculées et permettent de déterminer les déformations maximale  $\varepsilon_1$  et minimale  $\varepsilon_3$  pour une pression  $P$  donnée de même que l'angle  $\omega$  entre la déformation principale mineure et la jauge de référence  $\varepsilon_{0^\circ}$  avec les équations 2.6 et 2.7. Les déformations  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_3$  sont situées sur les axes d'anisotropie selon la définition d'un matériau transversalement isotrope.

L'angle  $\delta$  est habituellement invisible à l'œil nu. Toutefois, il peut être obtenu à partir d'un essai développé par Gonzaga (2008) à Polytechnique Montréal. Pour cet essai, la préparation de l'échantillon requiert le collage de trois rosettes sur la circonference de la carotte et implique qu'il faille enlever la cellule doorstopper modifiée collée sur la carotte récupérée, ce qui complique passablement la réalisation des essais requis pour interpréter les mesures. C'est pour cette raison que l'angle  $\delta$  est fixé à zéro lorsque la trace des plans d'isotropie n'est pas visible sur la carotte. Lorsque l'angle  $\delta$  est nul, les plans d'isotropie sont disposés comme sur la figure 2.13. Sur cette figure l'arrangement des paramètres de déformabilité  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_1$  et  $G_2$  est montré et  $v$  a la même valeur sur tous les plans selon l'hypothèse énoncée à la section précédente.



Figure 2.13 : Modèle transversalement isotrope avec angle  $\delta$  et  $\omega$  nul

Dans la suite du document, il est supposé que l'angle  $\delta$  est égal à zéro. L'influence de cette hypothèse sur le calcul des contraintes a déjà été étudiée par Vézina (2014). La figure 2.14 représente l'angle  $\omega$  entre l'axe d'anisotropie et la jauge de référence.

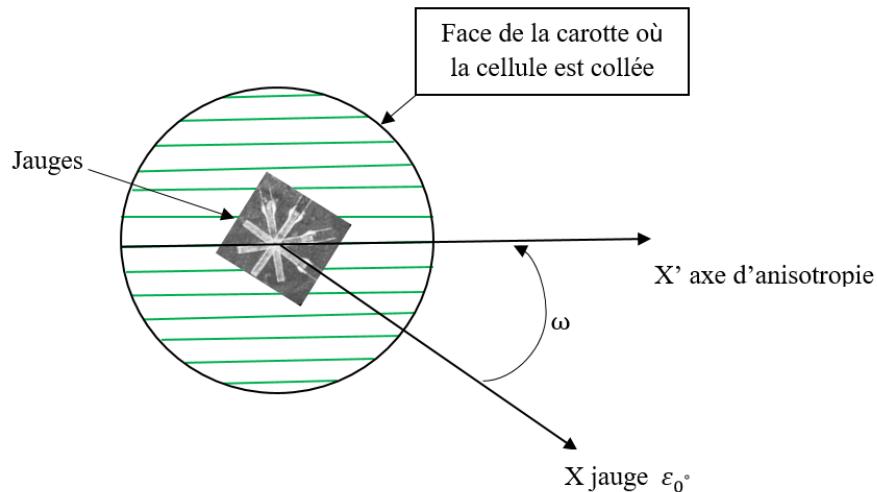


Figure 2.14 : Illustration de l'angle  $\omega$

Les équations 2.6 à 2.9 permettent de calculer les déformations principales et leur orientation.

$$\varepsilon_{1,3} = \frac{(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (2.6)$$

$$\tan(2\omega) = \frac{\gamma_{xy}}{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{P}{E_2} (1 - \nu_{21}) \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_3 = P \left( \frac{1}{E_1} - \frac{\nu_{21}}{E_2} \right) \quad (2.9)$$

où  $P$  est la pression appliquée lors de l'essai de compression biaxiale isotope lorsque les déformations sont enregistrées. Le second essai est la compression diamétrale montré à la figure 2.15. Une pression  $F$  est appliquée linéairement sur la longueur de la carotte perpendiculairement à la trace du plan d'isotropie dont l'orientation est connue suite à l'essai précédent. Ce second essai permet d'ajouter une équation utilisée pour déterminer le coefficient de Poisson  $\nu_{21}$ . L'équation 2.10 permet de calculer  $\nu_{21}$  avec la constante  $\lambda$  calculée avec l'équation 2.11. Les déformations principales  $\varepsilon'_1$  et  $\varepsilon'_3$  sont calculées avec les déformations aux jauge obtenues de l'essai de compression diamétrale pour une charge quelconque. La valeur de  $\nu_{21}$  est donc utilisée pour calculer  $\nu_{12}$  avec l'équation 2.5. La résolution des équations 2.8 à 2.10, pour une valeur de  $\lambda$  connue, permet de trouver les trois paramètres de déformabilité  $E_1$ ,  $E_2$  et  $\nu$ .  $\lambda$  correspond au rapport entre les contraintes principales majeure et mineure sous la rosette pendant l'essai.

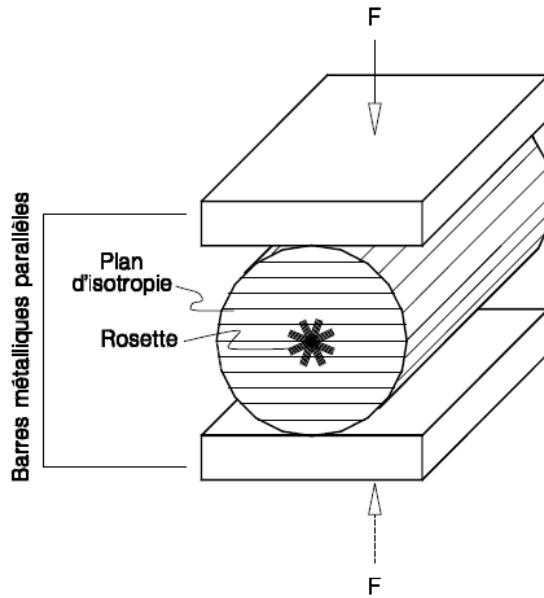


Figure 2.15 : Schéma de l'essai de compression diamétrale (Corthésy & Leite, 2013)

$$\nu_{21} = \frac{\lambda \varepsilon'_3 + \frac{E_2}{E_1} \varepsilon'_1}{-\varepsilon'_3 - \lambda \varepsilon'_1} \quad (2.10)$$

Récemment, Ouziame (2013) a déterminé que la valeur de  $\lambda$  faisait intervenir un nombre important d'éléments dont le rapport entre la longueur  $L$  et le diamètre  $D$  de la carotte récupérée, l'inclinaison

des plans d'isotropie  $\delta$ , le rapport d'anisotropie  $E_1/E_2$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ . L'équation 2.11 a été établie pour calculer  $\lambda$  à partir de ces paramètres.

$$\lambda = a + b\nu + c \ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) + d \nu^2 + e \ln^2\left(\frac{E_1}{E_2}\right) + f \nu \ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) + g \nu^3 + h \ln^3\left(\frac{E_1}{E_2}\right) + i \nu \ln^2\left(\frac{E_1}{E_2}\right) + j \nu^2 \ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \quad (2.11)$$

Les valeurs que prennent différentes constantes sont définies dans Ouziame (2013)

#### 2.4.1.4 Facteurs de concentration de contraintes

Les contraintes en fond de trou sont liées aux contraintes in situ par les facteurs de concentration de contraintes. Pour un matériau transversalement isotrope, avec un angle  $\delta$  compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , dix facteurs relient ces contraintes entre elles. (Rahn, 1984) L'équation 2.12 montre cette relation.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & B_x & C_x & 0 & 0 & F \\ B_y & A_y & C_y & 0 & 0 & G \\ 0 & 0 & 0 & D & E & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{xx} \\ S_{yy} \\ S_{zz} \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{yz} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

où  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{xy}$  sont les contraintes en fond de trou,  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  et  $S_{zz}$  sont les contraintes in situ normales,  $S_{xy}$ ,  $S_{xz}$  et  $S_{yz}$  sont les contraintes in situ en cisaillement et  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  et  $G$  sont les facteurs de concentration de contraintes.

Pour un angle  $\delta$  de  $90^\circ$ , le matériau est isotrope sur le plan de mesure, ce qui permet de simplifier l'équation 2.12 en posant  $A_x = A_y$ ,  $B_x = B_y$ ,  $C_x = C_y$ , et  $E=F=G=0$ . Lorsque l'angle  $\delta$  est égal à zéro, les facteurs  $E$ ,  $F$  et  $G$  sont nuls. Pour ce cas précis, il y a sept facteurs de concentration indépendants. D'après l'équation, seules les contraintes in situ  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{zz}$  et  $S_{xy}$  peuvent alors être déterminées à partir d'une seule mesure. Le tenseur obtenu est alors appelé tenseur partiel. Une partie du travail de Ouellet (2012) permet de déterminer ces constantes pour n'importe quel matériau transversalement isotrope avec l'équation 2.13.

$$A_x(A_y, B_x, B_y, C_x, C_y \text{ ou } D) = pr_1 + pr_2 \times \left(\frac{E_1}{E_2}\right) + pr_3 \times v + pr_4 \times \left(\frac{E_1}{E_2}\right) \times v + \quad (2.13)$$

$$pr_5 \times \left(\frac{E_1}{E_2}\right) + pr_6 \times v$$

où  $A_x, A_y, B_x, B_y, C_x, C_y, D$  sont les facteurs de concentration de contraintes recherchées,  $v$  est le coefficient de Poisson et les constantes  $pr_i$  sont disponibles dans les abaques créés par Ouellet (2012).

#### 2.4.1.5 Calcul du tenseur in situ tridimensionnel

Dans ce qui précède, il a été démontré qu'une seule mesure au doorstopper modifié ne permet le calcul du tenseur de contrainte in situ 3D que dans certains cas particuliers, qui requièrent entre autres que l'angle  $\delta$  soit connu et différent de  $0^\circ$  ou  $90^\circ$  ou encore que l'orientation d'une des contraintes principales in situ soit connue et que le sondage dans lequel la mesure est effectuée soit parallèle à l'une de ces composantes. Hormis ces cas, l'obtention du tenseur 3D requiert alors de réaliser au moins une autre mesure dans un sondage d'orientation différente du premier si les méthodes inverse ou RPR sont utilisées. L'utilisation de la méthode conventionnelle requerra quant à elle trois sondages orientés différemment.

Pour ce faire, l'azimut  $\psi$  et la plongée  $\rho$  qui caractérisent chaque forage permettent de combiner les tenseurs partiels calculés dans un référentiel propre à chacun d'eux. Chaque forage est orienté par ces angles dans le référentiel Nord, Est et Vertical, NEV. Ces angles sont utilisés pour calculer les cosinus directeurs  $l_i, m_i$  et  $n_i$  propres à chaque forage  $i$  avec l'équation 2.14. Dans cette équation, l'azimut se lit par rapport au nord et augmente dans le sens horaire tandis que la plongée se lit par rapport à l'horizontale et est positive vers le haut (Corthésy, Leite, He, & Gill, 1994)

$$\begin{cases} l_{1i} = \cos(\psi_i + 90^\circ) & m_{1i} = \sin(\psi_i + 90^\circ) & n_{1i} = 0 \\ l_{2i} = \sin(\rho_i) \cos(\psi_i) & m_{2i} = \sin(\rho_i) \sin(\psi_i) & n_{2i} = \cos(\rho_i) \\ l_{3i} = \cos(\rho_i) \cos(\psi_i) & m_{3i} = \cos(\rho_i) \sin(\psi_i) & n_{3i} = -\sin(\rho_i) \end{cases} \quad (2.14)$$

où  $i$  est compris entre 1 et 3 si trois forages sont utilisés pour trouver le tenseur tridimensionnel.

La combinaison des tenseurs est faite avec l'équation de rotation tensorielle qui permet de transformer les contraintes in situ selon le référentiel recherché en utilisant les cosinus directeurs. Il est donc possible de lier les composantes de contraintes obtenues dans le référentiel du forage  $i$

identifié  $X_i Y_i Z_i$  avec les composantes du tenseur de contrainte dans le référentiel XYZ. L'équation 2.15 montre le lien entre les contraintes dans le référentiel du forage  $i$   $S_{xxi}, S_{yyi}, S_{zzi}, S_{xyi}, S_{xz_i}, S_{yz_i}$  et les contraintes  $S_{xx}, S_{yy}, S_{zz}, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}$  dans le référentiel du massif par l'entremise des cosinus directeurs. Si plus d'une mesure est faite dans chaque forage, ce qui est généralement le cas, appelons  $ij$  le nombre de mesures  $j$  faites dans le forage  $i$  (entre 2 et 3 mesures par forage), le nombre de rangées des matrices  $\bar{D}$  et  $\bar{J}$  du système d'équations 2.15 augmente et correspond à 3 fois la sommation des  $ij$  ( $\Sigma ij$ ) pour la méthode d'interprétation conventionnelle et 4 fois la sommation des  $ij$  pour la méthode RPR.

$$\begin{matrix} \bar{D} \\ \begin{pmatrix} S_{xxi} \\ S_{yyi} \\ S_{zzi} \\ S_{xyi} \\ S_{xz_i} \\ S_{yz_i} \end{pmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} l_{1i}^2 & m_{1i}^2 & n_{1i}^2 & 2m_{1i}n_{1i} & 2n_{1i}l_{1i} & 2l_{1i}m_{1i} \\ l_{2i}^2 & m_{2i}^2 & n_{2i}^2 & 2m_{2i}n_{2i} & 2n_{2i}l_{2i} & 2l_{2i}m_{2i} \\ l_{3i}^2 & m_{3i}^2 & n_{3i}^2 & 2m_{3i}n_{3i} & 2n_{3i}l_{3i} & 2l_{3i}m_{3i} \\ l_{1i}l_{2i} & m_{1i}m_{2i} & n_{1i}n_{2i} & (m_{1i}n_{2i} + n_{1i}m_{2i}) & (l_{1i}n_{2i} + n_{1i}l_{2i}) & (l_{1i}m_{2i} + m_{1i}l_{2i}) \\ l_{1i}l_{3i} & m_{1i}m_{3i} & n_{1i}n_{3i} & (m_{1i}n_{3i} + n_{1i}m_{3i}) & (l_{1i}n_{3i} + n_{1i}l_{3i}) & (l_{1i}m_{3i} + m_{1i}l_{3i}) \\ l_{3i}l_{2i} & m_{3i}m_{2i} & n_{3i}n_{2i} & (m_{3i}n_{2i} + n_{3i}m_{2i}) & (l_{3i}n_{2i} + n_{3i}l_{2i}) & (l_{3i}m_{2i} + m_{3i}l_{2i}) \end{bmatrix} \begin{matrix} \bar{J} \\ \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{yy} \\ S_{zz} \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{yz} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (2.15)$$

En effet, si la méthode de calcul conventionnelle est utilisée, certaines composantes du tenseur de contraintes exprimées dans le référentiel du forage ne sont pas entièrement définies. Il est possible dans ce cas de calculer ce que nous appellerons les 3 composantes partielles du tenseur de contraintes in situ dans le plan perpendiculaire à l'axe du sondage, qui n'incluent pas l'effet des composantes en dehors de ce plan qui ne peuvent être déterminées à partir d'une seule mesure. Il est alors nécessaire de réaliser des mesures complémentaires dans au moins deux autres sondages. Pour la méthode RPR, 4 composantes sur 6 peuvent être obtenues à partir d'une seule mesure, soit 3 composantes dans le plan perpendiculaire à l'axe du sondage ainsi que la composante parallèle à cet axe. Le tenseur est donc partiel et c'est pour cette raison qu'un deuxième forage doit être réalisé afin de déterminer l'ensemble des composantes du tenseur 3D. L'équation 2.15 peut être représentée par l'équation 2.16 lorsque les matrices  $\bar{D}$ ,  $\bar{J}$  et  $S$  sont composées respectivement des tenseurs partiels trouvés pour chaque mesure  $i$ , des cosinus directeurs et du tenseur tridimensionnel. Le nombre de rangées des matrices  $\bar{D}$  et  $\bar{J}$  est de 3 fois le nombre total de mesures pour la méthode conventionnelle et 4 fois le nombre total de mesures pour la méthode RPR.

$$\{\bar{D}\}_{(3\Sigma ij, 4\Sigma ij) \times 1} = [\bar{J}]_{(3\Sigma ij, 4\Sigma ij) \times 6} \{S\}_{6 \times 1} \quad (2.16)$$

Le tenseur tridimensionnel, (la matrice  $S$ ), est trouvé avec la méthode des moindres carrés car il s'agit d'un système d'équations linéaires surdéterminé et cette résolution permet de trouver le tenseur 3D qui minimise le carré des différences entre les composantes mesurées et celles déduites de ce tenseur, mesure par mesure. Les matrices  $\bar{D}$  et  $\bar{J}$  sont connues. La matrice  $S$  contient les contraintes recherchées et elles sont les variables qui permettent de minimiser l'erreur  $e_i$  qui est la différence entre les contraintes partielles  $\bar{D}$  mesurées et la valeur qu'elles prennent en multipliant la matrice  $\bar{J}$  par les composantes de contraintes in situ du vecteur colonne  $S$ , à l'équation 2.17.

$$e_{(3\Sigma i j, 4\Sigma i j) \times 1} = \{\bar{D}\}_{(3\Sigma i j, 4\Sigma i j) \times 1} - [\bar{J}]_{(3\Sigma i j, 4\Sigma i j) \times 6} \{S\}_{6 \times 1} \quad (2.17)$$

L'équation 2.18 représente la minimisation de la somme de ces erreurs aux carrés en faisant varier les contraintes in situ  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{zz}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{xz}$  et  $S_{yz}$  dans la matrice  $S$  du tenseur tridimensionnel recherché.

$$\min \sum (e_{(3\Sigma i j, 4\Sigma i j) \times 1})^2 = (\{\bar{D}\} - [\bar{J}] \{S\})^2 \quad (2.18)$$

#### 2.4.2 Méthode d'interprétation conventionnelle

Après avoir calculé les contraintes en fond de trou et les facteurs de concentration de contraintes, les équations liant les contraintes en fond de trou aux contraintes in situ pour les matériaux transversalement isotropes sont développées à partir de l'équation 2.12 et présentées à l'équation 2.19.

$$\begin{cases} S_{xx} = \frac{A_y \sigma_{xx} - B_x \sigma_{yy} + S_{zz} (B_x C_y - A_y C_x)}{(A_x A_y - B_x B_y)} \\ S_{yy} = \frac{-B_x \sigma_{xx} + A_x \sigma_{yy} + S_{zz} (B_y C_x - A_x C_y)}{(A_x A_y - B_x B_y)} \\ S_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{D} \end{cases} \quad (2.19)$$

où  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{zz}$  et  $S_{xy}$  sont les contraintes in situ lorsque  $\delta$  est égal à zéro,  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $D$  sont les facteurs de concentration de contraintes et  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{xy}$  sont les contraintes en fond de trou.

Les contraintes partielles  $\bar{S}_{xx}$ ,  $\bar{S}_{yy}$  et  $\bar{S}_{xy}$  pour un matériau transversalement isotrope et les constantes  $P_1$  et  $P_2$  sont déterminées pour simplifier l'équation 2.19. L'équation 2.20 est créée à

cette fin. Ces contraintes partielles sont celles que l'on obtient si l'effet de la contrainte parallèle à l'axe du forage (que l'on ne connaît pas à priori) n'est pas considéré.

$$\begin{aligned}\bar{S}_{xx} &= \frac{A_y \sigma_{xx} - B_x \sigma_{yy}}{(A_x A_y - B_x B_y)} & \bar{S}_{yy} &= \frac{-B_y \sigma_{xx} - A_x \sigma_{yy}}{(A_x A_y - B_x B_y)} & \bar{S}_{xy} &= \frac{\sigma_{xy}}{D} \\ P_1 &= \frac{B_x C_y - A_y C_x}{(A_x A_y - B_x B_y)} \\ P_2 &= \frac{B_y C_x - A_x C_y}{(A_x A_y - B_x B_y)}\end{aligned}\quad (2.20)$$

Le système d'équations 2.21 à résoudre est le suivant.

$$\begin{cases} S_{xx} = \bar{S}_{xx} + P_1 S_{zz} \\ S_{yy} = \bar{S}_{yy} + P_2 S_{zz} \\ S_{xy} = \bar{S}_{xy} \end{cases}\quad (2.21)$$

Une combinaison de mesures dans trois forages est nécessaire pour déterminer le tenseur complet. Le système 2.15 est résolu par moindres carrés avec l'équation 2.22 où  $\bar{D}$  est la matrice des contraintes partielles et  $\bar{J}$  la matrice des cosinus directeurs.

$$\begin{aligned}\{\bar{D}\}_{3 \times 3 \times 1} &= \begin{pmatrix} \bar{S}_{xxij} \\ \bar{S}_{yyij} \\ \bar{S}_{xyij} \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{xxij} - P_{1ij} S_{zzij} \\ S_{yyij} - P_{2ij} S_{zzij} \\ S_{xyij} \\ \dots \end{pmatrix} \\ [\bar{J}]_{3 \times 6} &= \begin{bmatrix} l_{1ij}^2 - P_{1ij} l_{3i}^2 & \dots \\ l_{2ij}^2 - P_{2ij} l_{3i}^2 & \dots \\ l_{1i} l_{2i} & \dots \\ \dots & \dots \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (2.22)$$

où  $ij$  représente le nombre de mesures dans chaque forage  $i$ . La matrice des cosinus directeurs est donc de dimension  $3i$  par 6.

### 2.4.3 Méthode d'interprétation RPR

Pour la méthode RPR, les lectures en continu des déformations aux jauges permettent de déterminer le paramètre RPR, « Recovered to Peak strain invariant Ratio », montré à l'équation 2.23. Cette valeur est liée à l'invariant moyen des déformations au pic  $D_{pi}$  et à l'invariant moyen des déformations résiduelles  $D_{ri}$  où  $i$  représente le type de déformation résiduelle récupéré sur le

terrain. Le RPR est lié au SR défini à l'équation 2.24 qui s'ajoute aux équations de la méthode conventionnelle. Cette équation montre un lien entre la constante SR, « Stress Ratio » et les contraintes in situ  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  et  $S_{zz}$ . L'ajout de cette équation permet de calculer quatre composantes du tenseur avec seulement une mesure, donc un forage. Rappelons que la méthode conventionnelle ne permet d'estimer aucune composante de contrainte à partir d'une mesure unique. Les composantes données par la méthode RPR sont les composantes dans le plan normal à l'axe du forage de même que la composante parallèle à cet axe. Il est alors possible de calculer le tenseur complet avec deux forages. (Corthésy, Leite, He, & Gill, 1994) ou encore d'obtenir 4 des 6 composantes du tenseur de contrainte à partir d'une seule mesure.

$$RPR = \frac{D_{ri}}{D_{pi}} \quad (2.23)$$

La figure 2.16 permet de comprendre comment calculer le RPR selon la valeur résiduelle.

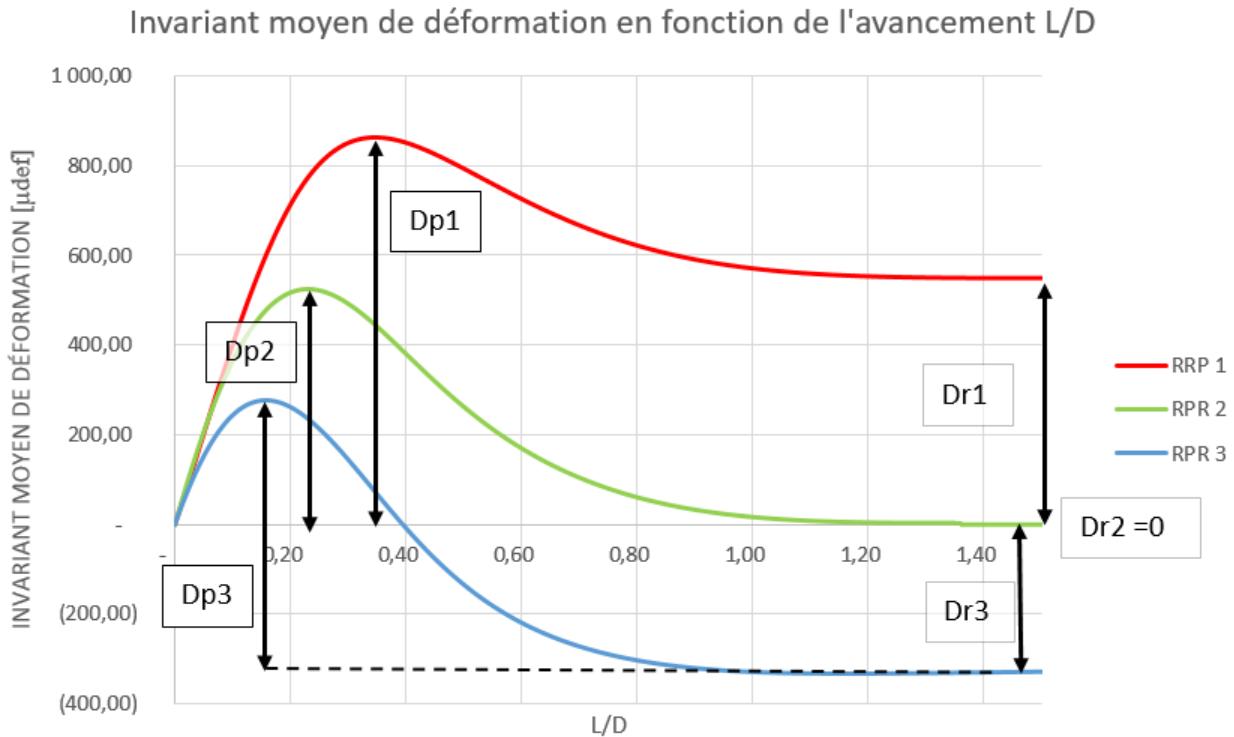


Figure 2.16 : Définition du RPR avec les courbes de déformations

$$SR = \frac{2S_{zz}}{(S_{xx}+S_{yy})} \quad (2.24)$$

Pour une roche transversalement isotrope, la valeur du SR est fonction du RPR, du coefficient de Poisson, du degré d'anisotropie et du rapport des contraintes  $S_{xx}/S_{yy}$ . Les relations SR-RPR sont obtenues à partir d'abaques qui peuvent être créés pour n'importe quels paramètres de déformabilité afin d'avoir la valeur du SR correspondant à un échantillon donné. La figure 2.17 donne un exemple pour un matériau dont le rapport d'anisotropie ( $E_1/E_2$ ) est de 2.

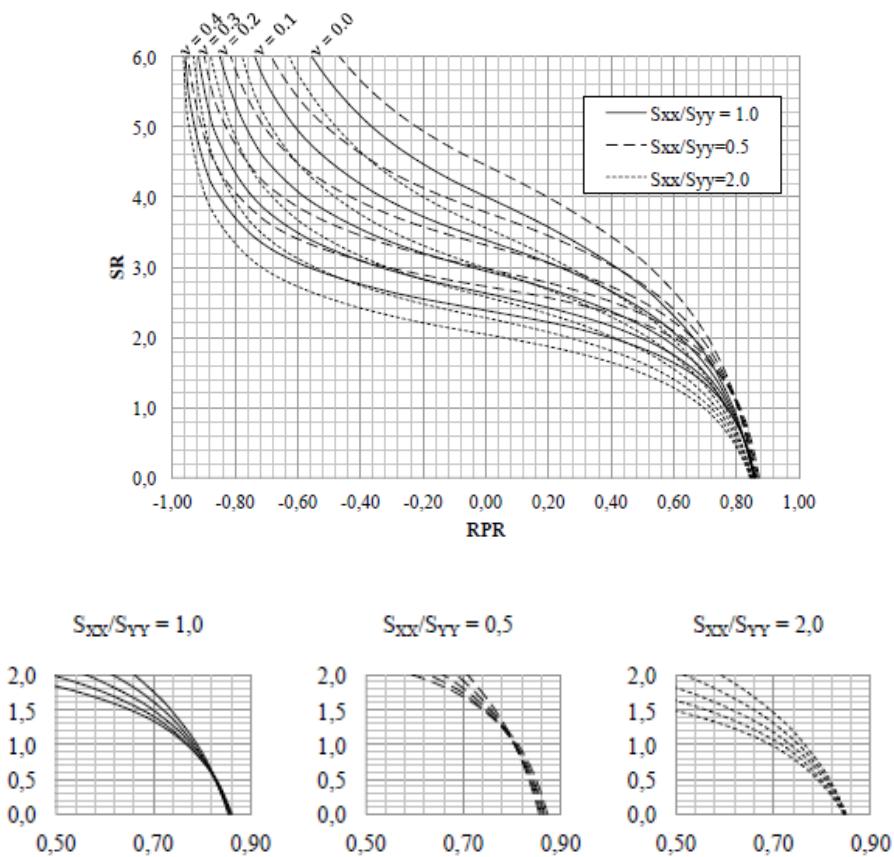


Figure 2.17 : Relation SR-RPR pour un matériau transversalement isotrope (Ouellet, 2012)

Les contraintes in situ  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{xy}$  et  $S_{zz}$  sont obtenues des contraintes partielles  $\bar{S}_{xx}$ ,  $\bar{S}_{yy}$  et  $\bar{S}_{xy}$  calculées avec l'équation 2.20 tirée de la méthode conventionnelle d'interprétation en y ajoutant l'effet de  $S_{zz}$  avec l'équation 2.21. La contrainte in situ dans l'axe du forage  $S_{zz}$  est calculée avec l'équation 2.25 trouvée en combinant les équations 2.19 et 2.24 lorsque l'angle  $\delta$  est considéré nul.

$$S_{zz} = \frac{SR(\sigma_{xx}(A_y - B_y) + \sigma_{yy}(A_x - B_x))}{2(A_x A_y - B_x B_y) + SR(A_x C_y + A_y C_x - B_x C_y - B_y C_x)} \quad (2.25)$$

où  $A_x, A_y, B_x, B_y, C_x$  et  $C_y$  sont les facteurs de concentration de contraintes, SR est le « Stress Ratio » et  $S_{zz}$  la contrainte dans l'axe du forage.

Les matrices des contraintes partielles  $\bar{\mathbf{D}}$  et des cosinus directeurs  $\bar{\mathbf{J}}$  sont maintenant de dimension  $4\Sigma_{ij}$  par 6,  $i$  étant le nombre de mesures réalisées dans un minimum de deux forages. Le système d'équations 2.26 à résoudre pour trouver le tenseur partiel est le suivant, lorsque l'angle  $\delta$  est nul :

$$\begin{cases} S_{xx} = \bar{S}_{xx} + P_1 S_{zz} \\ S_{yy} = \bar{S}_{yy} + P_2 S_{zz} \\ S_{zz} = \bar{S}_{zz} \\ S_{xy} = \bar{S}_{xy} \end{cases} \quad (2.26)$$

Les matrices  $\bar{\mathbf{D}}$  et  $\bar{\mathbf{J}}$  sont créées selon l'équation 2.27.

$$\begin{aligned} \{\bar{\mathbf{D}}\}_{4\Sigma_{ij} \times 1} &= \begin{Bmatrix} \bar{S}_{xx_{ij}} \\ \bar{S}_{yy_{ij}} \\ \bar{S}_{zz_{ij}} \\ \bar{S}_{xy_{ij}} \\ \dots \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{xx_{ij}} - P_{1ij} S_{zz_{ij}} \\ S_{yy_{ij}} - P_{2ij} S_{zz_{ij}} \\ S_{zz_{ij}} \\ S_{xy_{ij}} \\ \dots \end{Bmatrix} \\ [\bar{\mathbf{J}}]_{4\Sigma_{ij} \times 6} &= \begin{bmatrix} l_{1i}^2 - P_{1ij} l_{3i}^2 & \dots \\ l_{2i}^2 - P_{2ij} l_{3i}^2 & \dots \\ l_{3i}^2 & \dots \\ l_{1i} l_{2i} & \dots \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.27)$$

L'abaque du SR en fonction du RPR étant utilisé avec le rapport  $S_{xxij}/S_{yyij}$ , il faut passer du référentiel XYZ au référentiel  $X_i Y_i Z_i$  de chaque forage afin de trouver la valeur de ce rapport. Au départ, ce rapport n'étant pas connu, il est fixé à 1.0, puis sa valeur change après chacune des résolutions par moindres carrés du système d'équations 2.37. Les itérations prennent fin lorsque le rapport converge vers une même valeur de SR. Il est possible que la convergence des résultats d'une mesure demande plus d'itérations qu'une autre.

Il est envisageable de combiner les méthodes conventionnelles et RPR lorsque l'allure des courbes récupérées sur une mesure n'est pas habituelle et mène à une valeur du RPR supérieure à 0.84. Pour ce faire, le tenseur bidimensionnel est utilisé pour les mesures inhabituelles en modifiant les matrices  $\bar{D}$  et  $\bar{J}$  selon les composantes connues.

#### 2.4.4 Méthode inverse

Cette méthode d'interprétation a été développée par Fouial, Alheib, Baroudi & Trentaux (1998) pour la cellule triaxiale CSIRO afin de pouvoir interpréter les mesures si les déformations résiduelles ne sont pas disponibles suite à une rupture dans le manchon de roche. Pour ce projet, les résultats obtenus en comparant les données extraites de modèle numérique et celles provenant du terrain ont été concluants. Parmi les conclusions présentées dans cet article, il est indiqué que la contrainte en cisaillement est la moins bien estimée par cette méthode. (Fouial, Alheib, Baroudi & Trentaux, 1998). Toutefois, cette conclusion est discutable étant donné que les auteurs n'indiquent pas le critère utilisé pour justifier cette affirmation. De plus, il pourrait s'agir de problèmes liés à la prise de mesure et non à la méthode elle-même. Par la suite, un programme de contrôle de qualité des mesures pour l'utilisation de cette méthode a été présentée par Hakala, Hudson & Christianson (2003). Dans ce second travail, il est indiqué que le tenseur trouvé est très sensible à la combinaison « déformation et avancement ». Il y est recommandé d'avoir une lecture des avancements précise au millimètre afin que l'agencement entre les déformations de terrain et celles simulées numériquement donne un tenseur correspondant aux mesures de terrain. (Hakala, Hudson, & Christiansson, 2003)

Cette méthode appliquée au doorstopper, présentée dans le mémoire de Vézina (2014), vise à améliorer la fiabilité de tenseurs obtenus en utilisant un maximum de données de terrain plutôt que de se limiter aux seules déformations récupérées une fois les contraintes complètement relâchées ou encore leur combinaison avec les déformations au pic définies précédemment. Le plus grand avantage de cette méthode d'interprétation est qu'elle offre la possibilité théorique de déterminer le tenseur à six composantes avec seulement une mesure dans un forage si l'angle  $\delta$  est connu et compris entre 0 et 90 degrés selon l'équation 2.19. Toutefois, étant donné que l'angle  $\delta$  est posé à zéro (le forage est supposé parallèle au plan d'isotropie), les contraintes en cisaillement  $S_{xz}$  et  $S_{yz}$  ne peuvent pas être calculées avec un seul forage, à moins que celui-ci ne soit parallèle à une contrainte principale ce qui rendrait les contraintes  $S_{xz}$  et  $S_{yz}$  nulles. De plus, si une seule mesure

est utilisée, l'effet des erreurs expérimentales sur les résultats peut être considérable tel que démontré par Vézina (2014). Étant donné que l'objectif du présent travail est d'appliquer la méthode inverse à des données de terrain afin d'obtenir le tenseur de contraintes in situ, les différentes étapes associées à l'application de la méthode inverse à des données de terrain seront présentées dans le chapitre suivant.

#### **2.4.4.1 Analyse de sensibilité de la méthode inverse appliquée aux mesures au doorstopper modifié**

La méthode inverse a été validée pour le doorstopper modifié avec des déformations synthétiques par Vézina (2014) et celle-ci a analysé différentes sources d'erreur afin de vérifier leur impact sur la méthode inverse. Le bruit sur les lectures des déformations, l'utilisation d'un angle  $\delta$  nul au lieu de l'angle réel, des erreurs sur la lecture de l'avancement de la foreuse et l'erreur sur les paramètres de déformabilité ont été analysés par Vézina (2014).

Le bruit sur les déformations récupérées peut être causé par les vibrations de la foreuse ou par la pression de l'eau de forage qui varie de façon cyclique avec certains types de pompes utilisées. Il est possible d'observer le bruit sur les courbes lorsque les déformations récupérées varient en dents de scie. Pour simuler ce bruit, Vézina (2014) a ajouté une erreur aléatoire ou bruit aléatoire à des courbes de récupération synthétiques afin de simuler cette situation. Ce bruit suit une fonction de densité de probabilité équiprobable et est appliquée sur la déformation principale majeure (équation 2.6). Par la suite, la méthode inverse a été utilisée pour déterminer le tenseur ayant servi à générer ces courbes. En excluant les valeurs trouvées pour les contraintes  $S_{xz}$  et  $S_{yz}$  qui ne peuvent pas être déterminées lorsque  $\delta$  est nul, les erreurs trouvées sont faibles. La plus grande erreur se situe sur la contrainte  $S_{zz}$ . L'erreur sur  $S_{zz}$  est généralement un peu inférieure au bruit ajouté. Par exemple, pour un degré d'anisotropie ( $E_1/E_2$ ) de 2 et un bruit de  $\pm 20\%$ , l'erreur sur  $S_{zz}$  est de 15%. Toutefois, lorsque les mêmes courbes de récupération sont interprétées par les méthodes conventionnelles et RPR, celles-ci donnent de plus grandes erreurs.

L'effet de l'hypothèse voulant que l'angle  $\delta$  soit nul a été analysé par Vézina (2014) en simulant le comportement de matériau ayant un angle  $\delta$  de  $45^\circ$ , un degré d'anisotropie ( $E_1/E_2$ ) de 2 ou 1.5 pour des coefficients de Poisson de 0, 0.1, 0.2, 0.3 et 0.4 et deux chargements différents. Il y a donc un total de 20 combinaisons de paramètres permettant le calcul des erreurs relatives pour chaque composante. De manière générale, il y a sous-estimation de  $S_{xx}$  et  $S_{yy}$  et surestimation de  $S_{zz}$  et  $S_{xy}$ .

La composante  $S_{xx}$  a toujours la plus petite erreur relative et la composante  $S_{zz}$  la plus grande. En moyenne pour les cas analysés, l'erreur relative pour les composantes  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{zz}$  et  $S_{xy}$  sont respectivement -6%, -12.5%, +22.25% et +9.75%. Dans l'ensemble, les erreurs varient de 2% à 31% et le coefficient de Poisson a un impact sur celles-ci selon les cas étudiés.

Vézina (2014) a aussi évalué l'erreur causée sur le tenseur de contraintes calculé avec la méthode inverse lorsque l'estimation de l'avancement de la foreuse est erronée. En multipliant les valeurs de l'avancement de la foreuse par différents facteurs, les erreurs relatives des contraintes in situ déterminées avec la méthode inverse ont été compilées. Pour un facteur multiplicateur inférieur à 1, c'est-à-dire une sous-estimation de l'avancement réel, lorsque  $v$  est inférieur à 0.2, il y a sous-estimation des contraintes et surestimation pour les  $v$  supérieurs à 0.2. Lorsque  $v$  est égal à 0.2, l'erreur sur les contraintes est inférieure à 2%. Les erreurs sur les contraintes varient linéairement selon  $v$ . Le comportement inverse se produit lorsque le facteur multiplicateur est supérieur à 1, c'est-à-dire lorsque l'avancement est surestimé. La figure 2.18 est tirée des travaux de Vézina (2014) et présente les erreurs relatives obtenues sur les différentes composantes de contraintes pour un facteur multiplicateur de 0.67. Lorsque  $v$  est situé entre 0.1 et 0.3, l'erreur est inférieure ou égale à 15% pour les cas analysés. La contrainte dans l'axe du forage  $S_{zz}$  est la plus influencée par la progression du forage exprimé par le rapport  $L/D$  où  $L$  est la longueur forée et  $D$  le diamètre de la carotte produite.

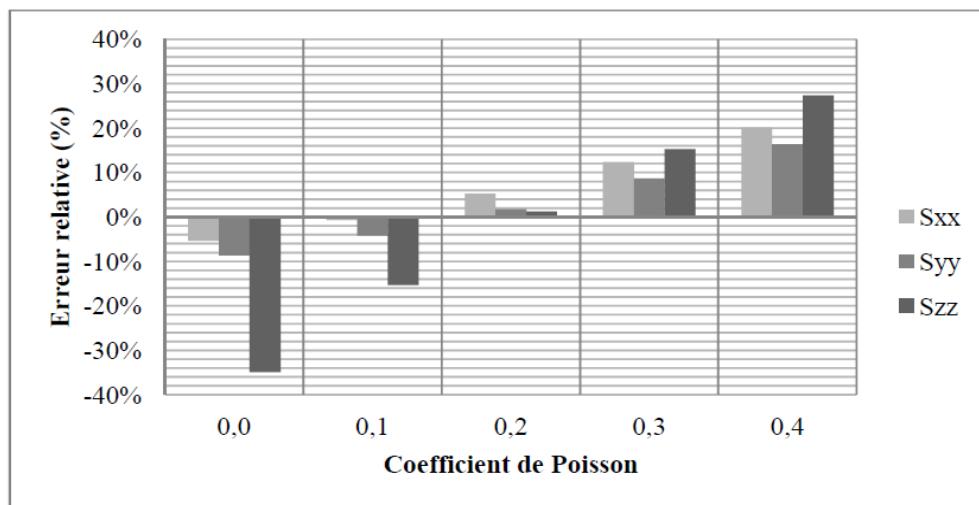


Figure 2.18 : Erreur relative sur les contraintes estimées par la méthode inverse due à une sous-estimation de -33% de l'avancement de la foreuse (Vézina, 2014)

Pour l'erreur sur l'estimation des contraintes associée à une mauvaise estimation de  $v$ , un matériau avec un  $v$  de 0.2 est utilisé pour obtenir les déformations récupérées. Les valeurs de  $v$  erronées utilisées avec la méthode inverse sont alors fixées à 0.1 et 0.3. Les erreurs relatives sur les contraintes trouvées ont été compilées pour chaque coefficient de Poisson et lorsque le coefficient est sous-estimé, les contraintes le sont aussi et vice versa avec un coefficient de Poisson surestimé. Toutes choses étant égales, l'erreur varie en proportion de l'intensité de la contrainte dans l'axe du forage  $S_{zz}$ .

En ce qui concerne l'effet d'une erreur sur le module de Young, celle-ci se reflète directement sur les contraintes calculées. L'un des grands avantages de la méthode est la possibilité de savoir si le tenseur estimé est bon en comparant les courbes synthétiques avec les courbes estimées par la méthode inverse. Lorsque les courbes synthétiques et estimées sont parfaitement juxtaposées, le tenseur estimé est le même que le tenseur appliqué pour générer ces courbes. Rappelons que cette affirmation n'est valable pour des courbes synthétiques générées par un modèle numérique sans effets parasites ou environnementaux qui ne sont pas inclus dans le modèle mais qui peuvent se manifester avec des données de terrain.

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie utilisée pour atteindre l'objectif fixé à la section 1.2 est présentée dans ce chapitre. Avant d'appliquer la méthode inverse, les déformations récupérées en continu doivent être corrigées pour les effets de la température et les paramètres de déformabilité des carottes et les angles  $\beta$  et  $\omega$  liés à chacune des mesures doivent être obtenus.

Ce chapitre débute avec la présentation de la méthode inverse. Les différentes étapes pour la mise en oeuvre de ce principe sont expliquées avec les particularités apportées à la méthode afin d'utiliser des données de terrain. Ce chapitre se termine avec la prise en compte de l'hétérogénéité de la carotte composée de deux matériaux de déformabilités différentes en appliquant un facteur de correction au tenseur estimé.

### 3.1 Méthode inverse appliquée à des données de terrain

La méthode inverse est une méthode d'interprétation qui utilise le principe de superposition pour déterminer les contraintes *in situ*. Les différentes étapes à suivre, une fois que les paramètres énoncés en début de chapitre sont connus, consistent à :

- Produire les courbes de récupération correspondant aux différents chargements unitaires pour un matériau ayant les paramètres  $E_1$ ,  $E_2$  et  $v$ ;
- Trouver les équations permettant de représenter les différentes courbes pour fins d'interpolation;
- Appliquer le principe de superposition pour lier les différents chargements unitaires entre eux;
- Utiliser les moindres carrés avec les courbes de déformations de terrain et les courbes produites par le modèle numérique pour trouver le tenseur de contrainte qui minimise l'écart entre les deux séries de courbes de récupération.

#### 3.1.1 Présentation du modèle 3D

La simulation numérique est utilisée pour modéliser un matériau transversalement isotrope sous l'effet des contraintes *in situ* et d'une saignée. Ce modèle permet d'obtenir des déformations récupérées pendant la saignée ne comportant aucune erreur expérimentale. La présentation du

modèle est faite par partie, soit : la géométrie, le système de référence, l'assignation des paramètres de déformabilité, les conditions aux frontières et initiales et enfin le maillage.

### 3.1.1.1 Géométrie

Le modèle numérique conçu par Ouellet (2012) avec le logiciel Comsol © permet de simuler le forage de relâchement de contrainte dans une roche transversalement isotrope pour un calibre de forage NX (diamètre du trou 75.7 mm et de la carotte 54.7 mm). Le modèle est un cube de 1000 millimètres de côté. Un trou en pleine section partant du centre d'une des faces du cube est foré en une étape jusqu'à une profondeur de 454 mm. Le prolongement de ce trou en 29 étapes permet de former une carotte de 160 mm de longueur. Ceci permet de relâcher graduellement les contraintes en fond de trou permettant la simulation de ce qui se fait sur le terrain. La figure 3.1 est tirée des travaux de Ouellet (2012) et illustre ce qui est décrit. Sur cette figure, les dimensions sont en mm.

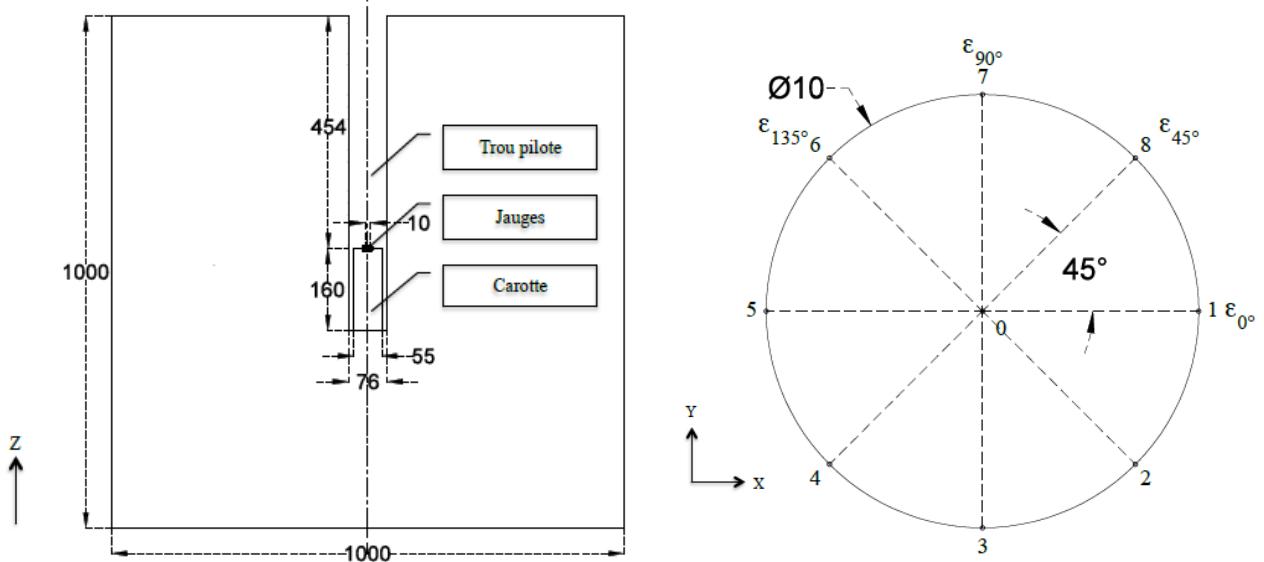


Figure 3.1 : Représentation 2D du modèle simulant la saignée et vue de la zone en fond de trou couverte par la rosette du doorstopper montrant les points utilisés pour calculer les déformations (Ouellet, 2012)

### 3.1.1.2 Système de référence

Le matériau composant le modèle est homogène et suit un comportement élastique linéaire. Un matériau orthotrope accessible dans les lois de comportement de base du logiciel Comsol © est utilisé au départ pour modéliser le comportement contrainte-déformation d'un matériau

transversalement isotrope, en procédant à une simplification de cette configuration en fixant des égalités entre certains paramètres de déformabilité. Le système de référence du matériau orthotrope est  $x_1x_2x_3$ . L'axe  $x_3$  est normal au plan d'isotropie qui est situé sur le plan  $x_1x_2$  où l'axe  $x_1$  est parallèle à la jauge de référence. Afin de pouvoir représenter n'importe quel matériau transversalement isotrope, une rotation des plans d'isotropie est possible grâce aux angles  $\omega$  et  $\delta$  définis auparavant. La figure 3.2 tirée du mémoire de Ouellet (2012) permet de visualiser les différents axes et angles définissant les plans d'isotropie. Lorsque ces angles sont nuls, la configuration des plans d'isotropie sur la carotte est la même que sur la figure 2-17 donc  $x_1=X$ ,  $x_2=Z$  et  $x_3=Y$ .

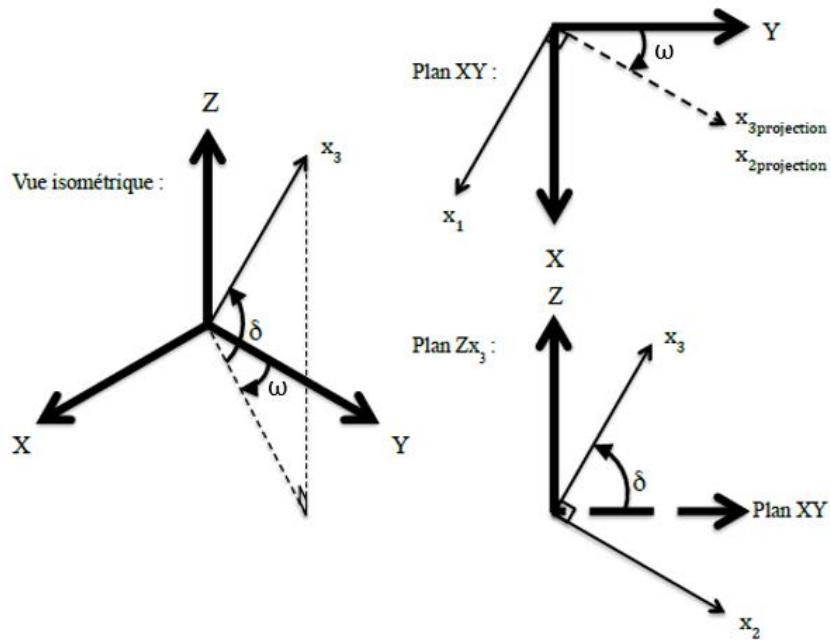


Figure 3.2 : Système de référence du modèle simulant une saignée avec le doorstopper (Ouellet, 2012)

### 3.1.1.3 Assignation des paramètres de déformabilité

Le référentiel  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  est utilisé pour assigner les paramètres de déformabilité, déterminés sur les carottes obtenues sur le terrain, dans le modèle.

-Le module de Young  $E_1$  est le module du plan d'isotropie, il est assigné aux axes  $x_1$  et  $x_2$  et le module  $E_2$  agit dans la direction de l'axe  $x_3$ .

-Le module de cisaillement  $G_1$  agit dans le plan  $x_1x_2$  et le module  $G_2$  sur les deux autres plans  $x_1x_3$  et  $x_2x_3$ .

-Le coefficient de Poisson est le même sur tous les plans selon l'hypothèse du modèle anisotrope équivalent.

La figure 3.3 illustre l'assignation des paramètres de déformabilité pour un matériau transversalement isotrope avec les angles  $\omega$  et  $\delta$  nul.

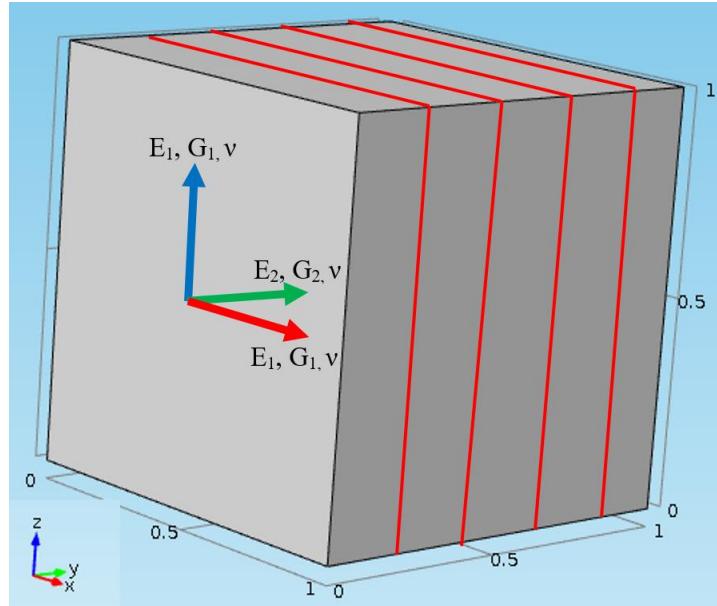


Figure 3.3 : Illustration de l'assignation des paramètres de déformabilité pour un matériau transversalement isotrope avec les angles  $\omega$  et  $\delta$  nuls

#### 3.1.1.4 Conditions aux frontières et initiales du modèle

Les frontières externes du modèle sont fixées dans l'espace en translation et en rotation et les contraintes in situ sont initialisées dans le modèle. Dans le cas d'un modèle hétérogène qui sera traité plus loin dans le mémoire, cette façon de procéder sera modifiée. Afin d'obtenir les courbes de déformations qui seraient mesurées sur le terrain en fonction de l'avancement de la foreuse, il faut soustraire les déformations présentes en fond de trou suite à l'excavation du trou pilote de celles obtenues pendant la saignée.

#### 3.1.1.5 Maillage

Le maillage est très fin et symétrique à l'endroit où les déplacements aux jauge virtuelles seront requis pour le calcul des déformations. Il y a un total de 32 éléments sur la circonference de la carotte excavée en fond de trou et sur la circonference de la rosette virtuelle. La figure 3.4 tirée des travaux de Ouellet (2012) présente le maillage en fond de trou.

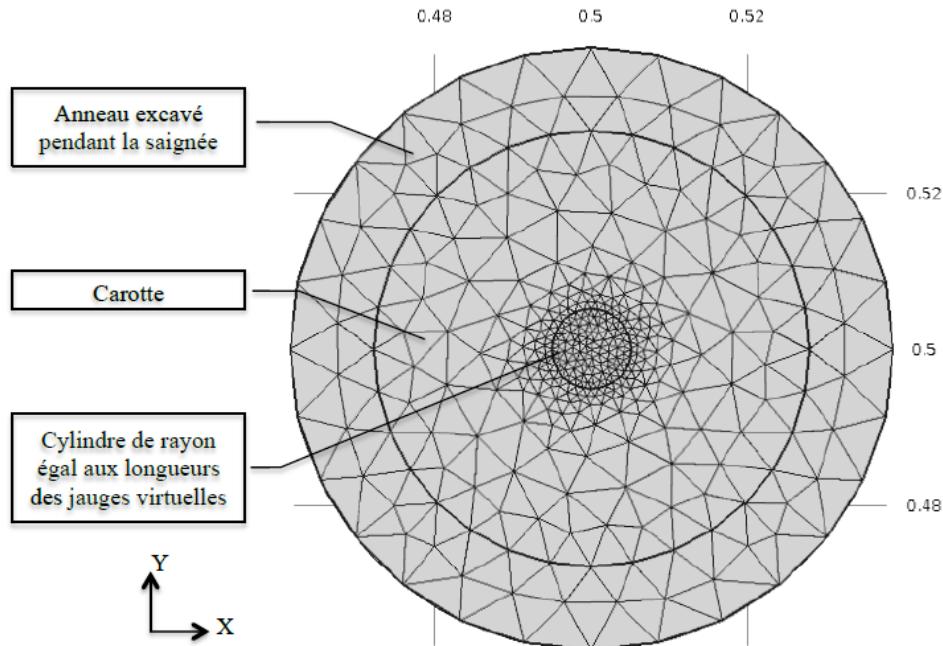


Figure 3.4 : Maillage au fond du trou pilote (Ouellet, 2012)

Le reste du maillage est fixé selon les paramètres suivants :

- Taille maximale d'un élément : 100 mm;
- Taux de croissance maximal entre éléments : 1.4;
- Rapport entre la taille maximale d'éléments sur des frontières courbes et le rayon de courbure de ces frontières : 0,3.

La figure 3.5 illustre la disposition de ce maillage sur le modèle entier.

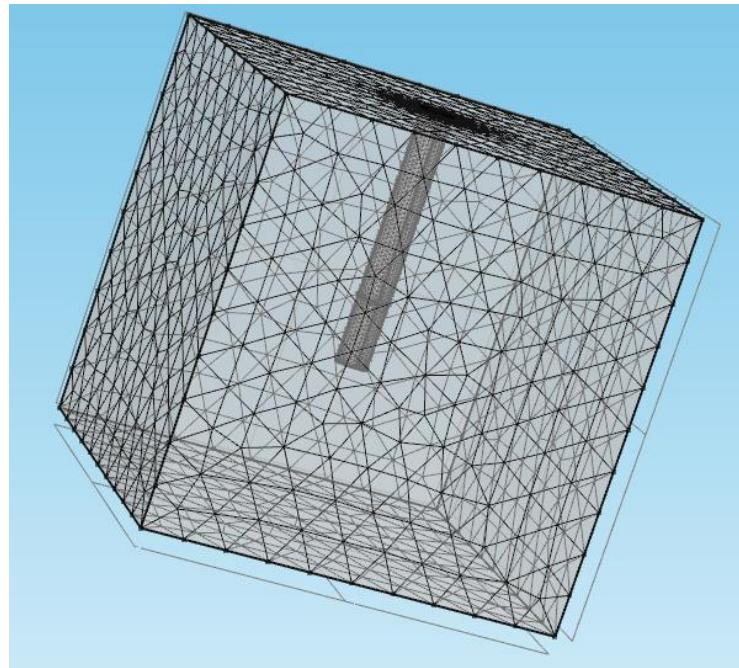


Figure 3.5 : Illustration du maillage sur les extrémités du modèle

Les modèles permettant de recréer les essais de compression biaxiale et diamétrale ont aussi été créés par Ouellet (2012) et ils utilisent les dimensions de la carotte extraite pendant la saignée. Seules les conditions aux frontières sont modifiées de manière à représenter chacun de ces essais. Ces modèles sont utilisés pour simuler l'ensemble des opérations qui seraient menées afin de réaliser des mesures et les interpréter avec la méthode inverse et ils ne sont pas requis pour l'interprétation des mesures de terrain, leur usage étant limité aux analyses paramétriques réalisées dans le cadre de ce travail, en particulier l'analyse de l'effet de l'hétérogénéité de déformabilité le long de l'axe du forage

### 3.1.2 Courbes de récupération pour des chargements unitaires

L'application d'une seule des six composantes du tenseur de contrainte à la fois, avec une intensité de 1.0 MPa, et la simulation du prolongement du forage en 29 étapes, permet l'obtention de ce qui est appelé les courbes de récupération unitaires. Ces courbes sont produites pour chacune des 4 jauge et pour les 6 composantes du tenseur, ce qui donnerait un maximum de 24 courbes de récupération unitaires. Si l'on considère la redondance d'information associée à la présence de 4 jauge de déformations, il y a en réalité 18 courbes indépendantes (voir équ. 2.3). Tout dépendant de l'orientation des axes d'anisotropie relativement à l'axe du forage, ce nombre peut être moindre.

Partant des déplacements aux nœuds calculés par le modèle numérique, les déformations aux jauge sont données par l'équation 3.1 et considèrent un allongement des jauge comme positif.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_0 &= \frac{u_1 - u_5}{L} \\
 \varepsilon_{90} &= \frac{v_7 - v_3}{L} \\
 \varepsilon_{45} &= -\frac{\sqrt{\left[\left(\left(\frac{L}{2}\cos(45^\circ) + u_8\right) - \left(\frac{L}{2}\cos(225^\circ) + u_4\right)\right]^2 + \left[\left(\frac{L}{2}\sin(45^\circ) + v_8\right) - \left(\frac{L}{2}\sin(225^\circ) + v_4\right)\right]^2} - L}{L} \\
 \varepsilon_{135} &= -\frac{\sqrt{\left[\left(\left(\frac{L}{2}\cos(135^\circ) + u_6\right) - \left(\frac{L}{2}\cos(315^\circ) + u_2\right)\right]^2 + \left[\left(\frac{L}{2}\sin(135^\circ) + v_6\right) - \left(\frac{L}{2}\sin(315^\circ) + v_2\right)\right]^2} - L}{L}
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

où  $u_i$  et  $v_i$  sont respectivement les déplacements selon les axes x et y de chacune des jauge et i correspond à la numérotation des nœuds du modèle tel que montré à la figure 3-2.

### 3.1.3 Équations rationnelles polynomiales et principe de superposition

Une fois que les courbes unitaires sont produites pour chaque jauge  $\varepsilon_{\theta^\circ}$ , l'équation 3.2 choisie par Vézina (2014) permet d'estimer les valeurs de déformations pour n'importe quel rapport L/D et les facteurs de ce polynôme rationnel de a à i sont obtenus avec le logiciel de régression Tablecurve 2D.

$$\varepsilon_{\theta^\circ(S_{ij}=1)} = \frac{a + c\left(\frac{L}{D}\right) + e\left(\frac{L}{D}\right)^2 + g\left(\frac{L}{D}\right)^3 + i\left(\frac{L}{D}\right)^4}{1 + b\left(\frac{L}{D}\right) + d\left(\frac{L}{D}\right)^2 + f\left(\frac{L}{D}\right)^3 + h\left(\frac{L}{D}\right)^4} \quad (3.2)$$

La superposition de l'effet de chacune des composantes du tenseur de contrainte est applicable car le matériau modélisé est homogène et se déforme selon la loi de comportement d'élasticité linéaire montré à l'équation 2.3. Ceci permet de trouver les courbes de déformations récupérées pour un chargement quelconque (CQ) en multipliant les déformations unitaires par le chargement CQ en utilisant l'équation 3.3 où les  $S_{ij}$  sont les intensités de chacune des composantes.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{\theta^\circ(CQ)} &= S_{xx}\varepsilon_{\theta^\circ(S_{xx}=1)} + S_{yy}\varepsilon_{\theta^\circ(S_{yy}=1)} + S_{zz}\varepsilon_{\theta^\circ(S_{zz}=1)} + S_{xy}\varepsilon_{\theta^\circ(S_{xy}=1)} + S_{xz}\varepsilon_{\theta^\circ(S_{xz}=1)} \\
 &\quad + S_{yz}\varepsilon_{\theta^\circ(S_{yz}=1)} \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

### 3.1.4 Estimation des contraintes in situ

La méthode des moindres carrés est utilisée car l'ensemble des déformations selon chaque pas d'avancement donne un système surdéterminé. Les déformations de terrain subissent une rotation  $\omega$  afin que la déformation à la jauge de 0 degré corresponde à la déformation sur le plan d'isotropie. Avec les déformations de terrain représentées par la matrice  $\bar{D}$  et les courbes de déformations unitaires, dans la matrice  $\bar{J}$ , qui sont multipliées par le tenseur inconnu  $S$ , le tenseur partiel est trouvé par la minimisation de l'erreur entre les déformations réelles et les déformations estimées en faisant varier les contraintes appliquées.

Une fois que la minimisation est faite, le tenseur partiel subit une rotation d'angle  $\beta$  afin d'être ramené dans un référentiel commun aux autres mesures. Ceci permet de comparer les tenseurs trouvés avec différentes mesures dans un même forage comme expliqué dans la section 2.4.1.5. Une fois que les tenseurs partiels dans différents forages sont obtenus, la combinaison de ceux-ci permet d'obtenir le tenseur tridimensionnel. La validation du modèle est présentée dans l'annexe A.

### 3.1.5 Méthode inverse appliquée à des courbes partielles

Lors des mesures sur le terrain, il est possible qu'un problème survienne (bris d'équipement ou de la carotte) et que la courbe de déformations recueillies ne soient pas complète. Il est donc utile de vérifier si le tenseur partiel calculé avec la méthode inverse donne des résultats fiables lorsque les déformations situées après le pic ne sont pas disponibles. Une autre raison voulant que l'utilisation d'une partie des données de la courbe de récupération soit faite, est de pouvoir donner plus de poids dans la méthode des moindres carrés à certaines données, comme celles qui précèdent le pic, au moment où le relâchement des contraintes est le plus rapide en fonction de l'avancement du forage. Ceci permet de donner moins de poids au plateau post-pic, ce qui pourrait permettre un meilleur ajustement aux données pré-pic. Pour vérifier l'influence que peut avoir l'utilisation de données partielles, des courbes de déformations récupérées sont générées à partir du modèle numérique avec un tenseur quelconque. Seules les déformations situées avant le pic de déformation sont utilisées pour estimer les contraintes. La méthode inverse est ensuite appliquée pour calculer le tenseur utilisé pour créer ces courbes. Le modèle utilisé simule un comportement transversalement isotrope ayant les paramètres suivant :  $E_1 = 27,94 \text{ GPa}$ ,  $E_2 = 18,03 \text{ GPa}$  et  $\nu = 0,166$ , qui est l'un des cas de terrain analysé dans le cadre de ce projet.

La figure 3.6 illustre l'agencement des courbes de terrain simulées et des courbes de déformations obtenues avec le principe de superposition pour un chargement suivant la nomenclature suivante  $\{S_{xx}; S_{yy}; S_{zz}; S_{xy}\}$  MPa de  $\{30; 10; 20; -5\}$  MPa. Sur cette figure, le terme terrain est utilisé pour identifier les données utilisées pour l'estimation du tenseur à l'aide de la méthode inverse. Le tenseur trouvé est exactement le tenseur utilisé pour simuler le relâchement ce qui donne une différence nulle entre les déformations de terrain et calculées. Cette différence appelée résidu peut être normalisée avec le nombre de données utilisées. Cela permet de confirmer une évidence voulant qu'en l'absence de phénomènes parasites, un résidu normalisé se rapprochant de zéro est un bon indicateur de la justesse du tenseur calculé.

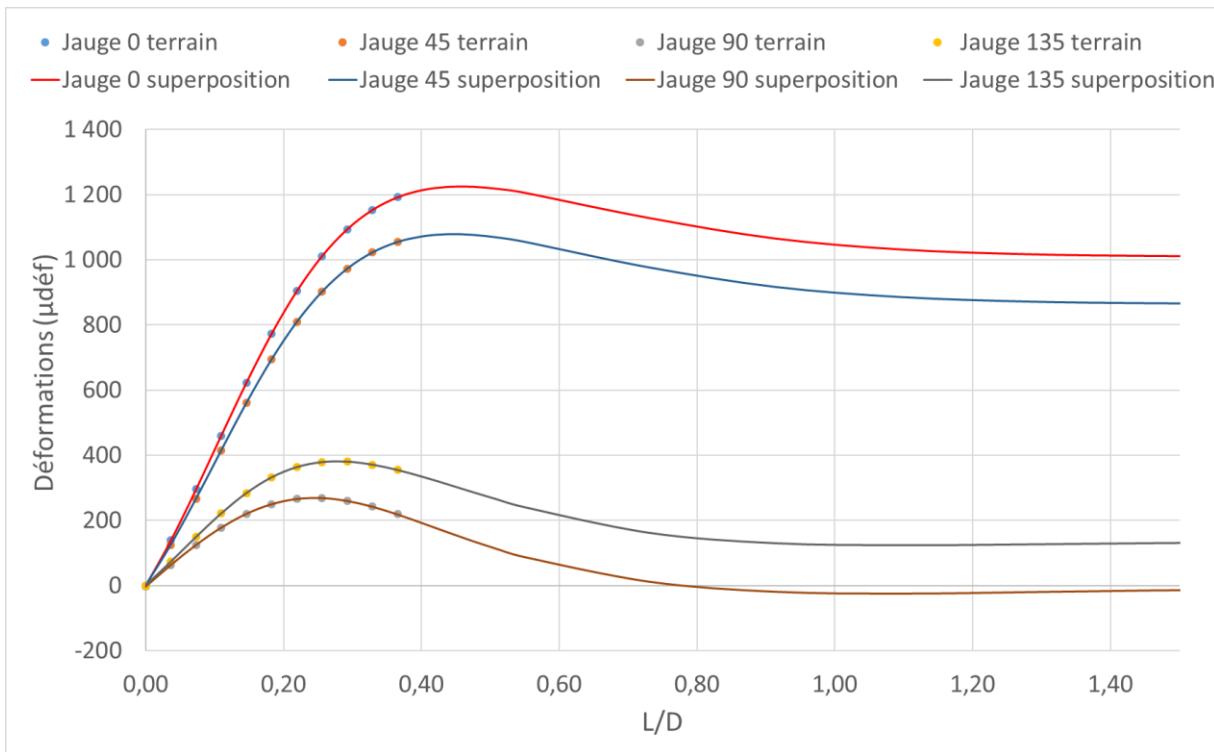


Figure 3.6 : Utilisation des déformations pré-pic pour déterminer le tenseur partiel

### 3.1.6 Correction de l'avancement de la mesure du forage

Afin de corriger d'éventuelles erreurs sur la mesure de l'avancement du forage de relâchement, des corrections peuvent être appliquées sur les valeurs mesurées sur le terrain. Ces erreurs peuvent provenir d'erreurs de calibration, de la difficulté à estimer le moment exact où le taillant commence à pénétrer la roche, de la déformation des tubes de forage sous la poussée de la foreuse, d'un vissage incomplet de certains tubes de forage ou encore d'un glissement possible des mâchoires de la

foreuse autour des tubes de forage, certaines sources d'erreur venant de ce que sur le terrain, l'avancement du forage consiste à mesurer l'avancement des mâchoires et non pas du taillant directement. Les corrections consistent à modifier les déplacements des mâchoires de la foreuse en leur ajoutant une constante et un facteur (équation linéaire) ou encore en utilisant des polynômes permettant une correction non-linéaire. Les équations 3.4 à 3.6 sont des exemples de fonctions utilisées dans le présent mémoire.

$$\frac{L_{corrigée}}{D} = a + b \times \frac{L_{mesurée}}{D} \quad (3.4)$$

$$\frac{L_{corrigée}}{D} = a + b \times \frac{L_{mesurée}}{D} + c \times \left( \frac{L_{mesurée}}{D} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$\frac{L_{corrigée}}{D} = a + b \times \frac{L_{mesurée}}{D} + c \times \left( \frac{L_{mesurée}}{D} \right)^2 + d \times \left( \frac{L_{mesurée}}{D} \right)^3 \quad (3.6)$$

L'estimation des paramètres de ces fonctions se fait en les ajoutant comme variables à optimiser dans la procédure des moindres carrés, tout comme les 6 composantes du tenseur de contraintes in situ. Ce traitement est grandement facilité par l'utilisation du Solveur © intégré au logiciel Excel ©.

La prise en compte de l'anisotropie dans la détermination des contraintes en fond de trou est une amélioration proposée entre autres par Corthésy (1982) et généralisée récemment par Ouellet (2012). L'homogénéité de la roche est une hypothèse importante pour l'application des méthodes conventionnelle, RPR et inverse. La prise en compte d'un cas précis d'hétérogénéité pour déterminer le tenseur partiel est présentée dans la prochaine section.

### 3.2 Effet de l'hétérogénéité de la roche sur la méthode inverse

L'effet de l'hétérogénéité à l'échelle de la carotte sur l'interprétation des mesures de contrainte avec la méthode inverse est étudié grâce à des modifications apportées aux modèles de Ouellet (2012) simulant la saignée, la compression biaxiale et la compression diamétrale. L'hétérogénéité étudiée dans ce travail est liée à la variation de la déformabilité de la carotte le long de son axe longitudinal. Le modèle numérique créé par Ouellet (2012) simulant la saignée ne peut être utilisé directement, car celui-ci initialise les contraintes de façon uniforme dans tout le modèle avant le

forage ce qui ne permet pas d'introduire l'influence du contraste de déformabilité des deux matériaux sur la distribution de contraintes.

La présence de deux matériaux a un effet sur les paramètres de déformabilité déterminés avec les recharges en laboratoire et les courbes de récupération obtenues d'une saignée. Il sera démontré qu'en faisant varier la longueur de carotte chargée lors de l'essai de compression biaxiale, il est possible de déterminer si la carotte est hétérogène ou non. Des facteurs de correction sont ensuite déterminés et permettent de diminuer l'erreur faite sur le calcul des contraintes.

### 3.2.1 Modèle hétérogène

Les modifications apportées au modèle simulant la saignée sont présentées ci-après. L'assignation des matériaux et le maillage restent les mêmes que les modèles créés par Ouellet (2012).

#### 3.2.1.1 Géométrie et matériaux

La géométrie du modèle est changée afin de modéliser deux matériaux isotropes. La frontière entre ces deux matériaux est un plan normal à l'axe de la carotte dont la distance par rapport aux jauge est définie par la longueur  $L_h$ . Un rapport  $L_h/D$  de 1 représente un point de rencontre entre les deux matériaux à 54.7 mm du plan de fond de trou. La figure 3.7 illustre la carotte hétérogène à deux matériaux générée par le modèle et la figure 3.8 représente le maillage sur l'ensemble du modèle.

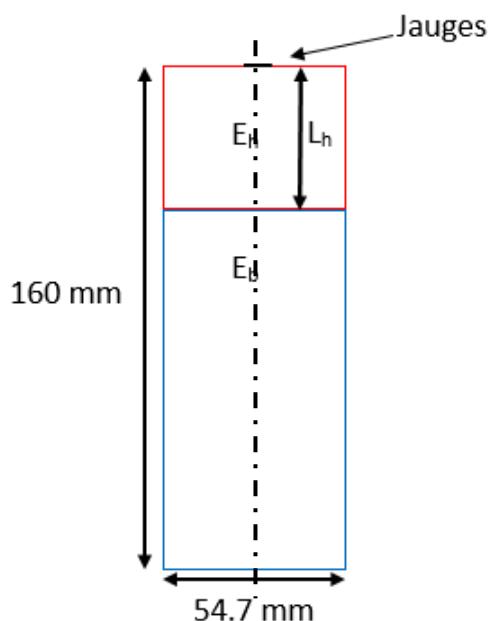


Figure 3.7 : Carotte hétérogène créée par la saignée

Les matériaux sont isotropes et nous définissons :

- le module de Young  $E_h$  du matériau situé en haut de la jonction  $L_h/D$ ;
- le module de Young  $E_b$  du matériau situé en bas de la jonction  $L_h/D$ ;
- le coefficient de Poisson  $\nu$  semblable pour les deux matériaux.

Les modules de cisaillement sont déterminés à partir de l'équation 2.5 et le degré d'hétérogénéité d'une telle carotte est déterminé par le rapport  $E_h/E_b$ .

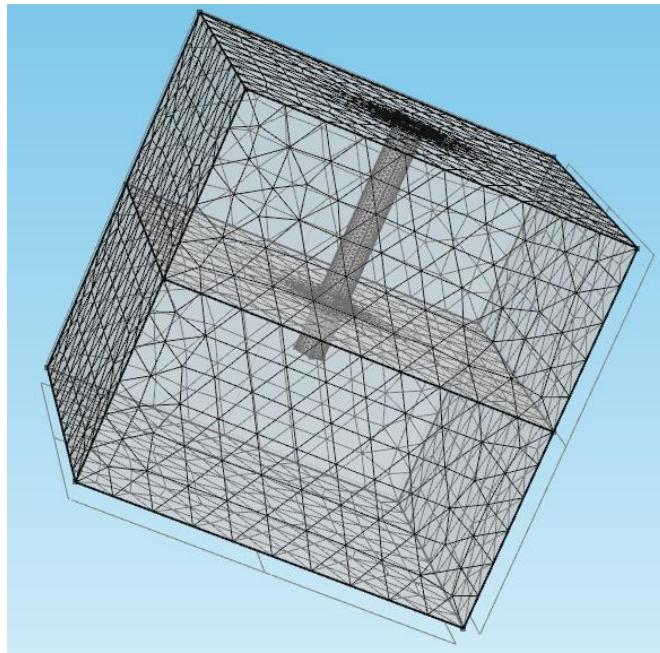


Figure 3.8 : Illustration du maillage pour le modèle composé de deux matériaux de différente déformabilité

### 3.2.1.2 Conditions aux frontières et contraintes appliquées

Les conditions aux frontières sont modifiées pour simuler un chargement sur chaque face du modèle. Des ressorts souples, contraignant les déplacements dans les trois directions, sont mis sur les coins d'une face du modèle afin d'empêcher les translations et rotations de celui-ci sans toutefois modifier la distribution de contrainte souhaitée. Ce modèle est nommé le modèle de chargement normal. Étant donné que les frontières du modèle se déforment avec un chargement en cisaillement, un second modèle est créé afin de positionner les ressorts sur les coins d'un plan

passant par les points 1 et 5 de la figure 3-1, parallèle aux faces XZ et perpendiculaire aux plans XY et YZ. Ce second modèle est nommé modèle de chargement en cisaillement.

Pour simuler les déformations obtenues avec les contraintes  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  et  $S_{zz}$ , les chargements sont effectués en appliquant des pressions perpendiculaires aux faces du modèle de chargement normal. Pour simuler le cisaillement  $S_{xy}$ , les pressions sont appliquées sur les plans XZ dans la direction X du modèle de chargement en cisaillement.

### 3.2.1.3 Validation du modèle

Les modèles de chargement normal et en cisaillement sont validés en comparant les déformations trouvées aux jauge pendant la saignée avec le modèle de Ouellet (2012) pour des modèles homogènes. Pour un chargement où  $S_{xx}$  est égale à  $S_{yy}$ , les déformations sont égales entre le modèle de Ouellet (2012) et le modèle de chargement normal. Cependant, pour un chargement unitaire selon l'axe x, y ou en cisaillement xy, les déformations aux jauge trouvées entre le modèle de Ouellet (2012) et les modèles de chargement et cisaillement présentent un maximum de 5% de différence avec les déformations obtenues du modèle homogène pour la jauge perpendiculaire à la charge appliquée. Cette différence diminue lorsque le modèle est agrandi. Toutefois, en agrandissant le modèle, le temps de calcul augmente de manière exponentielle et l'ordinateur peine à faire les calculs dans des temps raisonnables. L'impact de cette différence de 5% sur une jauge est analysé et l'erreur sur le tenseur trouvé est inférieure à 2%. De manière concrète, si la contrainte appliquée est de 100 MPa dans l'axe X, la contrainte calculée avec la méthode inverse est comprise entre 98 MPa ou 102 MPa. Étant donné le domaine d'application et le fait que les contraintes normales  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  et  $S_{zz}$  sont rarement nulles, cette différence est jugée acceptable.

### 3.2.2 Effet de l'hétérogénéité sur l'essai de compression biaxiale isotrope

La présence de deux matériaux superposés entraîne le développement de gradients de contrainte à la position  $L_h/D$ . Lorsque cette séparation entre les deux matériaux est à proximité des jauge, les contraintes sous celles-ci ne sont plus égales à la pression appliquée (P) utilisée dans les équations 2.8 et 2.9 pour déterminer les modules de Young. La figure 3.9 illustre la contrainte radiale présente sur un axe passant au centre d'une carotte de 160 mm de longueur pendant l'essai biaxiale isotrope avec un degré d'hétérogénéité  $E_h/E_b$  de 0.5, lorsque la séparation entre les deux matériaux est à 80

mm des jauge. Notons que dans cet exemple, l'effet de l'hétérogénéité sous les jauge est négligeable puisque le rapport (contrainte sous les jauge) / (contrainte appliquée) tend vers 1.0.

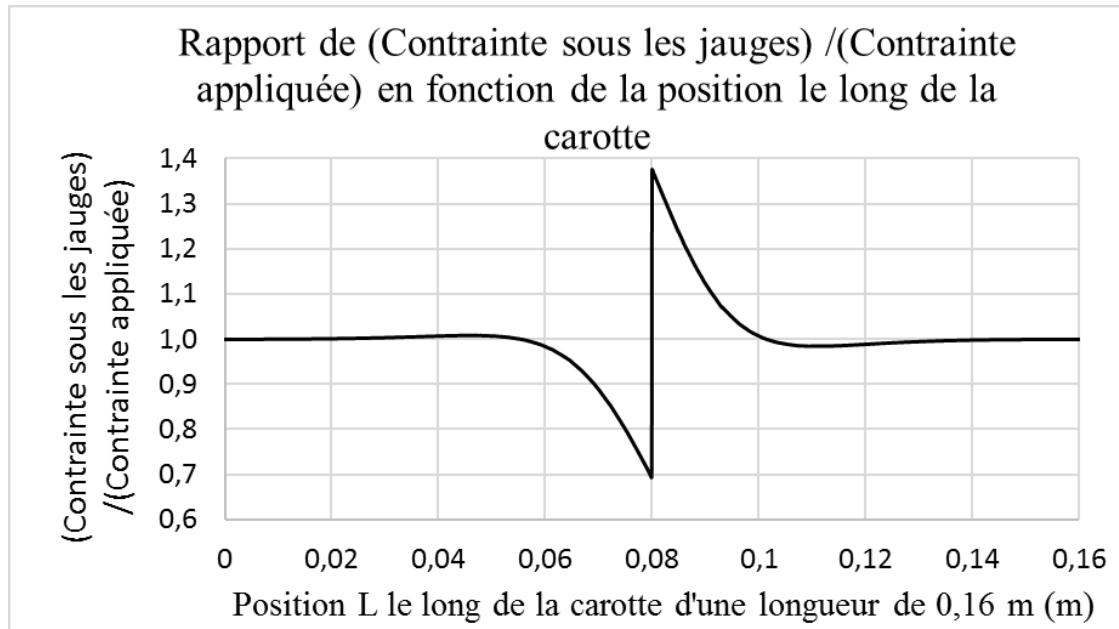


Figure 3.9 : Contrainte radiale le long de l'axe de la carotte hétérogène, pendant l'essai de compression biaxiale isotrope

Il est intéressant de savoir que si le rapport d'hétérogénéité est supérieur à 1, l'allure de la courbe s'inverse. Selon la figure 3.9, la contrainte radiale sous les jauge peut être supérieure ou inférieure à la valeur appliquée. L'impact du rapport  $E_h/E_b$  et de la position de séparation  $L_h/D$  sur la pression ressentie aux jauge est montré à la figure 3.10.

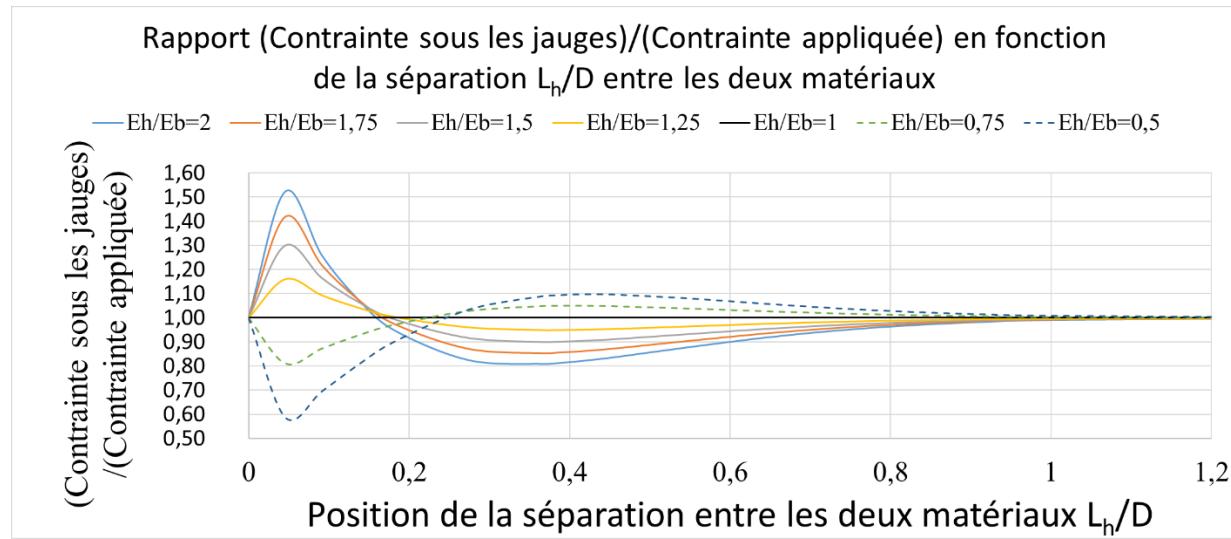


Figure 3.10 : Pression ressentie aux jauge selon la position de séparation  $L_h/D$  et le degré d'hétérogénéité

La différence entre la pression appliquée  $P$  et la contrainte sous les jauge, pendant la compression biaxiale isotrope, fait en sorte que les paramètres de déformabilité calculés sont sous-estimés ou surestimés selon le rapport  $E_h/E_b$ . Pour démontrer ceci, les rapports  $E_h/E_b$  (lorsque  $E_b$  est fixé à 20 GPa) et  $L_h/D$  sont modifiés, en gardant la valeur du coefficient de Poisson à 0.25, et les paramètres de déformations des carottes hétérogènes sont déterminés selon la procédure décrite à la section 2.4.1.3. Les figures 3.11 et 3.12 montrent les paramètres  $E$  et  $v$  déterminés à partir de telles carottes.

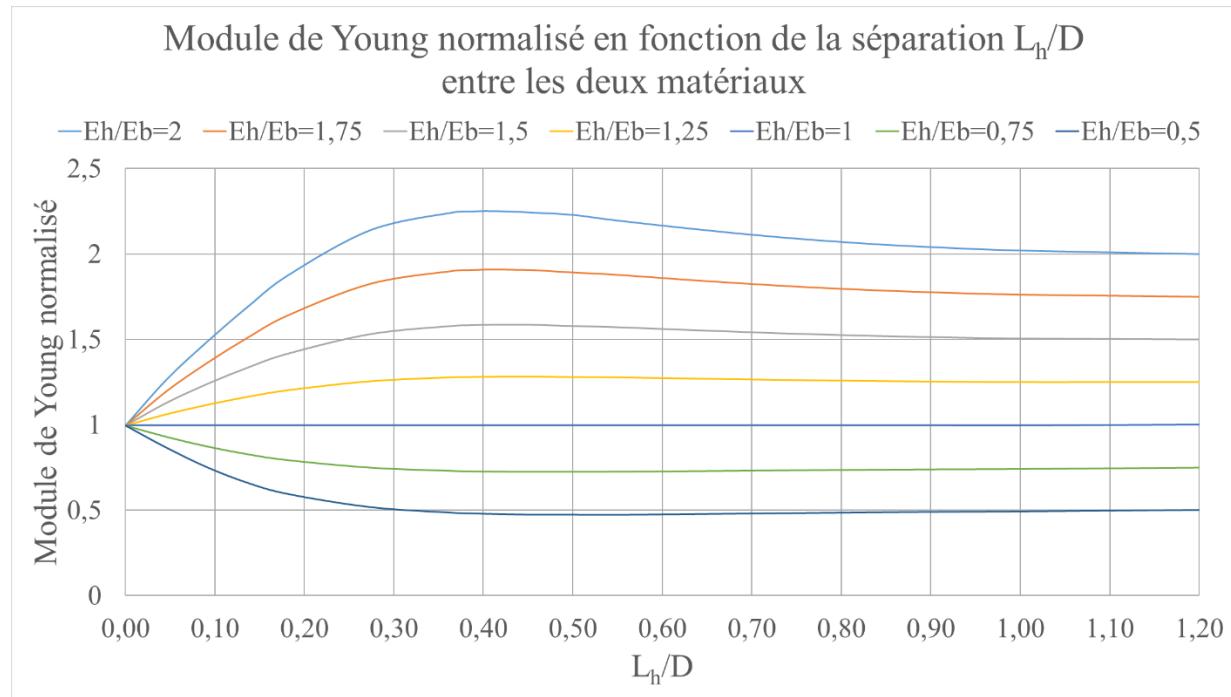


Figure 3.11 : Évolution du module de Young,  $E$ , estimé à partir de carottes caractérisées par leur degré d'hétérogénéité  $E_h/E_b$  et la limite  $L_h/D$

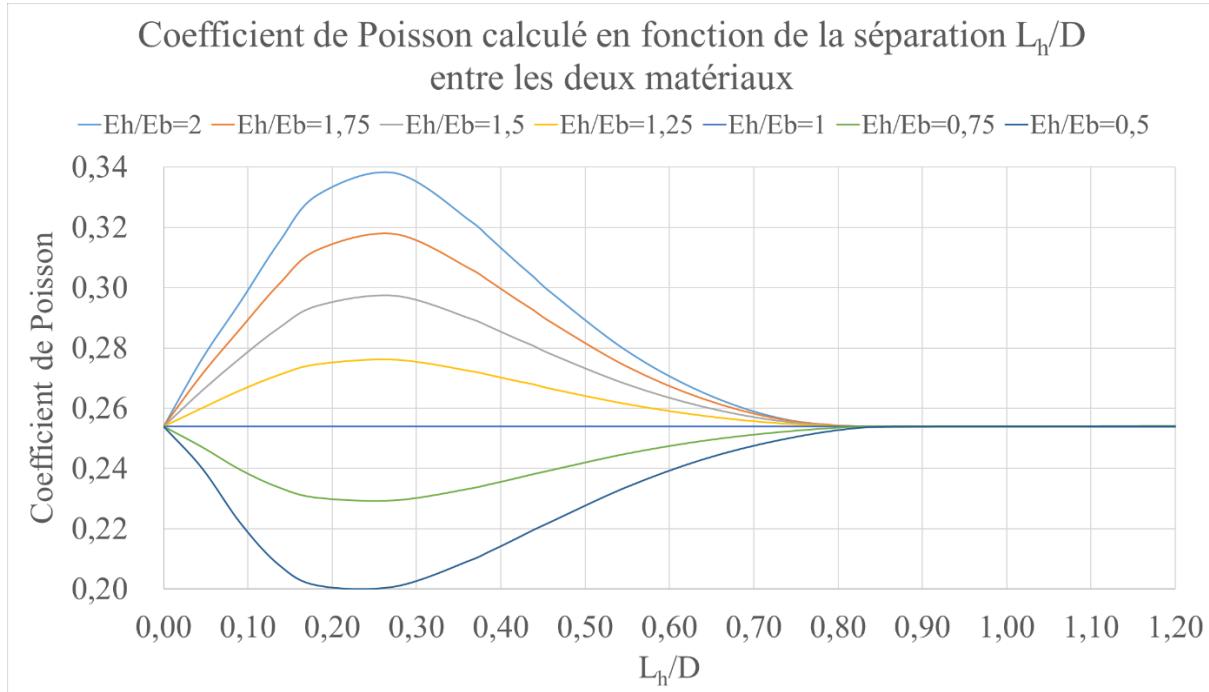


Figure 3.12 : Évolution du coefficient de Poisson,  $v$ , estimé à partir de carottes caractérisées par leur degré d'hétérogénéité  $E_h/E_b$  et la limite  $L_h/D$

Puisque dans ces analyses les matériaux composant les carottes sont isotropes, un seul module de Young est déterminé. En analysant les graphiques, il est possible de constater que si la contrainte présente sous les jauge est supérieure à la contrainte biaxiale appliquée, le module de Young est sous-estimé et vice versa. Le coefficient de Poisson est sous-estimé pour un degré d'hétérogénéité inférieur à 1 et vice versa. Lorsque la valeur de  $L_h/D$  dépasse 1, le module de Young est correctement déterminé alors que pour le coefficient de Poisson, le rapport  $L_h/D$  doit être supérieur à 0.8.

### 3.2.3 Effet de l'hétérogénéité sur les courbes de récupération

L'effet de l'hétérogénéité sur les courbes de récupération est montré en utilisant des déformations récupérées pour trois modèles hétérogènes ayant un rapport  $E_h/E_b$  de 2 pour une valeur de  $E_b$  de 20 GPa mais une valeur de  $L_h/D$  différente. Les paramètres déterminés sur les carottes extraites de ces modèles, lorsqu'elles sont supposées homogènes, permettent de déterminer les courbes de déformations récupérées avec le principe de superposition. Le tableau 3.1 présente les différents paramètres entrés dans les modèles et les paramètres déterminées sur les carottes extraites de ces modèles sont présentés au tableau 3.2.

Tableau 3.1 : Paramètres de déformations des trois modèles hétérogènes

Modèle hétérogène	$E_h/E_b$	$L_h/D$
1	2	0.09
2	2	0.18
3	2	0.54

Tableau 3.2 : Paramètres de déformations déterminés sur les carottes extraites des modèles hétérogènes

Modèle homogène	$E$ (GPa)	$\nu$
1	29.72	0.30
2	37.18	0.33
3	44.01	0.28

Pour un même chargement triaxial selon la nomenclature {Sxx ; Syy ; Szz ; Sxy ; Syz ; Sxz} de {10 ; 20 ; 15 ; 0 ; 0 ; 0} GPa, la figure 3.13 illustre l'influence de la variation de la déformabilité le long de la carotte sur l'amplitude du pic de déformation. Sur cette figure, les déformations normalisées sont le rapport entre les déformations mesurées et les déformations résiduelles en fonction de l'avancement L/D.

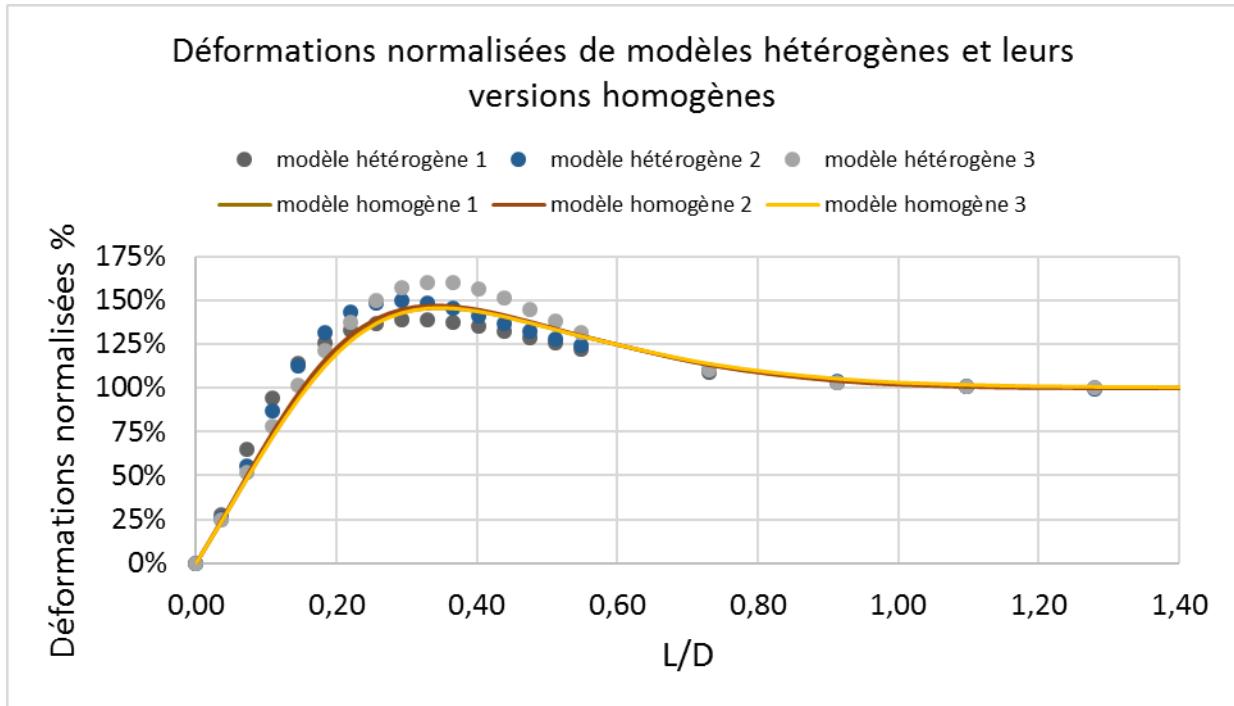


Figure 3.13: Déformations normalisées pour des carottes hétérogènes et homogènes

La valeur du RPR des trois modèles homogènes est de 0.68, cependant elle est de 0.72 pour le modèle hétérogène 1, 0.62 pour le modèle hétérogène 2 et 0.67 pour le modèle hétérogène 3. Cette différence entre les pics de déformations donnera des différences importantes entre le tenseur appliqué et le tenseur estimé avec la méthode inverse.

### 3.2.4 Effet de l'hétérogénéité sur le tenseur calculé

Les étapes suivantes sont utilisées pour mettre en évidence l'effet d'une carotte composée de deux matériaux sur la méthode inverse :

- effectuer la saignée sur le modèle hétérogène avec un tenseur quelconque ;
- appliquer la méthode inverse développée par Vézina (2014) ;

- 1) utiliser la carotte obtenue avec la saignée pour déterminer les paramètres de déformabilité d'une carotte supposée homogène ( $E_1$ ,  $E_2$  et  $\nu$ ) avec les modèles simulant la compression biaxiale isotrope et diamétrale d'une carotte hétérogène à deux matériaux ;
- 2) effectuer les chargements unitaires avec le modèle de Ouellet (2012) pour un matériau homogène ;
- 3) déterminer les équations rationnelles polynomiales de degré 4 pour chaque courbe de déformations ;
- 4) appliquer la méthode des moindres carrés pour déterminer le tenseur de contrainte appliquée.

Le modèle hétérogène utilisé pour vérifier l'impact de l'hétérogénéité sur la méthode inverse a un degré d'hétérogénéité  $E_h/E_b$  de 2 et la position  $L_h/D$  est à 0,20. Les deux matériaux isotropes composant la carotte sont les suivants :

Matériau sous les jauge :  $E_h=40$  GPa,  $\nu=0.25$

Matériau commençant à la séparation  $L_h/D$  :  $E_b=20$  GPa,  $\nu=0.25$

Les paramètres de déformabilité trouvés avec les deux modèles simulant les recharges en laboratoire sont les suivants :

$$E_1 = E_2 = 37.18 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.33$$

Le tableau 3.3 donne les résultats obtenus avec une carotte hétérogène à deux matériaux en appliquant la méthode inverse pour estimer le tenseur appliqué.

Tableau 3.3 : Comparaison entre le tenseur appliqué dans le modèle hétérogène et le tenseur trouvé à partir du modèle homogène utilisé avec la méthode inverse

Contrainte	Tenseur appliqué (MPa)	Tenseur estimé (MPa)
$S_{xx}$	10,00	16,81
$S_{yy}$	20,00	31,02
$S_{zz}$	30,00	46,80
$S_{xy}$	0,00	0,00

En analysant les résultats pour ce cas particulier, les contraintes trouvées sont surévaluées de près de 50%. Selon l'équation 2.19, la contrainte dans l'axe du forage est liée aux contraintes  $S_{xx}$  et  $S_{yy}$  ce qui peut expliquer pourquoi les trois contraintes ont été surestimées.

Afin de comprendre pourquoi le tenseur est mal estimé, les quatre chargements unitaires (en X, Y, Z et XY) sont appliqués sur le modèle hétérogène et les courbes de déformations obtenues sont interprétées avec les paramètres de la roche supposée homogène. Les tenseurs trouvés avec les différents chargements unitaires sont montrés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Tenseurs trouvés pour chaque chargement unitaire appliqué à une carotte hétérogène composée de deux matériaux ayant des modules de Young différents

	Contraintes trouvées			
	{1;0;0;0}	{0;1;0;0}	{0;0;1;0}	{0;0;0;1}
$S_{XX}$ (MPa)	1,60	0,17	-0,09	0,00
$S_{YY}$ (MPa)	0,17	1,60	-0,09	0,00
$S_{ZZ}$ (MPa)	0,30	0,30	1,26	0,00
$S_{XY}$ (MPa)	0,00	0,00	0,00	1,36

Les tenseurs trouvés pour chaque chargement unitaire surestiment la valeur de 1 MPa appliquée. Ceci est dû à l'erreur sur les paramètres de déformabilité combiné à l'effet de l'hétérogénéité sur les courbes récupérées présenté dans les deux sections précédentes. Les différentes contraintes surlignées en jaune, dans le tableau 3.4, seront appelées les facteurs de correction de l'hétérogénéité à la section 3.2.5.2.

L'influence du rapport  $v_h/v_b$  est évaluée de la même façon que le module de Young et celui-ci n'a pas un effet important sur la méthode inverse. Un cas est présenté ci-dessous afin de montrer d'où vient cette affirmation. Pour montrer ceci, un rapport  $v_h/v_b$  de 2 est inséré dans le modèle et la position  $L_h/D$  est fixée 0.2. Les deux matériaux isotropes composant la carotte sont les suivants :

Matériau sous les jauge :  $E=20 \text{ GPa}, v_h=0.10$

Matériau commençant à la séparation  $L_h/D /D$  :  $E=20 \text{ GPa}, v_b=0.20$

Les paramètres de déformabilité trouvés avec les deux modèles simulant les recharges en laboratoire sont les suivants, en supposant le matériau homogène :

$$E_1 = E_2 = 19,42 \text{ MPa}$$

$$v = 0.107$$

En utilisant comme courbes de déformations récupérées, les déformations du modèle hétérogène pour chacun des chargements unitaires et en appliquant la méthode inverse, les différents tenseurs partiels au tableau 3.5 ont été trouvés.

Tableau 3.5 : Tenseurs trouvés pour chaque chargement unitaire appliqué à une carotte composée de deux matériaux superposés ayant deux coefficients de Poisson différents

Contraintes trouvées				
	$\{1;0;0;0\}$	$\{0;1;0;0\}$	$\{0;0;1;0\}$	$\{0;0;0;1\}$
SXX (MPa)	0,98	-0,06	-0,03	0,00
SYY (MPa)	-0,06	0,98	-0,03	0,00
SZZ (MPa)	-0,01	-0,01	1,02	0,00
SXY (MPa)	(0,00)	0,00	0,00	1,02

L'erreur sur les contraintes trouvées, lorsque l'hétérogénéité est liée au coefficient de Poisson, correspond à l'erreur sur le modèle de chargement et de cisaillement de 2% présenté dans la validation du modèle. Les effets liés à l'hétérogénéité du coefficients de Poisson ne seront donc pas approfondie davantage.

### 3.2.5 Correction du tenseur suite à la caractérisation de l'hétérogénéité

#### 3.2.5.1 Caractérisation de l'hétérogénéité

Étant donné qu'il n'existe pas de méthode permettant de connaître la contrainte réelle sous les jauge pour de vraies mesures, les paramètres de déformabilité ne peuvent pas être corrigés pendant le processus itératif qui permet de les calculer. Cependant, il est possible de savoir si la carotte est hétérogène. En appliquant la contrainte biaxiale lors de la recharge de la carotte récupérée sur différentes longueurs  $L_c$ , tel que montré sur la figure 3.14, il est possible de déterminer un rapport de déformations ou déformabilité ( $Rd$ ) avec l'équation 3.7 à partir du rapport des déformations maximales en tension,  $\varepsilon_{pic}$ , et en compression,  $\varepsilon_{max}$ .

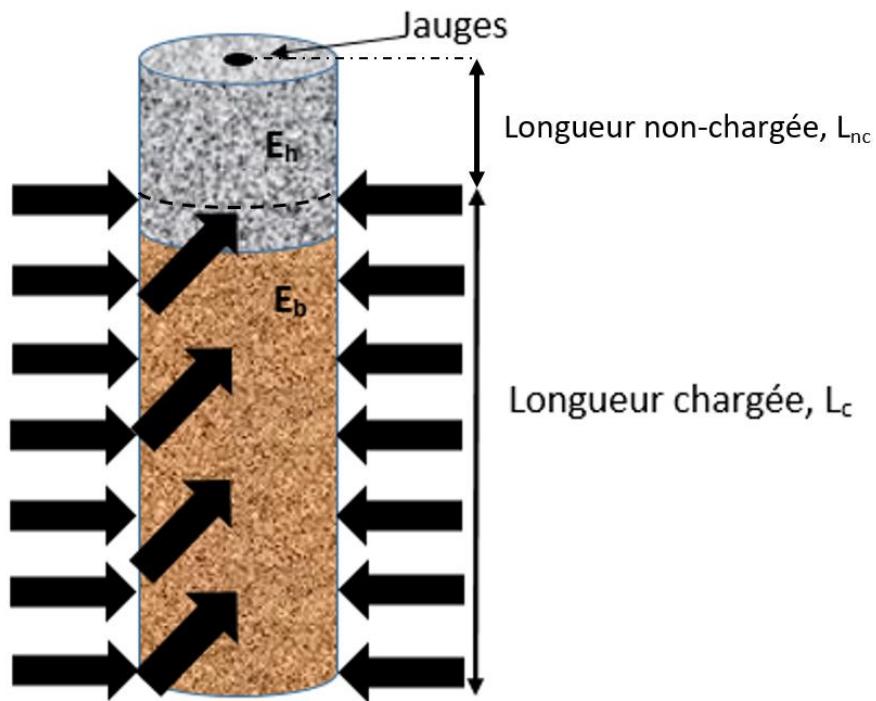


Figure 3.14: Compression biaxiale pour déterminer le rapport  $Rd$

$$Rd = \left| \frac{\varepsilon_{pic}}{\varepsilon_{max}} \right| \quad (3.7)$$

Selon les simulations numériques faites en axisymétrie sur RS2 (Rocscience) et en 3D sur Comsol, le rapport  $Rd$  est de 0.20 lorsque la carotte est homogène. Afin de vérifier ceci, un essai en laboratoire sur une carotte d'aluminium a donné les déformations présentées à la figure 3.15 et le rapport  $\varepsilon_{pic}/\varepsilon_{max}$  obtenu est de 0.19 ce qui est très près de 0.20 si l'on prend en considération les

erreurs de mesure expérimentales qui peuvent être assez grandes, étant donné que les déformations étaient relativement faibles. La déformation au pic est généralement trouvée lorsque la longueur non-chargée  $L_{nc}$  sur l'éprouvette est de 20 mm pour un diamètre de 54.7 mm. Lorsque le matériau sous les jauges est plus déformable (module de Young faible) que celui situé sur l'autre partie de la carotte ( $E_h < E_b$ ), le rapport  $R_d$  est inférieur à 0.20 et vice versa.

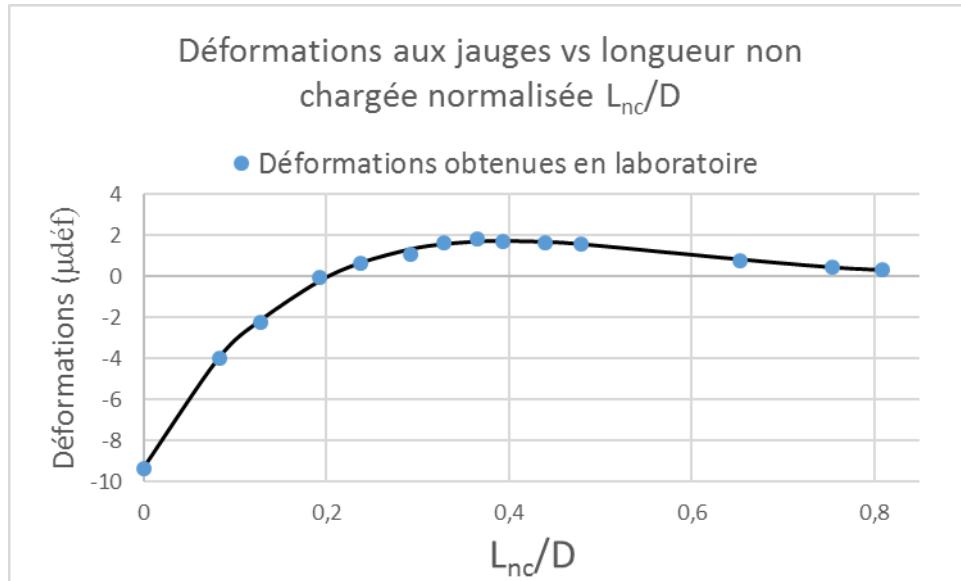


Figure 3.15 : Compression biaxiale avec chargement partiel sur une carotte d'aluminium

Pour des situations où la carotte récupérée est composée de deux matériaux, un même rapport de déformabilité peut être trouvé à deux positions de séparation  $L_h/D$ . Il est aussi possible de retrouver ce rapport sur d'autres carottes qui ont des degrés d'hétérogénéité différents. Les différents cas étudiés sont donc classés selon le degré d'hétérogénéité  $E_h/E_b$  et la position de séparation  $L_h/D$  entre les deux matériaux. La figure 3.16 illustre ceci.

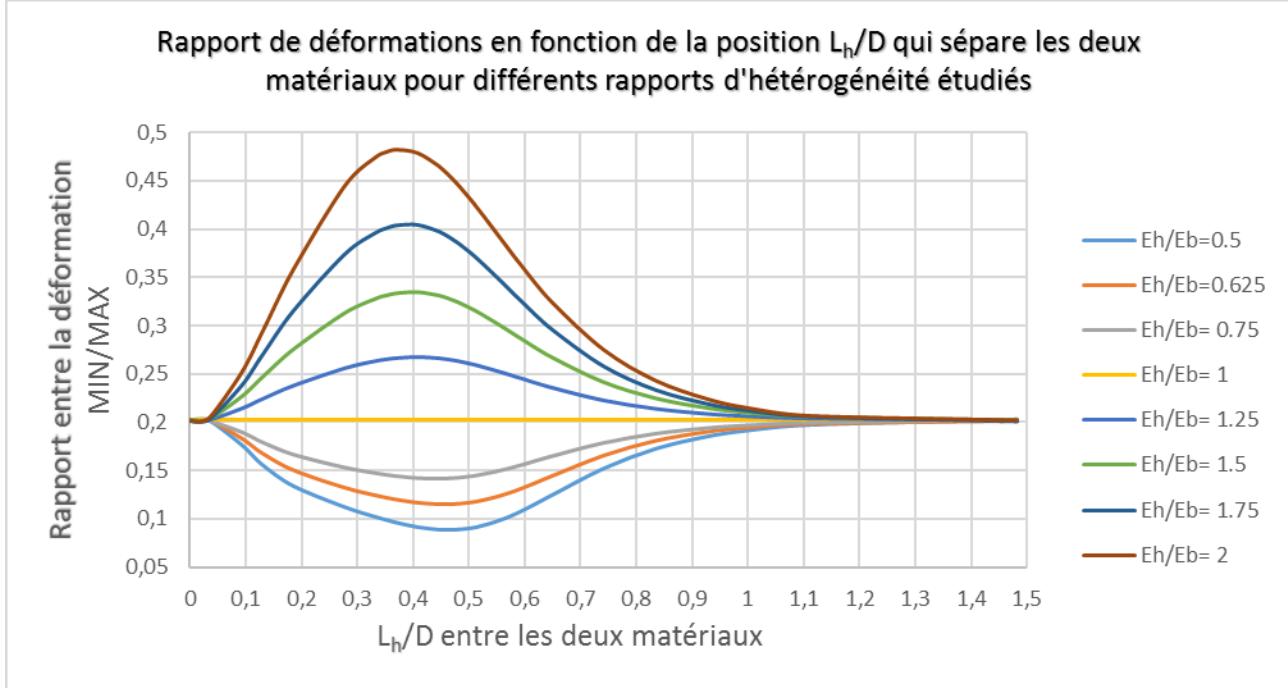


Figure 3.16 : Rapport de déformations en fonction du degré d'hétérogénéité et de la position  $L_h/D$  entre les deux matériaux

### 3.2.5.2 Facteur de correction lié à l'hétérogénéité et leur application

Afin de pouvoir corriger l'erreur d'estimation des paramètres de déformabilité et l'amplitude du pic de déformation sur les courbes de déformations récupérées, des facteurs de correction moyens à appliquer aux composantes du tenseur calculé sont déterminés. L'équation 3.8 illustre comment appliquer ces facteurs de correction moyens pour l'hétérogénéité  $f_{Sij}$  à une contrainte partielle  $S_{ij}$  estimée.

$$S_{ij,corrigé} = \frac{S_{ij,estimée}}{f_{Sij}} \quad (3.8)$$

Des équations permettent de calculer la valeur de ces facteurs en fonction du rapport  $R_d$  déterminé sur la carotte. Pour créer ces équations, les longueurs  $L_h/D$  pour les rapports de déformation ( $R_d$ ) de 0,1, 0,15, 1,25, 1,5, 1,75 et 2 ont été prises en note pour chaque degré d'hétérogénéité ( $E_h/E_b$ ) sur la figure 3.16 et ceux-ci sont montrés dans l'annexe B. La méthode inverse est utilisée pour déterminer les facteurs de correction. Pour chaque cas, ou carotte modélisée, quatre facteurs de correction  $f_{Sij}$  sont déterminés, soit un pour chaque chargement unitaire.

À titre d'exemple, pour déterminer le facteur de correction sur la contrainte  $S_{xx}$ , le chargement unitaire  $\{1;0;0;0;0;0\}$  de la carotte hétérogène permet d'obtenir les déformations synthétiques de terrain. La méthode inverse est appliquée selon la méthodologie à la section 3.1 qui suppose le matériau homogène. La valeur de la contrainte  $S_{xx}$  trouvée avec ces courbes de déformations est le facteur de correction  $f_{Sxx}$ . Les mêmes étapes sont répétées pour les contraintes  $S_{zz}$  et  $S_{xy}$ . Le tableau 3.6 montre ces différents facteurs selon le chargement unitaire effectué pour le cas hétérogène avec un degré d'hétérogénéité de 2 décrit précédemment.

Tableau 3.6 : Illustration de la provenance des facteurs de correction

Tenseur appliqué (MPa)				
Tenseur trouvé (MPa)	$\{1;0;0;0;0;0\}$ $f_{Sxx}$	$\{0;1;0;0;0;0\}$ $f_{Syy}$	$\{0;0;1;0;0;0\}$ $f_{Szz}$	$\{0;0;0;1;0;0\}$ $f_{Sxy}$
$S_{xx}$	1.60	-	-	-
$S_{yy}$	-	1.60	-	-
$S_{zz}$	-	-	1.26	-
$S_{xy}$	-	-	-	1.36

Il suffit de tracer une ligne horizontale à un  $R_d$  de 0.3 sur la figure 3.16 pour remarquer que 6 configurations permettent d'obtenir ce rapport. Ceci implique que pour ce  $R_d$ , il existe 6 facteurs de correction par composante. Une moyenne des facteurs de correction est alors faite par  $R_d$  et par composante étant donné que  $E_h/E_b$  et  $L_h/D$  sont inconnus et ceci donne les facteurs de correction moyens. L'utilisation d'un facteur de correction moyen de chaque contrainte  $S_{ij}$  est proposée, car présentement il n'y pas de manière plus optimale de déterminer la présence de l'hétérogénéité. Les équations 3.9 à 3.11 permettent de déterminer le facteur de correction moyen selon le rapport de déformabilité tel qu'illustré aux figures 3.17 à 3.19. Étant donné que les carottes homogènes donnent un  $R_d$  de 0.2, les facteurs de correction de l'hétérogénéité associés à ce rapport tendent vers 1.

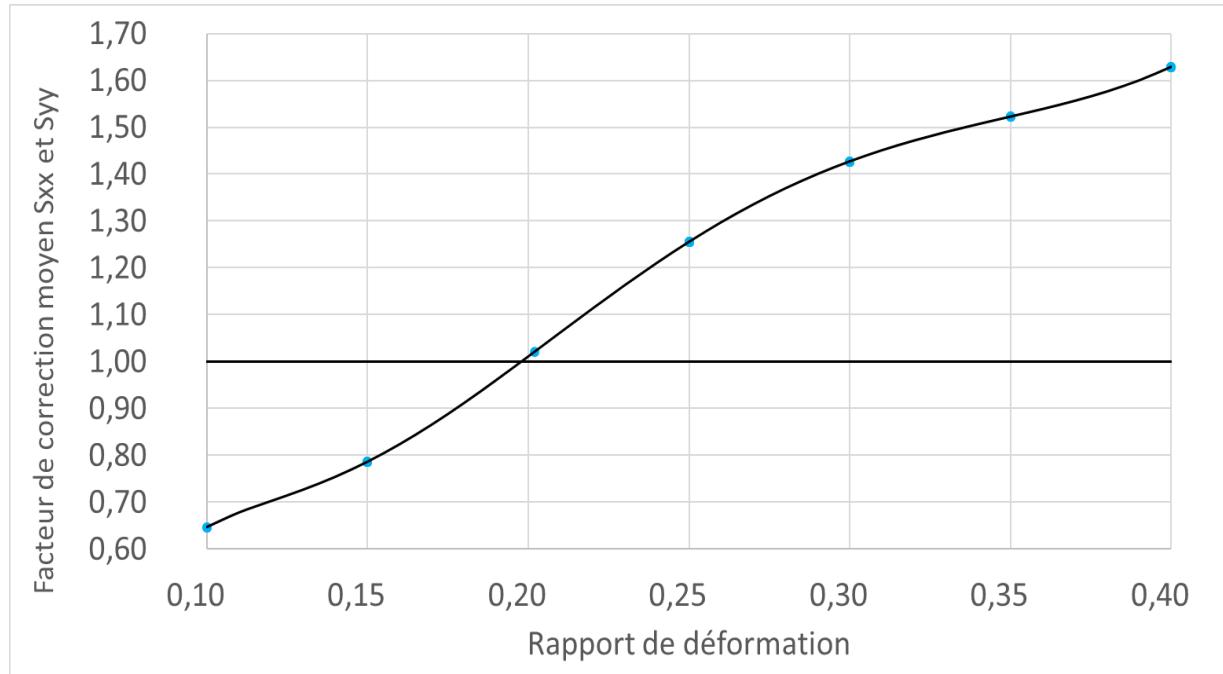


Figure 3.17 : Facteur de correction moyen  $\hat{f}_{Sxx}$  pour les contraintes Sxx et Syy

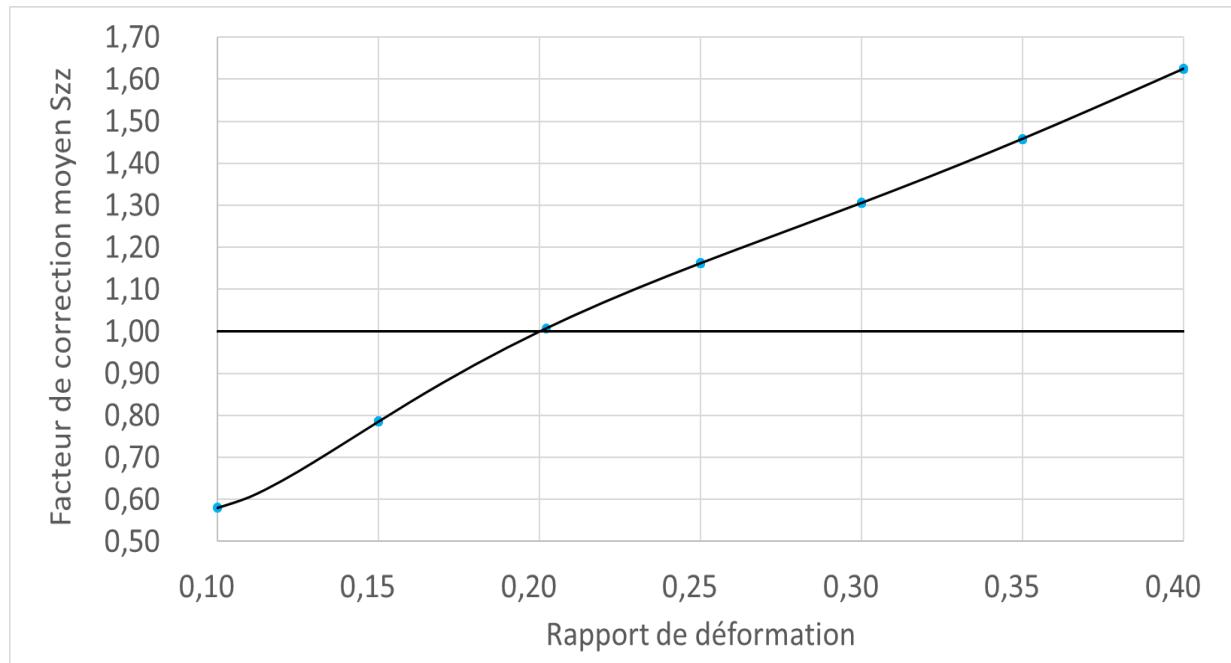


Figure 3.18 : Facteur de correction moyen  $\hat{f}_{Szz}$  pour la contrainte Szz

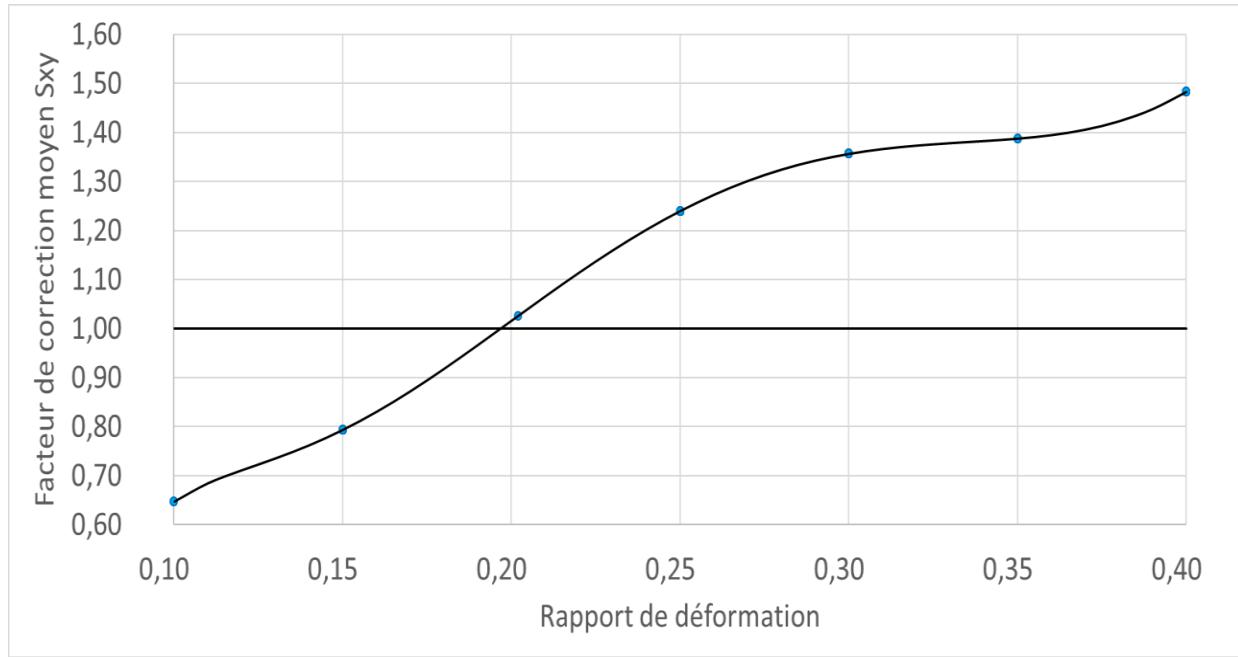


Figure 3.19 : Facteur de correction moyen  $\hat{f}_{Sxy}$  pour la contrainte Sxy

(3.9)

$$\hat{f}_{Sxx} = \hat{f}_{Syy} = -46,24 + 547,1Rd^{0,5} - 2513,5Rd + 5656,8Rd^{1,5} - 6207,6Rd^2 + 2662,3Rd^{2,5}$$

(3.10)

$$\hat{f}_{Szz} = +25,61 - 272,0Rd^{0,5} + 1138,6Rd - 2308,0Rd^{1,5} + 2293,2Rd^2 - 893,6Rd^{2,5}$$

(3.11)

$$\hat{f}_{Sxy} = -65,49 + 772,8Rd^{0,5} - 3560,1Rd + 8054,6Rd^{1,5} - 8916,4Rd^2 + 3866,1Rd^{2,5}$$

### 3.2.5.3 Application des facteurs de correction

Bien que les carottes virtuelles utilisées pour déterminer les facteurs de correction soient composées de deux matériaux isotropes, ces facteurs peuvent aussi être appliqués sur des carottes anisotropes et hétérogènes. Deux modèles spécifiques de matériaux anisotropes et hétérogènes sont donc étudiés ainsi qu'un modèle hétérogène ayant un module de Young passant graduellement de 20 GPa à 40 GPa sur une longueur de L/D de 1.1 tel que montré à la figure 3.20. Ce cas pourrait

mieux représenter le phénomène d'hétérogénéité graduelle qui se produit en réalité à cause des phénomènes chimiques et physiques liés aux modes de formation et transformation des roches. (Corthésy & Leite, 2016)

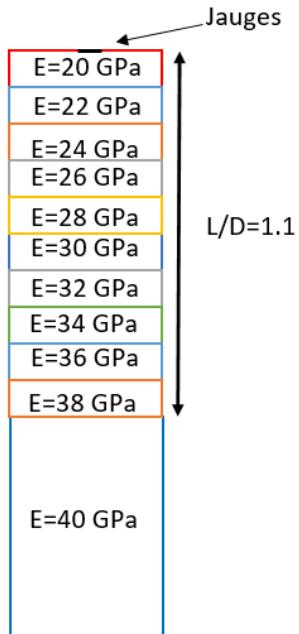


Figure 3.20 : Illustration de la carotte hétérogène graduelle créée dans Comsol

Le premier modèle anisotrope modélisé présente les paramètres suivants :

$$- E_1/E_2 = 2 \quad - E_h/E_b = 2 \quad - \nu = 0.25 \quad - L_h/D = 0.2$$

Le rapport de déformations trouvé sur la carotte est de 0,36 en appliquant la compression biaxiale isotrope sur différentes longueurs de carotte. Une interpolation est utilisée pour déterminer les facteurs de correction avec les équations 3.9 à 3.11.

Les paramètres de déformabilité obtenus sur la carotte sont les suivants :

$$-E_1=44.79 \text{ GPa} \quad -E_2=22.98 \text{ GPa} \quad -\nu=0.34$$

Le tableau 3.7 illustre les contraintes trouvées et corrigées avec le facteur de correction selon chaque composante.

Tableau 3.7 : Comparaison des contraintes non corrigées et corrigées modèles anisotropes  $L_h/D = 0.2$

	Contraintes appliquées (MPa)	Contraintes trouvées (MPa)	Contraintes corrigées (MPa)	Facteur de correction
S <sub>xx</sub>	1,00	1,75	1,13	1,54
S <sub>yy</sub>	1,00	1,92	1,24	1,54
S <sub>zz</sub>	1,00	1,82	1,21	1,50
S <sub>xy</sub>	1,00	1,58	1,13	1,40

Le deuxième modèle anisotrope analysé a comme paramètres les valeurs suivantes :

$$- E_1/E_2 = 2 \quad - E_h/E_b = 2 \quad - \nu = 0.25 \quad - L_h/D = 0.5$$

Cette position  $L_h/D$  est une position critique car il s'agit de la position où le pic de déformation survient en général. Il s'agit aussi de la zone où la valeur du module de Young est surestimée en se fiant à la figure 3.10. Le rapport de déformations trouvé pour la carotte est de 0,45. Ce rapport n'est pas étudié précédemment, une extrapolation linéaire des facteurs de correction est donc utilisée.

Les paramètres de déformations trouvés sur la carotte sont les suivants :

$$-E_1=44.6 \text{ GPa} \quad -E_2=23.4 \text{ GPa} \quad -\nu=0.30$$

Le tableau 3.8 illustre les contraintes trouvées et corrigées avec le facteur de correction appliqué pour chaque composante.

Tableau 3.8 : Comparaison des contraintes non corrigées et corrigées modèles anisotropes  $L_h/D = 0.5$

	Contraintes appliquées (MPa)	Contraintes trouvées (MPa)	Contraintes corrigées (MPa)	Facteur de correction
S <sub>xx</sub>	1,00	1,69	0,88	1,91
S <sub>yy</sub>	1,00	1,80	0,94	1,91
S <sub>zz</sub>	1,00	1,90	1,07	1,79
S <sub>xy</sub>	1,00	1,58	0,84	1,90

En ce qui concerne le modèle hétérogène graduel, le rapport  $R_d$  calculé sur la carotte est de 0,13. Les paramètres de déformations trouvés sur la carotte sont les suivants :

$$-E_1 = 20.43 \text{ GPa} \quad -v = 0.23$$

Les résultats sont présentés dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Comparaison des contraintes non corrigées et corrigées, modèle hétérogène graduel

	Contraintes appliquées (MPa)	Contraintes trouvées (MPa)	Contraintes corrigées (MPa)	Facteur de correction
$S_{xx}$	1,00	0,70	0,96	0,73
$S_{yy}$	1,00	0,70	0,96	0,73
$S_{zz}$	1,00	0,67	0,98	0,69
$S_{xy}$	1,00	0,68	0,93	0,74

Il est possible de constater que les corrections pour les cas hétérogènes et anisotropes ne sont pas totalement appropriées car les facteurs de correction pour les contraintes en X et en Y sont les mêmes. La correction permet toutefois d'améliorer les contraintes déterminées. Pour le cas hétérogène anisotrope avec un  $L_h/D$  de 0,2, l'erreur moyenne passe de 77% à 18%. Ceci représente une diminution de 425% de l'erreur sur les contraintes calculées. Pour le second cas hétérogène anisotrope, l'erreur moyenne passe de 74% à 10%, une diminution de 740%. Pour ce qui est de la correction apportée aux contraintes trouvées avec le modèle hétérogène graduel, l'erreur moyenne passe de 31% à 4%, soit une amélioration de 775%. La correction pour un matériau hétérogène isotrope graduel ne demande pas d'amélioration. La correction pour les matériaux anisotropes et hétérogènes demande une amélioration pour prendre en compte le degré d'anisotropie.

La figure 3.21 permet de constater visuellement la correction apportée aux contraintes déterminées par rapport de déformabilité ainsi que la correction faite sur les trois modèles hétérogènes complexes expliqués précédemment. Les contraintes en couleur froide sont les contraintes non corrigées et les contraintes de couleurs chaudes sont les contraintes corrigées. Ces dernières sont toujours plus près de la contrainte appliquée de 1,00 MPa.

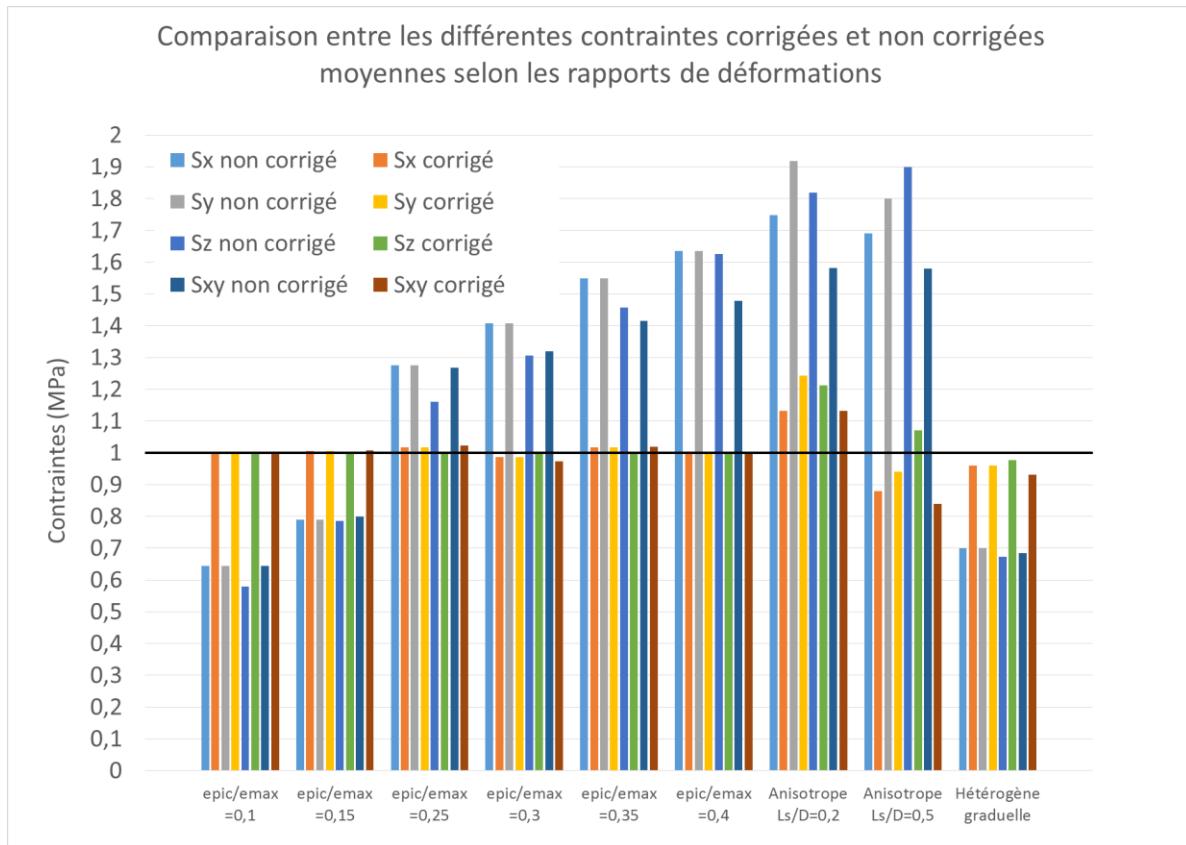


Figure 3.21: Comparaison entre les différentes contraintes corrigées et non corrigées moyennes selon les rapport de déformations

L'annexe C présente cas par cas les contraintes corrigées et non corrigées pour chacun des 30 modèles étudiés pour déterminer les facteurs de correction.

### 3.2.6 Combinaison des corrections de l'avancement et de l'hétérogénéité

La section précédente a permis de constater l'efficacité des facteurs de correction pour les effets de l'hétérogénéité. La présente section a pour but d'ajouter la correction de l'avancement L/D dans la détermination des contraintes in situ pour un modèle hétérogène. La correction de l'avancement permettra aux courbes synthétiques de mieux se juxtaposer aux courbes de déformations récupérées. Il est clair qu'un meilleur ajustement aux déformations récupérées ne correspond pas nécessairement à une meilleure estimation du tenseur de contraintes, puisqu'il existe une différence entre le modèle numérique hétérogène qui génère les déformations récupérées simulant les déformations de terrain et le modèle numérique homogène utilisé pour obtenir les courbes de récupération unitaires. L'objectif est de vérifier quelles erreurs peuvent se produire dans ce cas.

Pour ce faire, les trois modèles de différentes configurations de matériau analysés dans la section précédente sont utilisés. Il s'agit des modèles anisotropes  $L_h/D = 0.2$ , anisotropes  $L_h/D = 0.5$  et hétérogène graduel. La correction de l'avancement est faite de façon linéaire ou polynomiale telle que montré aux équations 3.4 à 3.6.

La comparaison entre les corrections de l'avancement  $L/D$  ainsi que les facteurs de correction pour l'hétérogénéité et leur combinaison pour déterminer le tenseur appliqué ont été étudiés. Pour combiner les corrections, il faut effectuer la correction sur l'avancement et par la suite les facteurs de correction moyens de l'hétérogénéité sont appliqués aux diverses contraintes estimées pour calculer le tenseur corrigé.

Pour chaque modèle hétérogène, un chargement selon la notation de Voight, de {10 ;20 ;15 ;5 ;0 ;0} est appliqué pour obtenir les courbes de déformations de terrain. Les différentes méthodes de calcul incluant la méthode inverse conventionnelle, la méthode inverse avec correction de l'avancement linéaire ou polynomiale sont appliquées pour trouver le tenseur. L'application des facteurs de correction de l'hétérogénéité à ces tenseurs est appelée combinaison des corrections. Les courbes de déformations synthétiques juxtaposées aux courbes estimées avec la méthode inverse conventionnelle, avec correction linéaire de l'avancement et avec la correction polynomiale, sont montrées. Lorsqu'une correction de l'avancement est effectuée, un graphique permettant de voir cette correction est présenté avec une courbe ou  $L/D$  corrigé =  $L/D$  modélisé. Après chacun des cas, une figure permettant de comparer les composantes appliquées avec les composantes trouvées selon le type de méthode ou la combinaison des corrections est montrée.

Une fois que les trois modèles sont présentés, le résidu normalisé ( $\Sigma e^2/N$ ) est illustré à la figure 3.40 pour les méthodes inverses conventionnelle, avec correction linéaire de l'avancement et avec la correction polynomiale. Ensuite, la différence relative calculée avec l'équation 3.12 entre les tenseurs appliqués et les diverses combinaisons de correction est donnée pour les 6 méthodes d'interprétation à la figure 3.41.

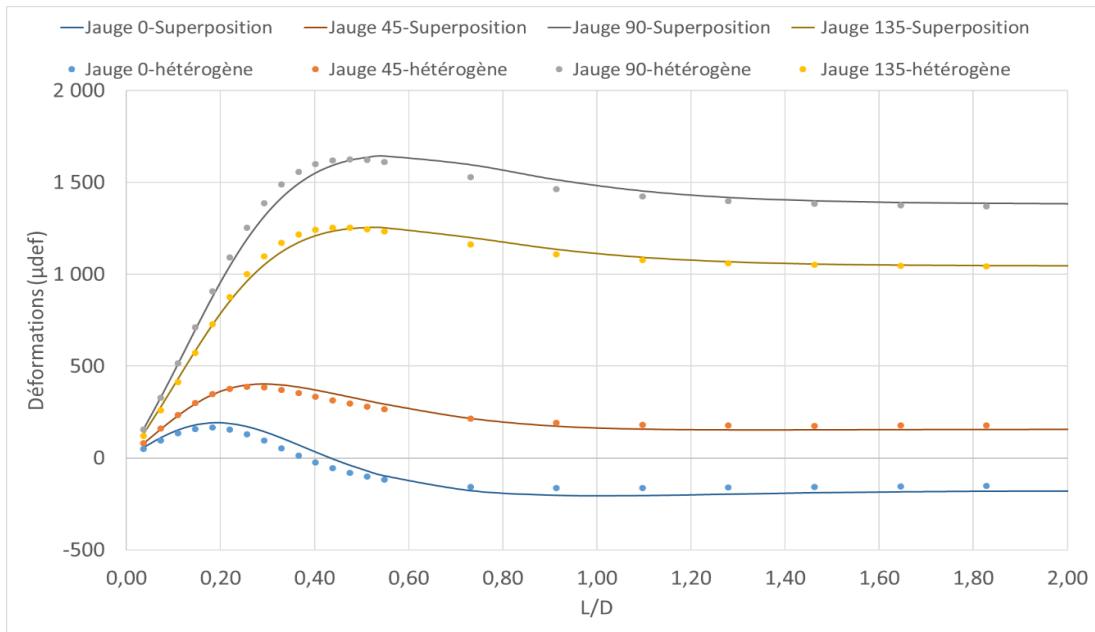


Figure 3.22 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.2$  – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

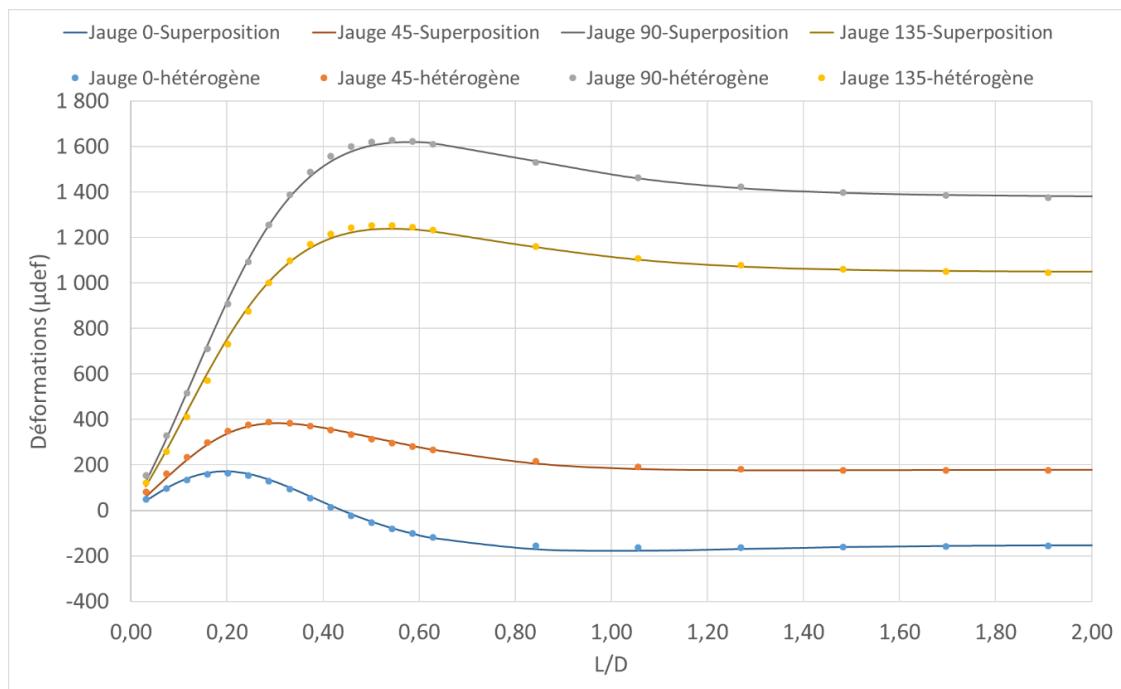


Figure 3.23 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.2$  – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction linéaire

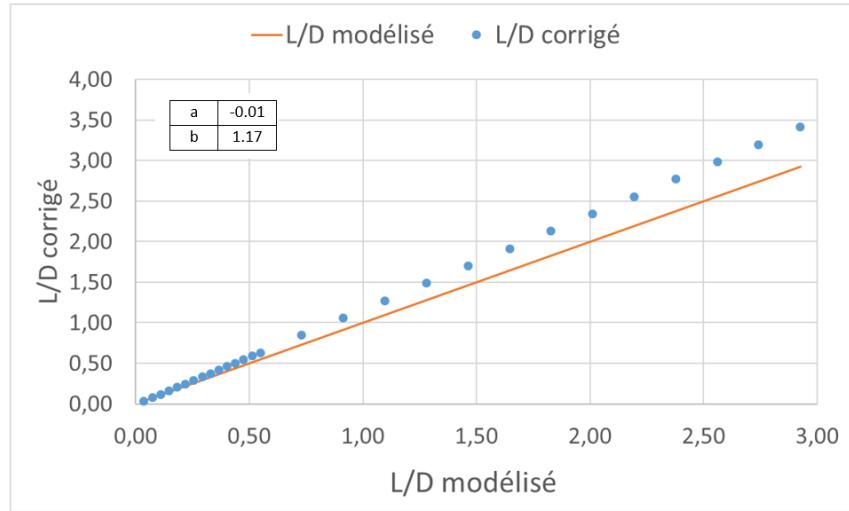


Figure 3.24 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.2$ – Correction linéaire apportée sur la mesure de l'avancement  $L/D$

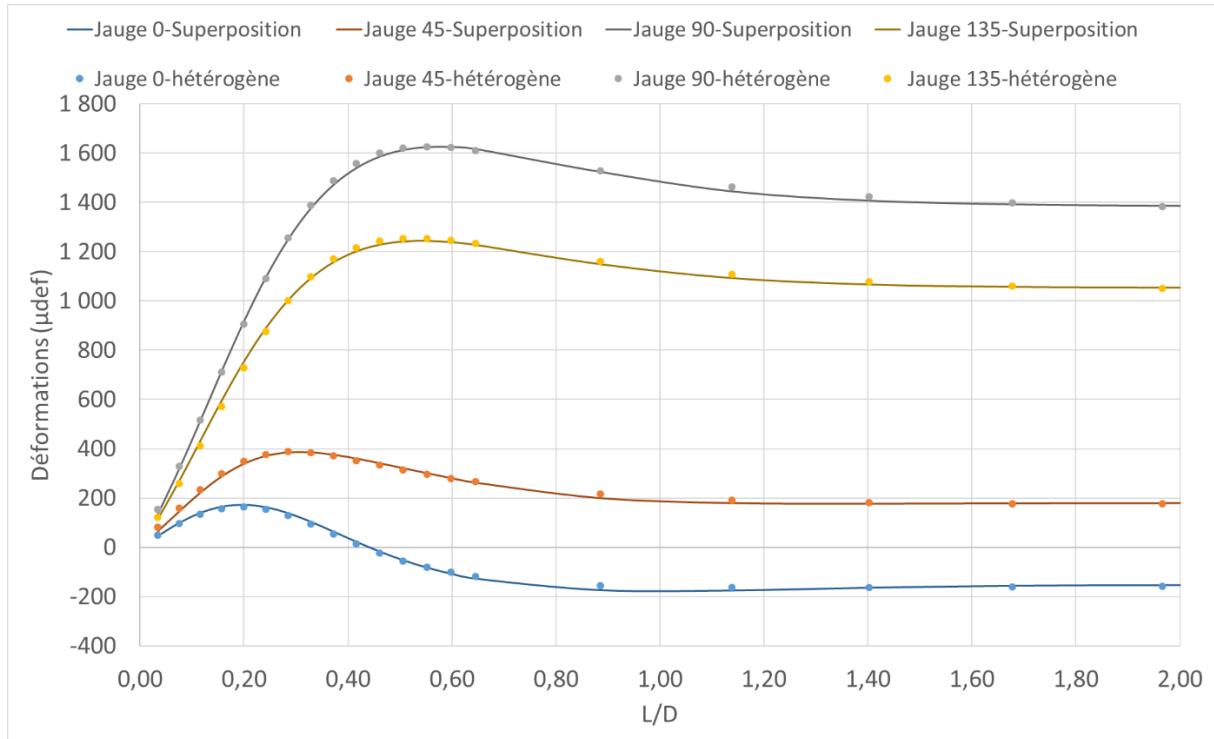


Figure 3.25 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.2$ – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction polynomiale

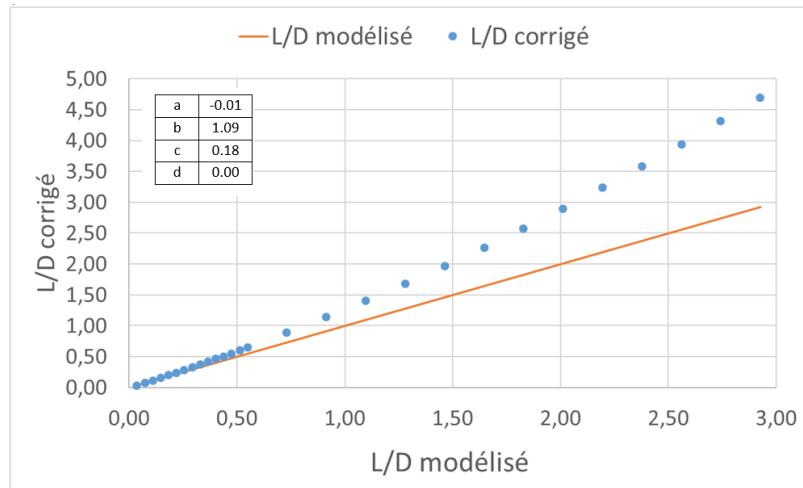


Figure 3.26 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.2$ – Correction polynomiale apportée sur la mesure de l'avancement L/D

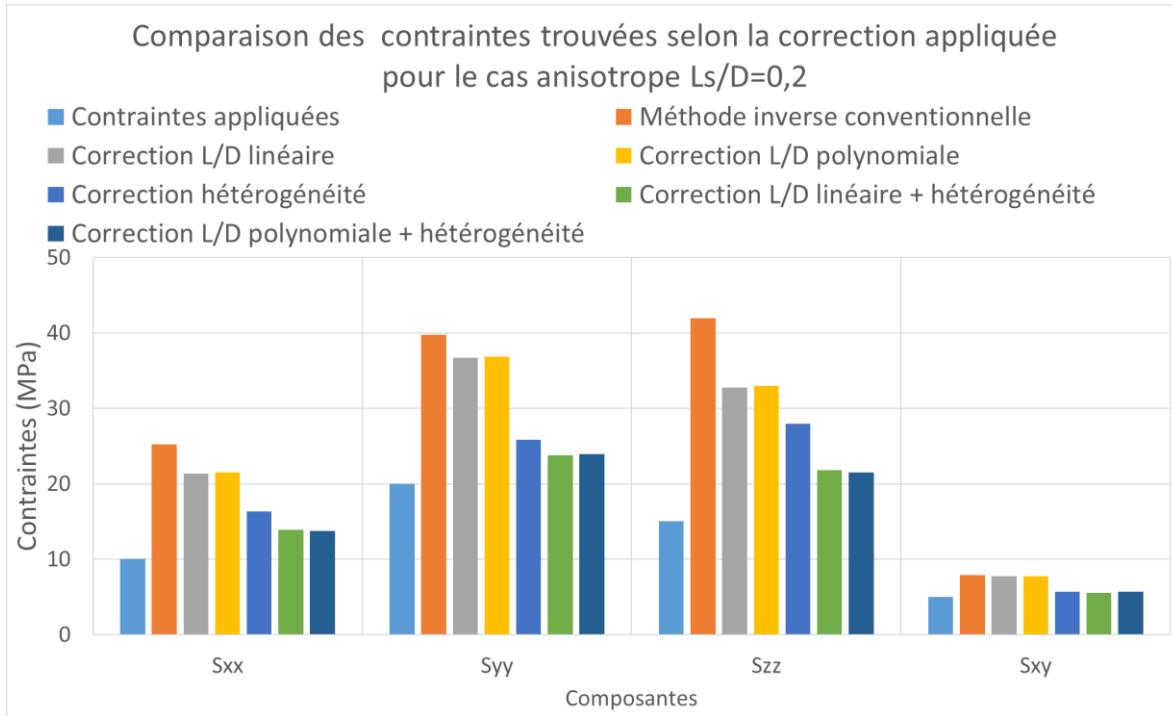


Figure 3.27 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.5$ – Comparaison des contraintes trouvées selon le type de correction

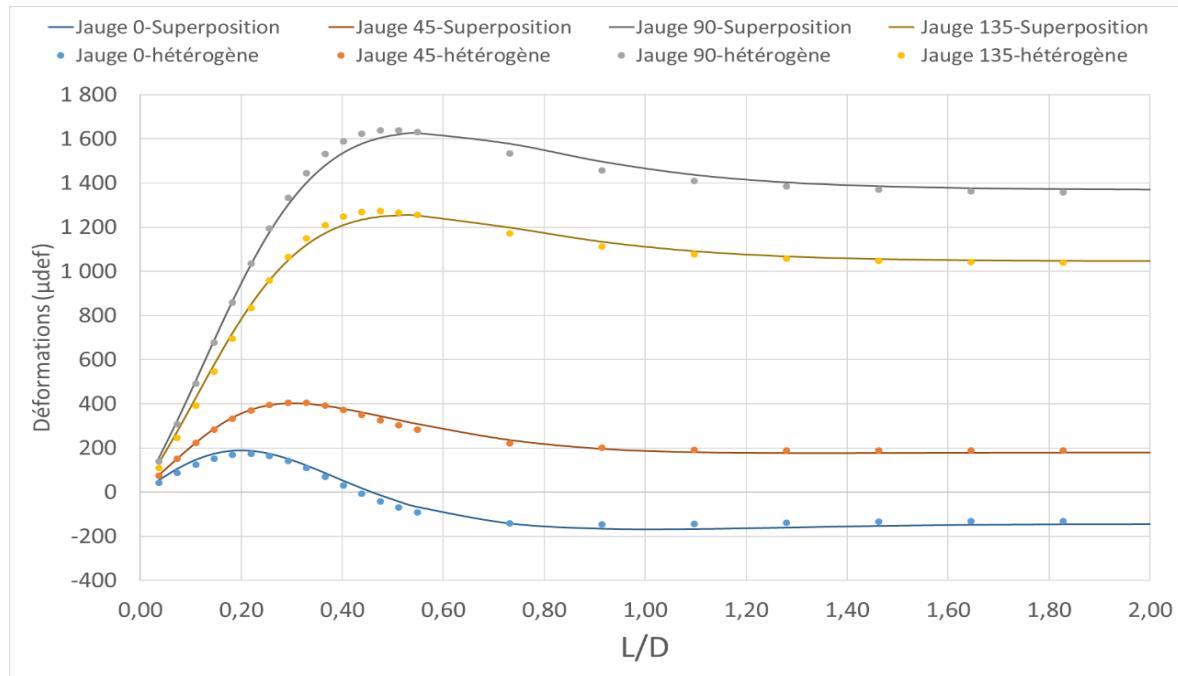


Figure 3.28 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.5$ – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

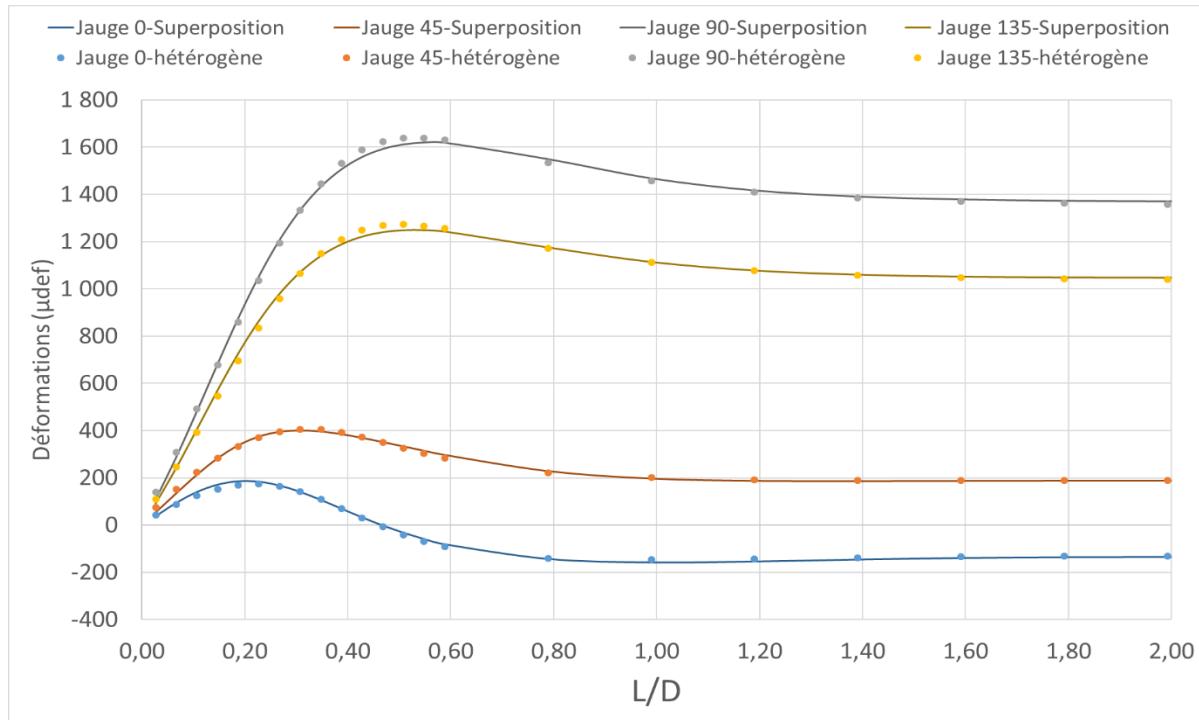


Figure 3.29 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.5$ – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction linéaire

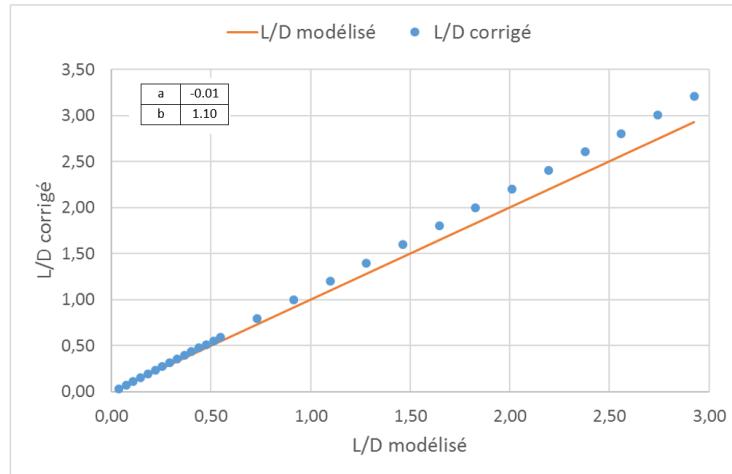


Figure 3.30 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.5$  – Correction linéaire apportée sur la mesure de l'avancement  $L/D$

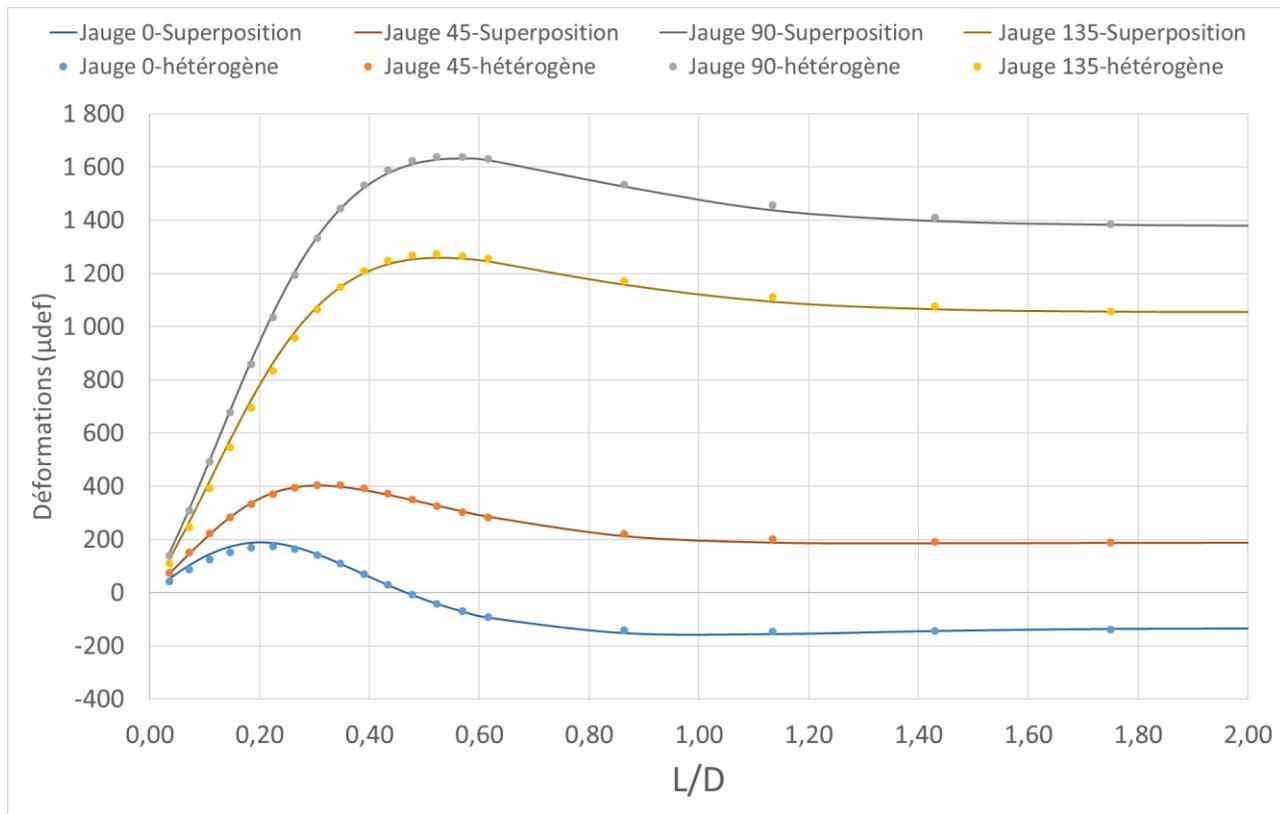


Figure 3.31 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.5$  – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction polynomiale

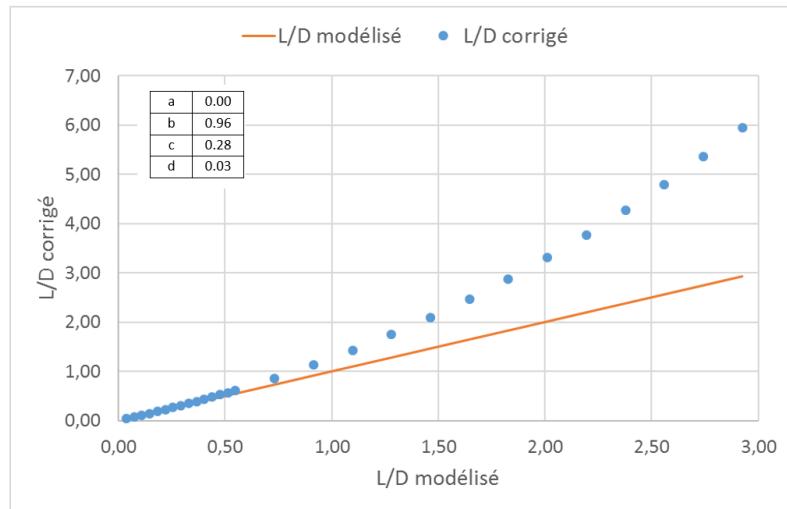


Figure 3.32 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.5$ – Correction polynomiale apportée sur la mesure de l'avancement  $L/D$

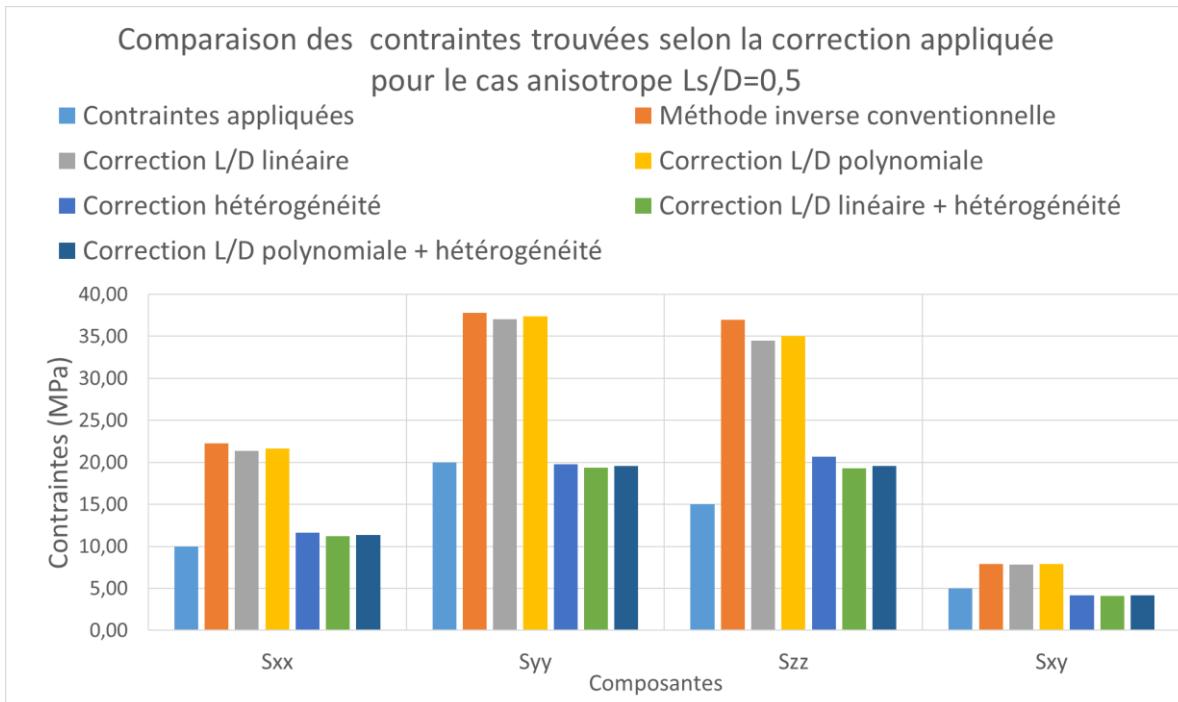


Figure 3.33 : Modèles anisotropes  $L_h/D = 0.5$ – Comparaison des contraintes trouvées selon le type de correction

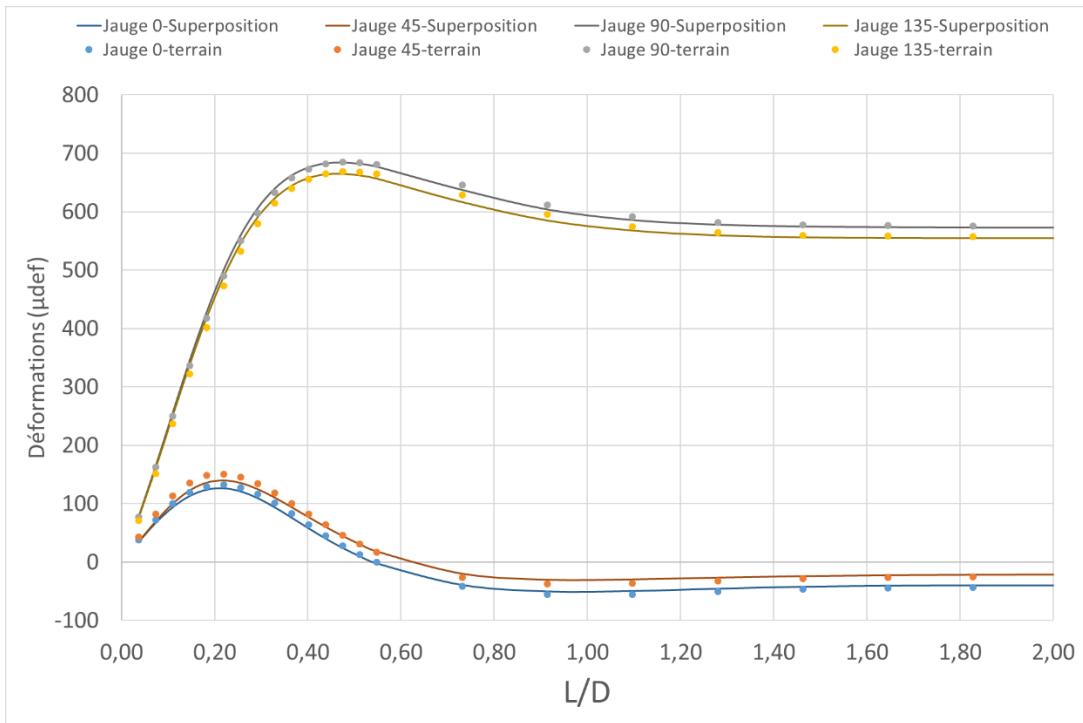


Figure 3.34 : Modèle hétérogène graduel – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

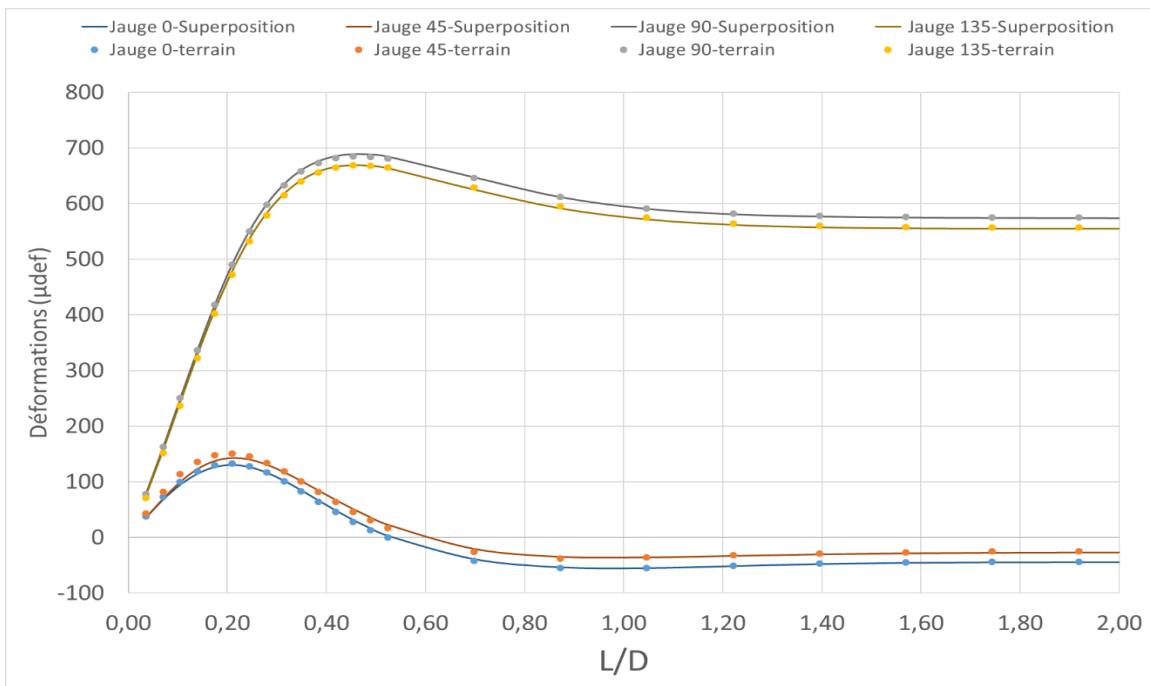


Figure 3.35 : Modèle hétérogène graduel – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction linéaire

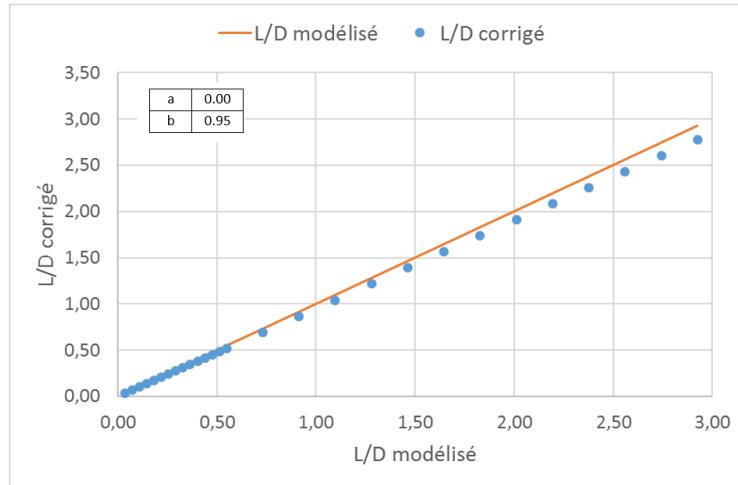


Figure 3.36 : Modèle hétérogène graduel – Correction linéaire apportée sur la mesure de l'avancement L/D

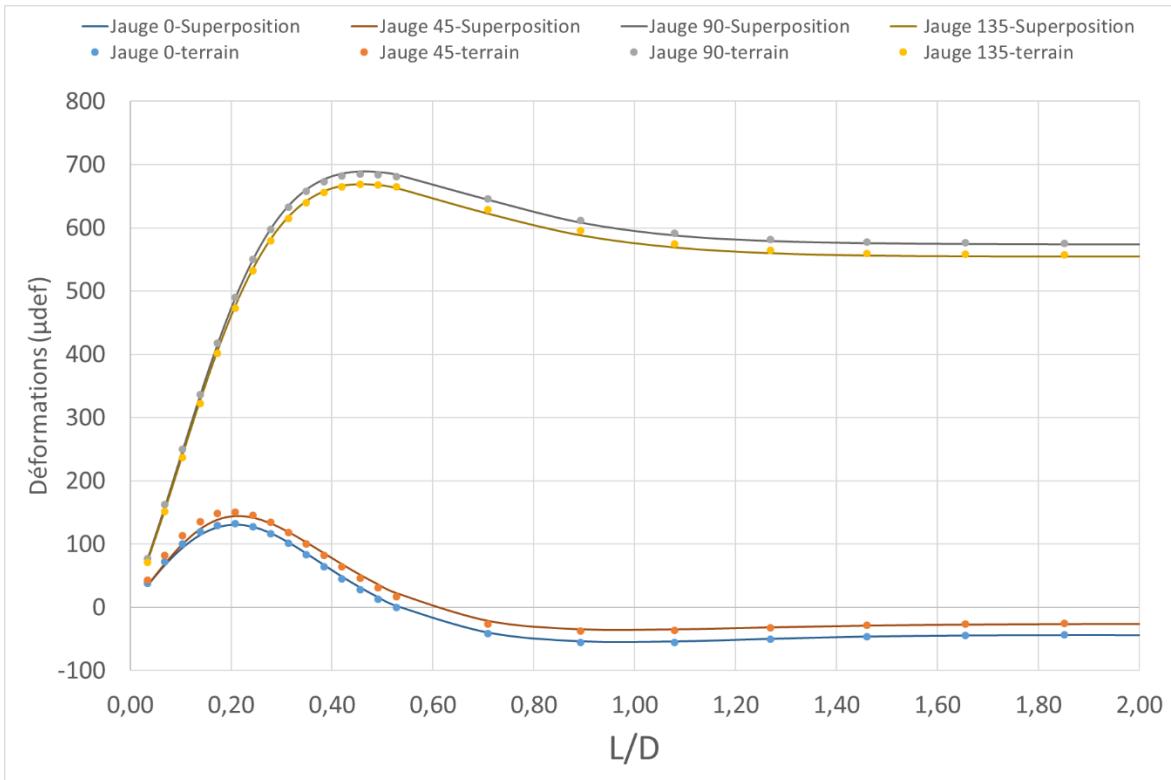


Figure 3.37 : Modèle hétérogène graduel – Superposition des courbes de déformations d'un matériau hétérogène et des courbes obtenues avec la méthode inverse avec correction polynomiale

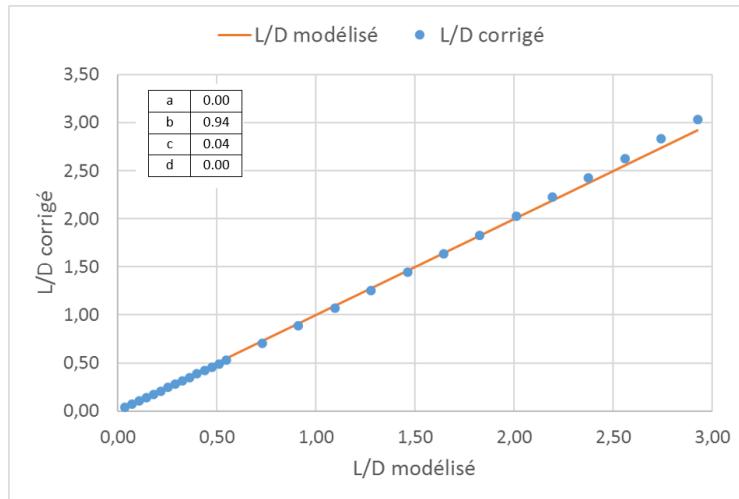


Figure 3.38 : Modèle hétérogène graduel – Correction polynomiale apportée sur la mesure de l'avancement L/D

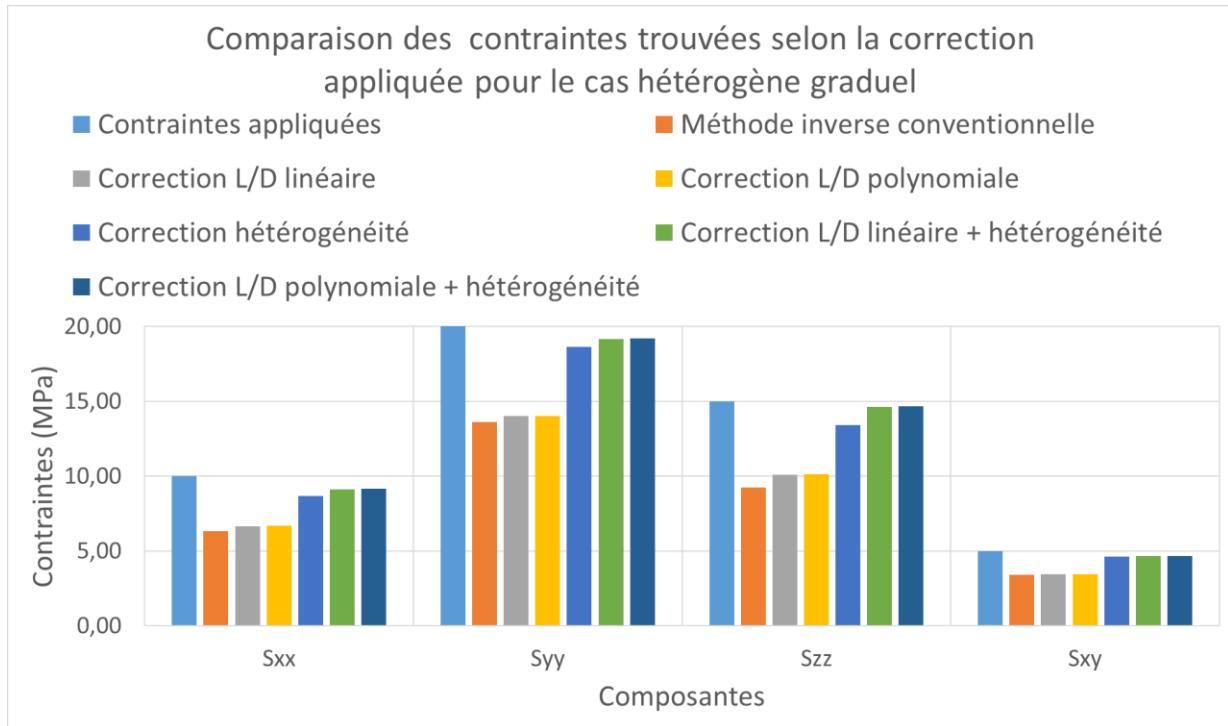


Figure 3.39 : Modèle hétérogène graduel – Comparaison des contraintes trouvées selon le type de correction

Des corrections supérieures à 10% sont faites sur les avancements sortants des modèles anisotropes afin de permettre aux courbes unitaires de mieux se superposer aux courbes de terrain simulées. On constate aussi que bien que les courbes se juxtaposent parfaitement suite à la correction de l'avancement, il subsiste un biais avec le tenseur appliqué qui est diminué avec les facteurs de

correction de l'hétérogénéité. La figure 3.40 présente le résidu normalisé par rapport au nombre de mesures ( $\Sigma e^2/N$ ) entre les déformations des modèles hétérogènes et les déformations estimées avec la méthode inverse.

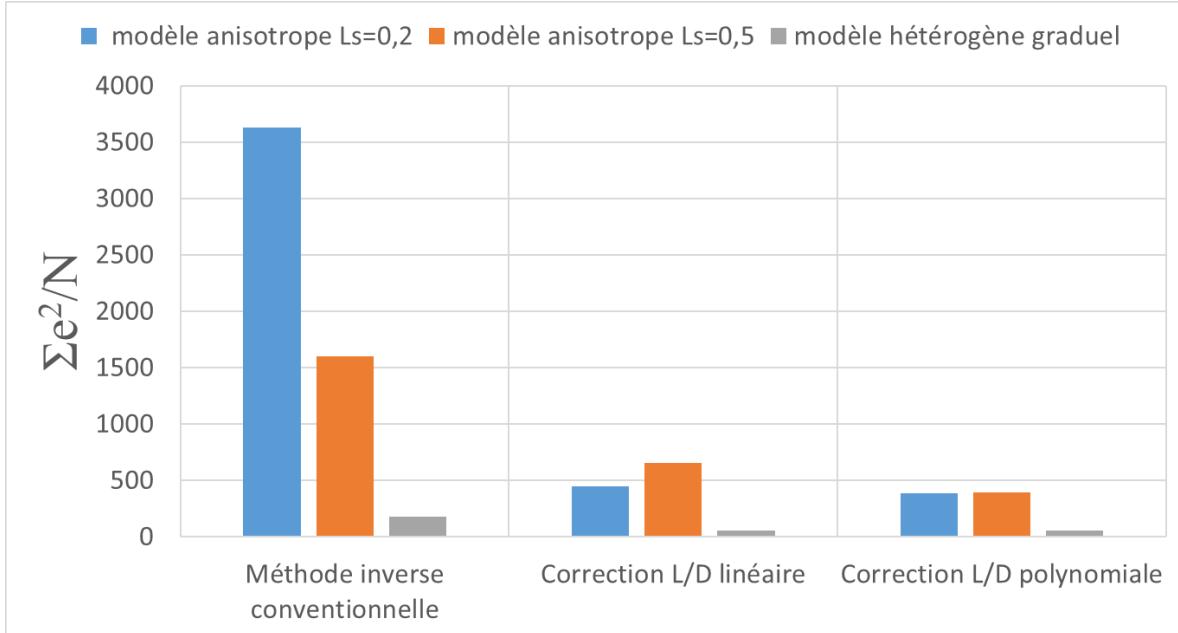


Figure 3.40 : Comparaison des ( $\Sigma e^2/N$ ) pour les trois cas modélisés selon la méthode inverse appliquée

La figure 3.41 illustre la différence relative (Dr) calculée avec l'équation 3.12 entre le tenseur appliqué et le tenseur trouvé par cas analysé et selon le type de correction appliquée.

$$Dr = \frac{\left( (S_{xx\text{appliquée}} - S_{xx\text{inverse}})^2 + (S_{yy\text{appliquée}} - S_{yy\text{inverse}})^2 + (S_{zz\text{appliquée}} - S_{zz\text{inverse}})^2 + (S_{xy\text{appliquée}} - S_{xy\text{inverse}})^2 \right)}{\left( S_{xx\text{appliquée}}^2 + S_{yy\text{appliquée}}^2 + S_{zz\text{appliquée}}^2 + S_{xy\text{appliquée}}^2 \right)} \quad (3.12)$$

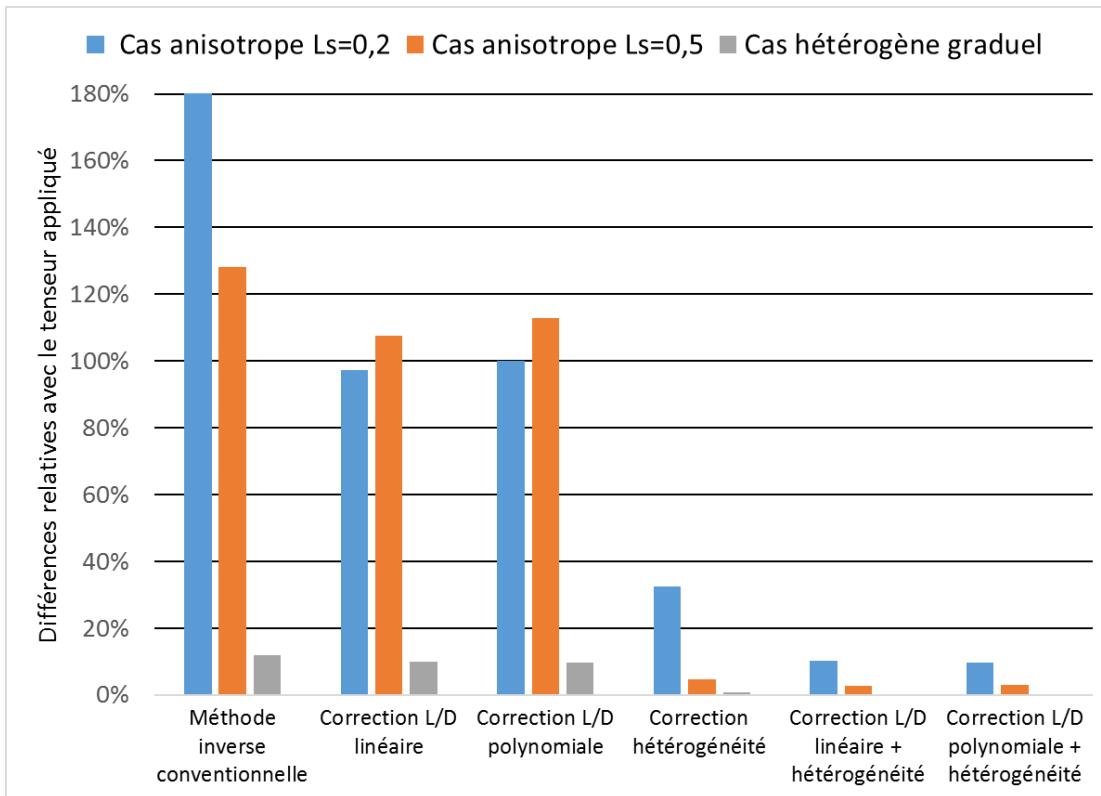


Figure 3.41 : Résumé des différences relatives avec la correction sur l'avancement et l'hétérogénéité

Les corrections de l'avancement diminuent la différence relative entre le tenseur calculé et le tenseur appliqué. Ceci permet d'affirmer que la correction de l'avancement permet de corriger certains phénomènes qui ne sont pas considérés dans le modèle numérique servant à la méthode inverse. Cette figure permet aussi de constater qu'une combinaison de la correction sur l'avancement et des facteurs de correction de l'hétérogénéité donnent un tenseur plus exact que lorsqu'une seule correction est effectuée selon les cas analysés. Pour la carotte h t rog n e graduelle, la combinaison des corrections permet d'avoir une différence relative de 0.21% avec le tenseur appliqué ce qui est prometteur.

L'hétérogénéité peut faire en sorte de surestimer ou sous-estimer la contrainte dans l'axe du forage car elle influence les paramètres de déformabilité et les courbes de récupération. La sous-estimation se produit lorsque le matériaux va de tendre à rigide en allant des jauge vers la face opposée au plan de mesure,  $E_b/E_h < 1$  ou  $R_d < 0.20$ . Il est donc possible d'affirmer que le tenseur trouvé sans correction est conservateur si le rapport  $E_b/E_h > 1$  ou  $0.20 > R_d$  car les contraintes sont surestimées.

Une compression biaxiale isotrope sur différentes longueurs pourrait permettre de vérifier si ce phénomène est présent aux mines Alpha et Beta. Les tableaux ayant permis de créer les différentes figures précédentes sont présentés à l'annexe D.

## CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Les contraintes calculées avec différentes méthodes sont présentées en deux parties étant donné que les mesures utilisées proviennent des deux mines Alpha et Beta. Par hypothèse, les courbes de déformations représentent seulement les déformations occasionnées par un relâchement de contrainte sur lesquelles aucun biais extérieur, comme les effets de la variation de température n'est présent. Les tenseurs partiels sont trouvés avec la méthode inverse appliquée de quatre façons différentes : avec toutes les déformations (méthode conventionnelle), avec les déformations situées avant le pic de déformation (méthode des courbes partielles) tel que montré dans la section 3.1.5, avec les corrections de L/D linéaire et polynomiale. Les courbes obtenues avec les tenseurs partiels calculés avec la méthode RPR en utilisant le principe de superposition sont aussi montrées. Le tenseur tridimensionnel obtenu selon chaque méthode d'interprétation est aussi présenté à des fins de comparaison. Les tenseurs obtenus avec la méthode RPR, qui est une méthode ayant fait ses preuves et qui était, avant l'introduction de la méthode inverse, considérée comme la plus performante, sont présentés à titre de comparaison afin de vérifier si la méthode inverse permet d'obtenir des tenseurs plausibles selon chaque mesure recueillie sur le terrain. Quoiqu'il s'agisse d'une évidence, il est important de mentionner que le tenseur réel présent dans la roche reste inconnu.

Pour la méthode inverse utilisant la totalité des déformations, il a été remarqué que le pic de déformation est souvent sous-estimé pour que le plateau des déformations résiduelles soit respecté. Ceci étant probablement dû au nombre élevé de points situés sur cette partie des courbes, le nombre de points à cet emplacement a été réduit. De plus, le résidu normalisé  $\Sigma e^2/N$  est présenté car la valeur de celui-ci est probablement un très bon indicateur de la qualité du tenseur trouvé si on accepte que les courbes de récupération ne comportent pas de biais important causé par des phénomènes non considérés dans les modèles numériques servant à la méthode inverse.

### 4.1 Interprétation des mesures, mine Alpha

Pour la mine Alpha, neuf mesures ont été faites. En effectuant une évaluation visuelle des courbes de déformations, la mesure T2-M2 ne ressemble pas aux courbes générées par le modèle numérique. Il est aussi noté que les déformations de la mesure T2-M3 augmentent très rapidement en regardant les courbes récupérées. Les deux invariants de chaque mesure sont ensuite vérifiés afin de savoir si toutes les jauge ont fonctionné correctement. La jauge à 135 degrés des mesures

T1-M6 et T3-M1 n'a pas bien fonctionné, l'invariant des jauge à 0 et 90 degrés est alors utilisé pour déduire les déformations qui auraient été lues sur cette jauge si elle avait fonctionné correctement.

Les recharges en laboratoire sont réalisées selon la procédure présentée à la section 2.4.1.3 afin d'obtenir les paramètres de déformabilité à chaque point de mesure. L'angle  $\omega$  utilisé pour passer du système de référence des jauge à celui des axes d'anisotropie apparente est aussi présenté au tableau 4-1.

Tableau 4.1 : Paramètres de déformabilité, mine Alpha

Mesures	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$\nu$	$\omega$ (°)
T1-M3	39,43	28,28	0,164	-30,73
T1-M6	45,02	28,17	0,121	-68,57
T1-M7	40,72	22,89	0,064	41,02
T2-M1	27,94	18,03	0,166	-84,17
T2-M2	44,27	23,02	0,106	-73,45
T2-M3	31,78	26,50	0,032	73,29
T3-M1	30,9	27,15	0,090	15,72
T3-M2	29,99	15,89	0,104	-78,08
T3-M3	27,70	24,77	0,138	-51,05

Les paramètres  $E_1$ ,  $E_2$  et  $\nu$  sont ensuite introduits dans le modèle numérique afin de produire les courbes de récupération unitaires. L'application de la méthode inverse permet l'obtention des tenseurs partiels. Une rotation ( $\beta-\omega$ ) des tenseurs partiels est alors faite pour ramener les contraintes estimées dans le référentiel du forage.

Par la suite, les courbes de récupération de terrain sont superposées à celles obtenues des différentes méthodes d'interprétation, soit la méthode RPR, la méthode inverse conventionnelle, la méthode des courbes partielles, la méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement et la méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement. Pour chaque mesure, trois séries de courbes sont présentées. Une première utilisant le principe de superposition avec le tenseur trouvé avec la méthode RPR pour comparer les courbes de terrain avec les courbes que ce tenseur génère. Une deuxième série pour la méthode inverse conventionnelle et la méthode des courbes partielles. Puis une dernière série générée avec la méthode inverse avec correction linéaire et polynomiale de

l'avancement. La valeur des résidus normalisés  $\Sigma e^2/N$  montrée est la somme des erreurs aux carrés entre les déformations estimées et de terrain, divisée par le nombre de points afin de comparer la juxtaposition des courbes entre les méthodes inverse sans et avec correction. Il s'agit donc d'un résidu normalisé qui est indépendant du nombre de point de mesures réalisés sur le terrain. Lorsqu'il y a correction, un graphique illustre la corrélation entre les valeurs de L/D mesurées et corrigées et les facteurs (a,b,c,d) des polynômes utilisés pour la correction selon l'équation 3.6 sont présentés antérieurement. Ces graphiques comportent aussi une droite tiretée pour laquelle  $L/D$  mesuré =  $L/D$  corrigé, qui permet d'apprécier l'importance de la correction effectuée. Les tenseurs partiels obtenus sans et avec correction du rapport L/D sont aussi présentés par méthode et mesure. Des figures permettant de comparer les contraintes obtenues ainsi que le résidu normalisé par méthode sont ensuite présentées.

### Mesure T1-M3 : méthode RPR

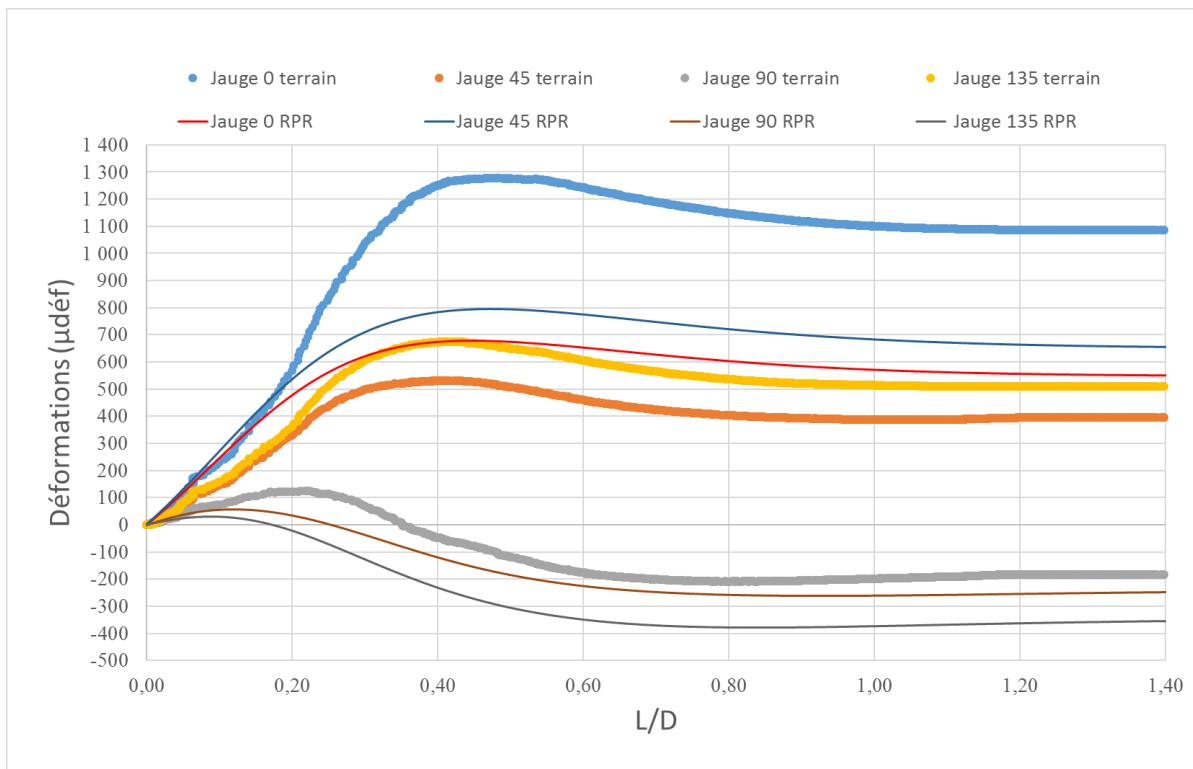


Figure 4.1 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.2 : Mesure T1-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	22,13
$S_{YY}$ (MPa)	9,98
$S_{ZZ}$ (MPa)	24,80
$S_{XY}$ (MPa)	-12,82
$\Sigma e^2/N$	1 007 072

### Mesure T1-M3 : méthode inverse conventionnelle

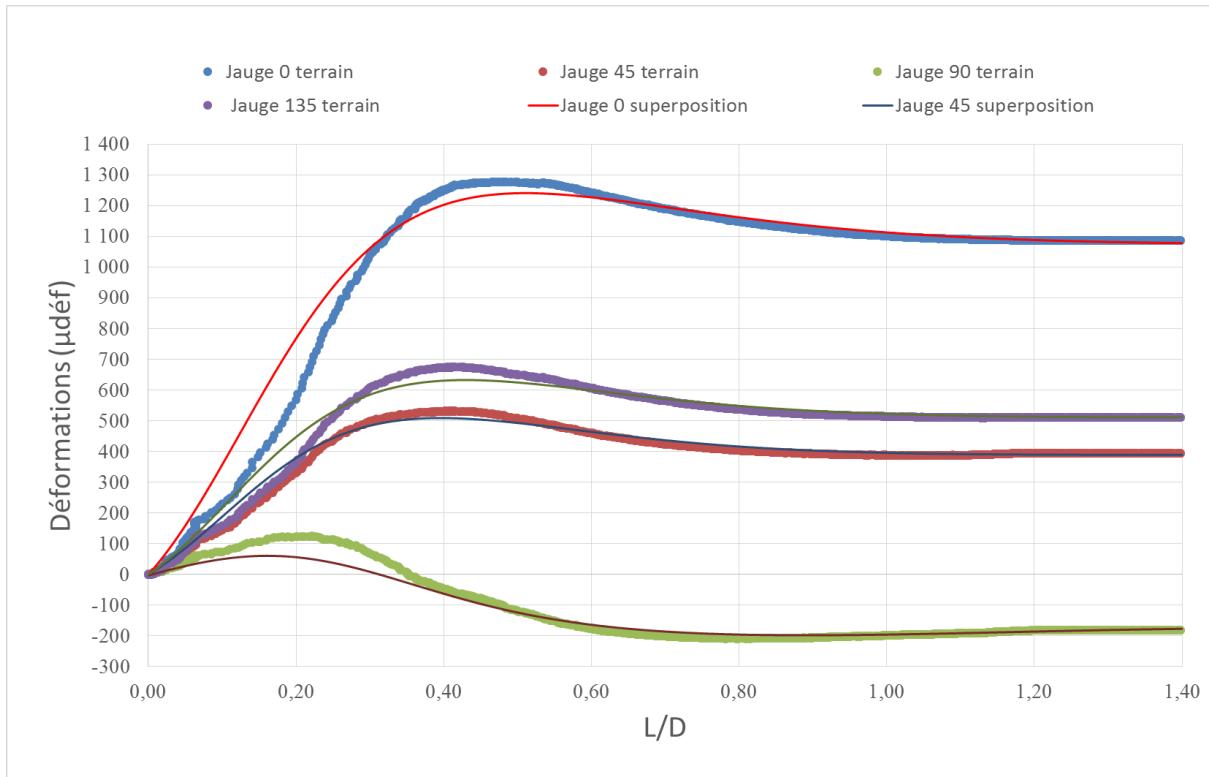


Figure 4.2 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.3 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	13,59
$S_{YY}$ (MPa)	26,57
$S_{ZZ}$ (MPa)	8,71
$S_{XY}$ (MPa)	-13,65
$\Sigma e^2/N$	3 256

### Mesure T1-M3 : méthode des courbes partielles

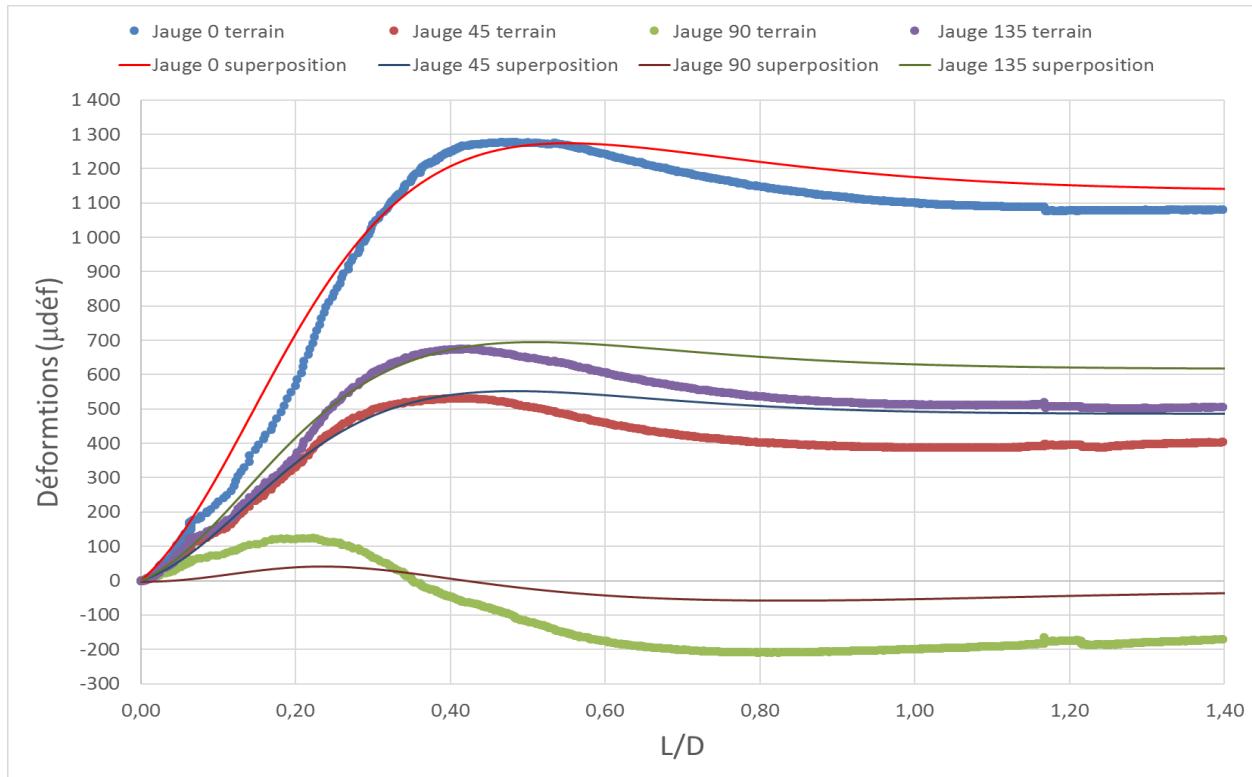


Figure 4.3 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.4 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	8,38
$S_{YY}$ (MPa)	20,63
$S_{ZZ}$ (MPa)	-13,55
$S_{XY}$ (MPa)	-12,48
$\Sigma e^2/N$	5298

### Mesure T1-M3 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

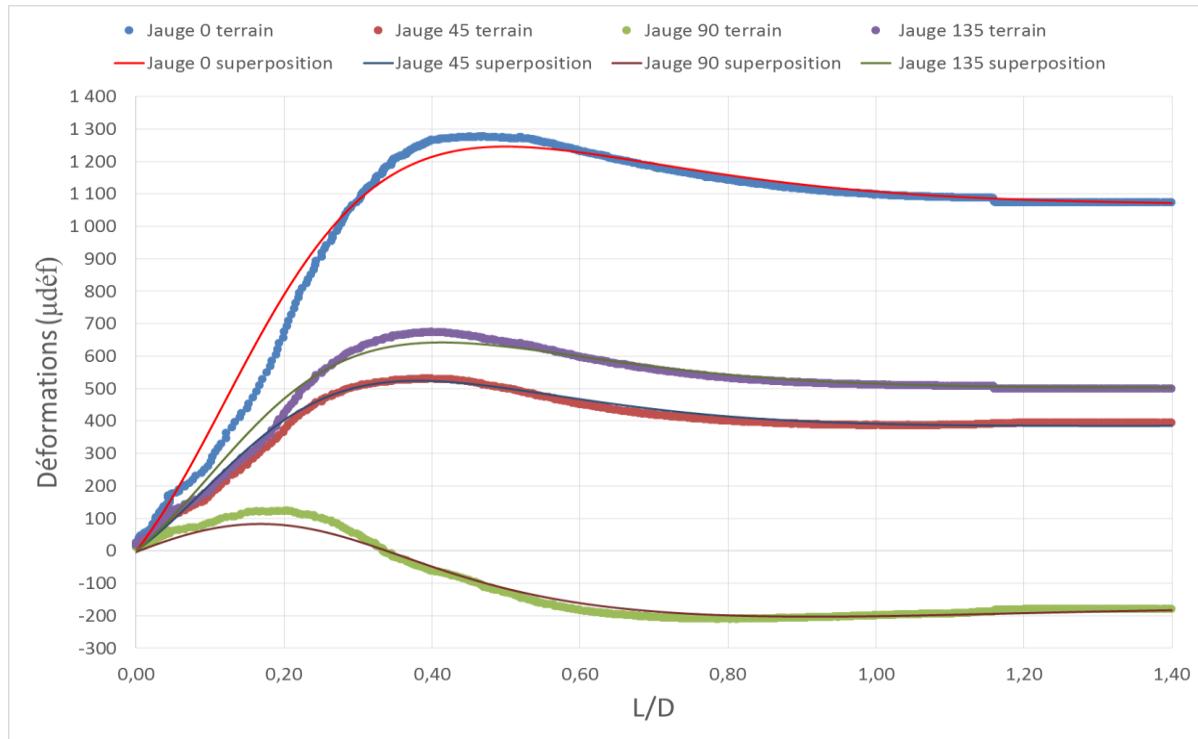


Figure 4.4: Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.5 : Mesure T1-M3 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction linéaire de  
 $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	15,41
$S_{YY}$ (MPa)	28,44
$S_{ZZ}$ (MPa)	13,79
$S_{XY}$ (MPa)	-13,89
$\Sigma \epsilon^2 / N$	1361
a	-0,02
b	1,01

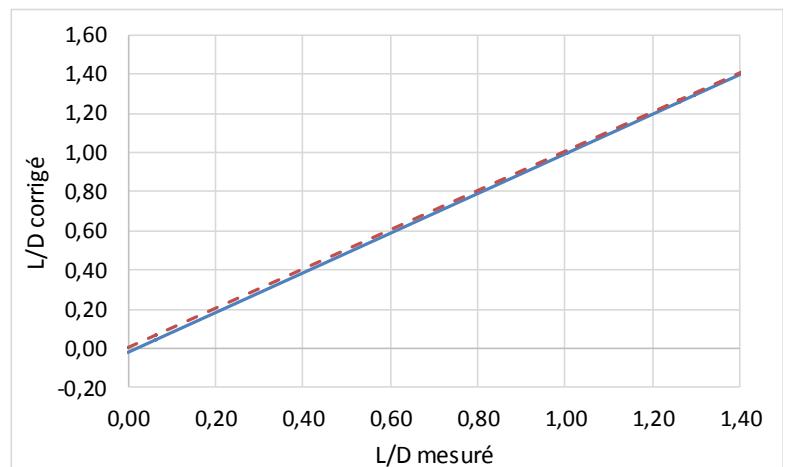


Figure 4.5 : Mesure T1-M3 – Correction linéaire effectuée  
sur  $L/D$

### Mesure T1-M3 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

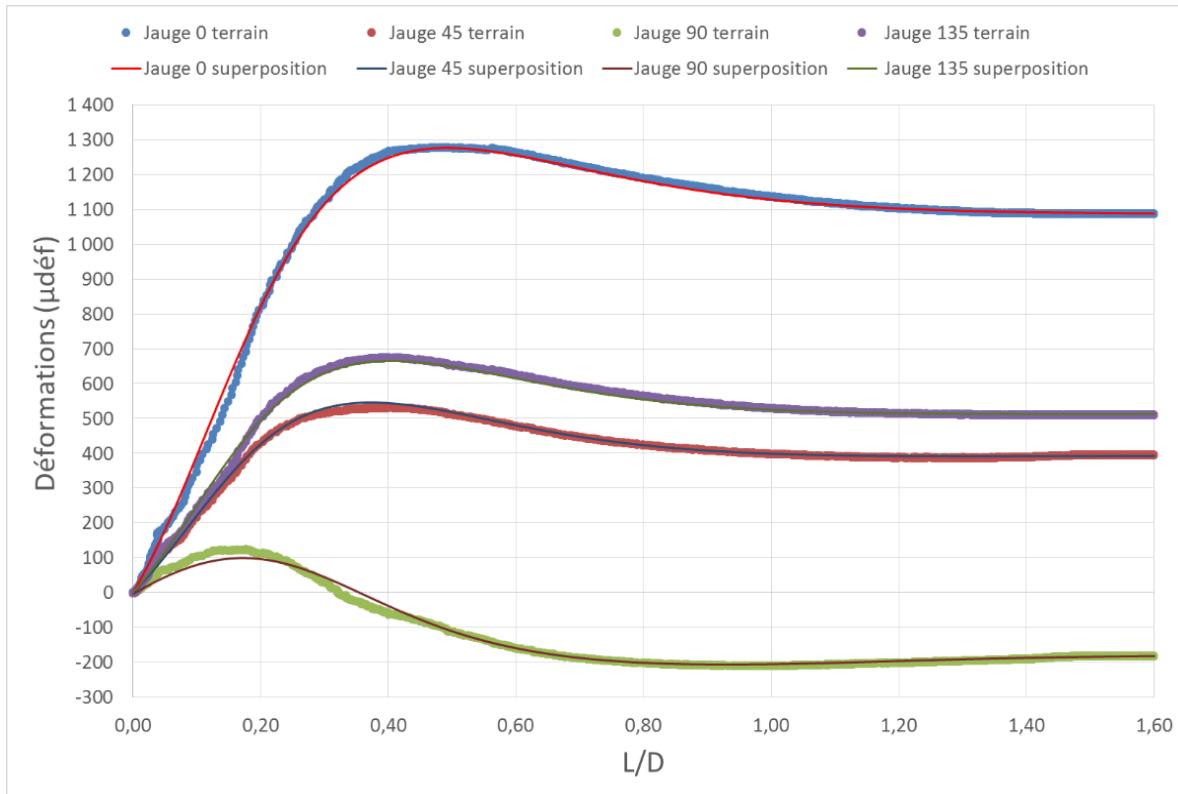


Figure 4.7 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.6 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	16,92
$S_{YY}$ (MPa)	30,39
$S_{ZZ}$ (MPa)	17,43
$S_{XY}$ (MPa)	-14,30
$\Sigma \epsilon^2 / N$	257
a	0,00
b	0,54
c	1,26
d	-0,57

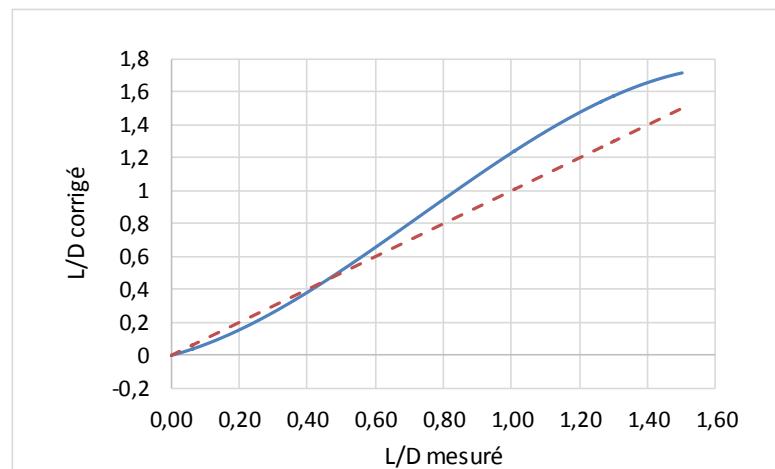


Figure 4.6 : Mesure T1-M3 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

### Mesure T1-M6 : méthode RPR

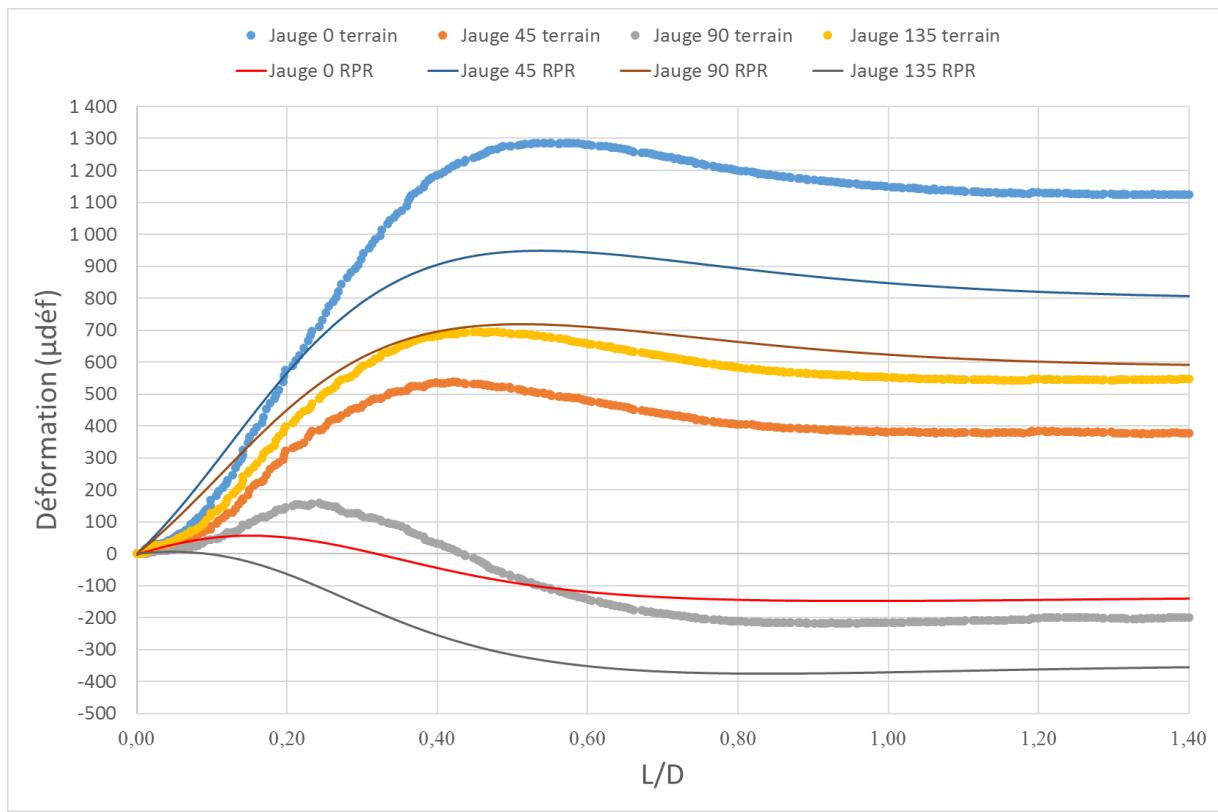


Figure 4.8 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.7 : Mesure T1-M6 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	-0,37
$S_{YY}$ (MPa)	26,56
$S_{ZZ}$ (MPa)	22,30
$S_{XY}$ (MPa)	-4,35
$\Sigma e^2/N$	2 444 455

### Mesure T1-M6 : méthode inverse conventionnelle

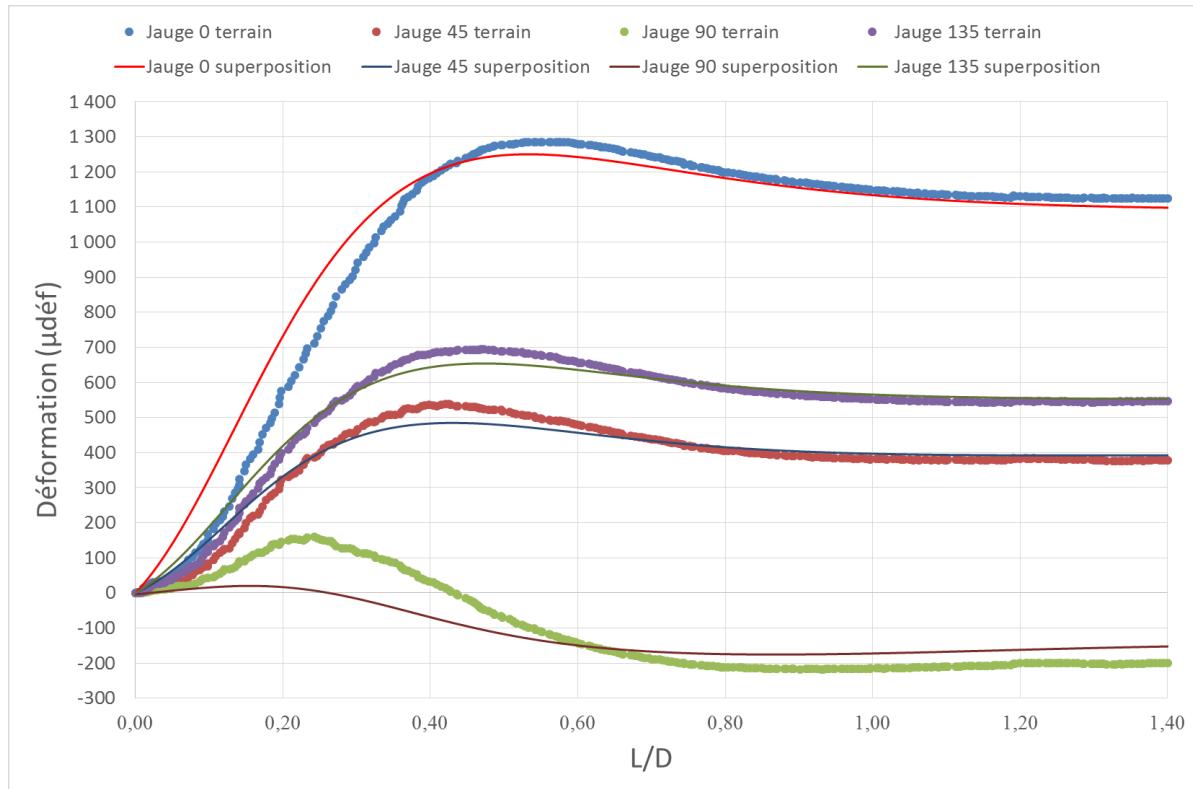


Figure 4.9 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.8 : Mesure T1-M6 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	22,66
$S_{YY}$ (MPa)	14,65
$S_{ZZ}$ (MPa)	-1,56
$S_{XY}$ (MPa)	16,75
$\Sigma e^2/N$	9799

### Mesure T1-M6 : méthode des courbes partielles

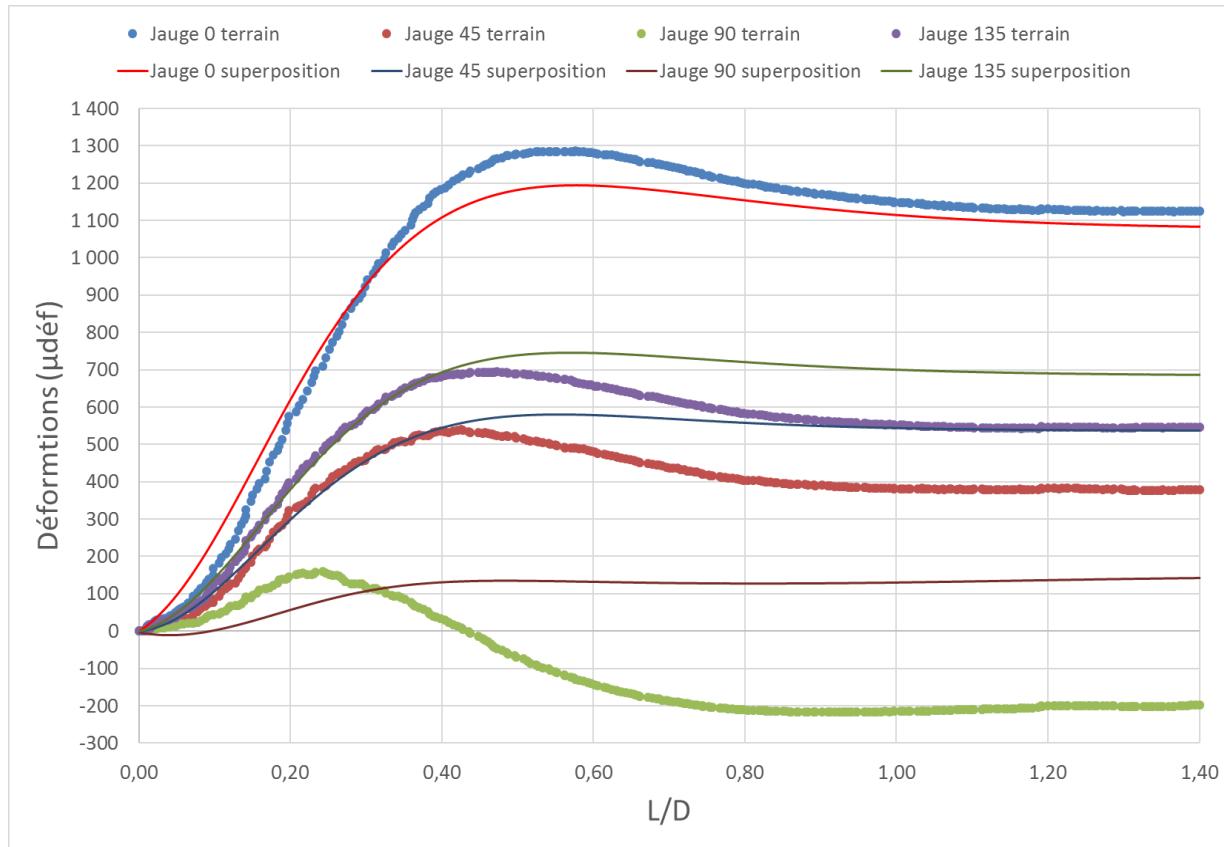


Figure 4.10 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.9 : Mesure T1-M6 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	16,02
$S_{YY}$ (MPa)	9,37
$S_{ZZ}$ (MPa)	-28,94
$S_{XY}$ (MPa)	12,64
$\Sigma e^2/N$	5409

### Mesure T1-M6 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

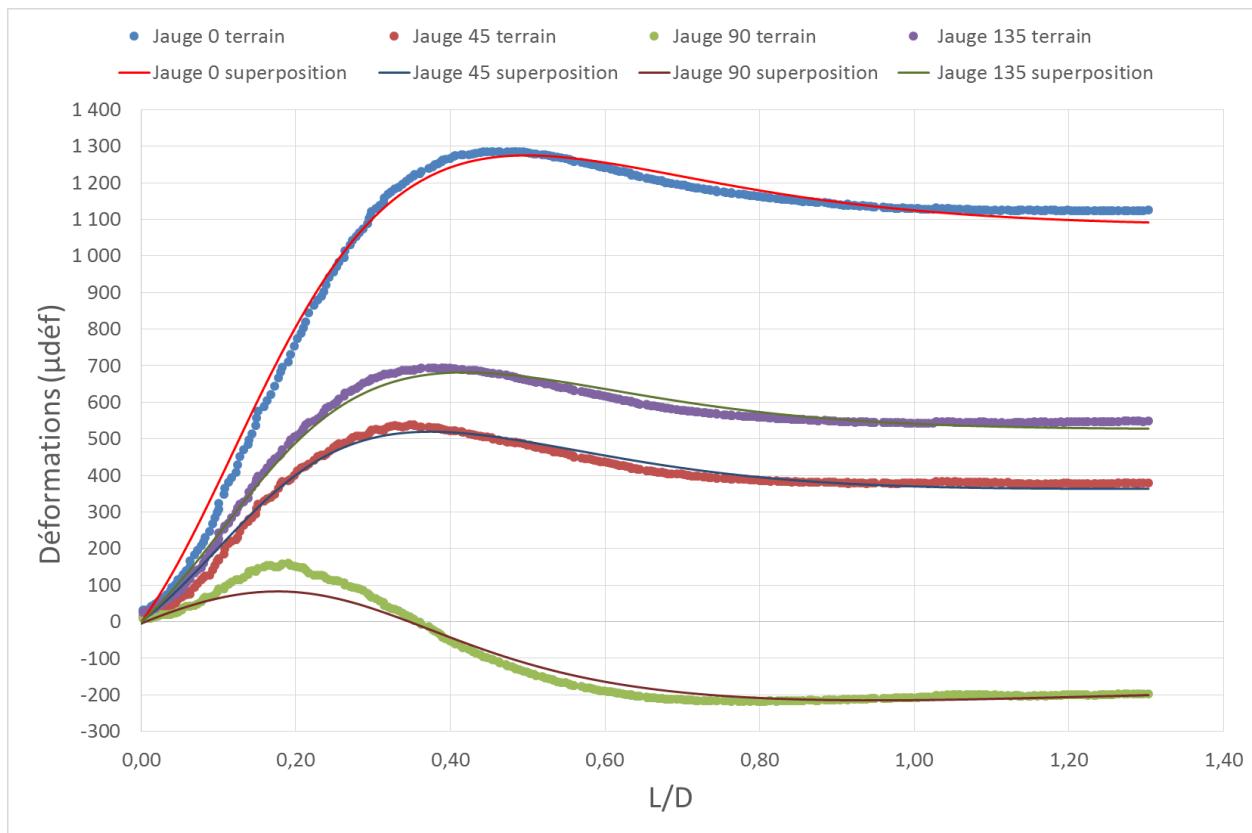


Figure 4.12 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.10 : Mesure T1-M6 -  
Contraintes estimées de la méthode invers  
avec une correction linéaire de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	28,58
$S_{YY}$ (MPa)	20,21
$S_{ZZ}$ (MPa)	16,98
$S_{XY}$ (MPa)	17,93
$\Sigma e^2/N$	2252
a	-0,02
b	0,88

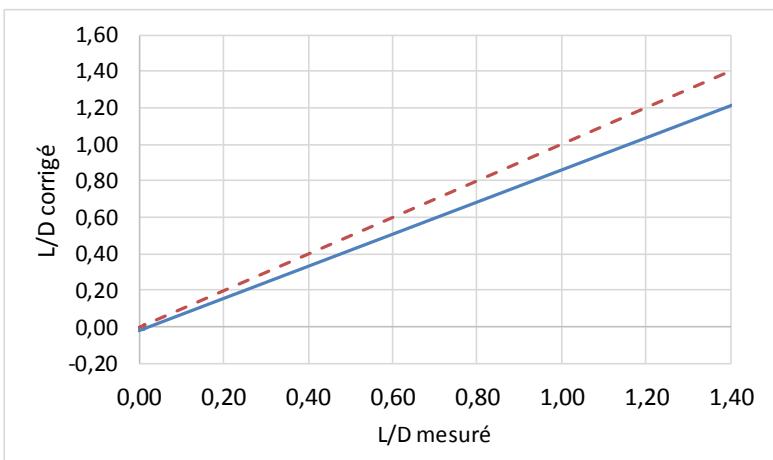


Figure 4.11 : Mesure T1-M6 – Correction linéaire effectuée sur  $L/D$

### Mesure T1-M6 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

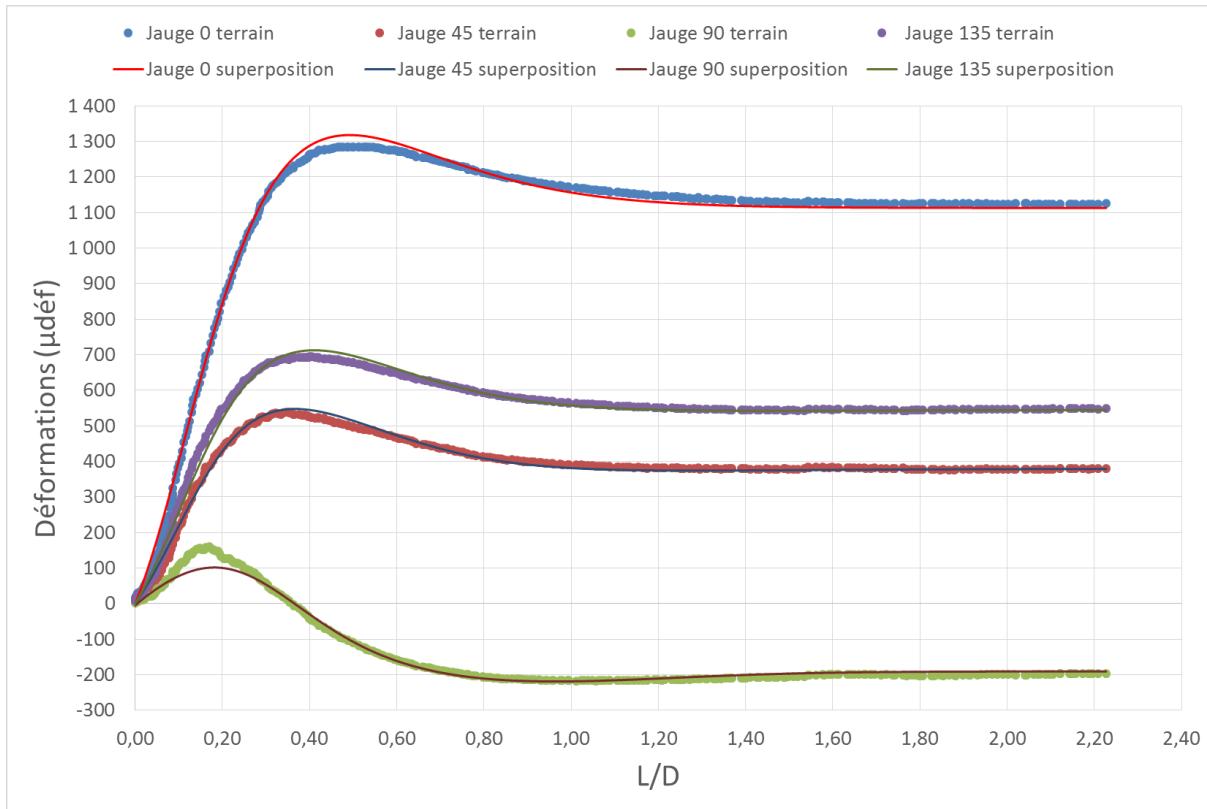


Figure 4.14 : Mesure T1-M6 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.11 : Mesure T1-M6 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction polynomiale  
de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	30,56
$S_{YY}$ (MPa)	21,91
$S_{ZZ}$ (MPa)	20,71
$S_{XY}$ (MPa)	18,59
$\Sigma e^2/N$	875
a	-0,01
b	0,59
c	0,60
d	0,00

### Mesure T1-M6 : méthode inverse avec une correction polynomiale de $L/D$

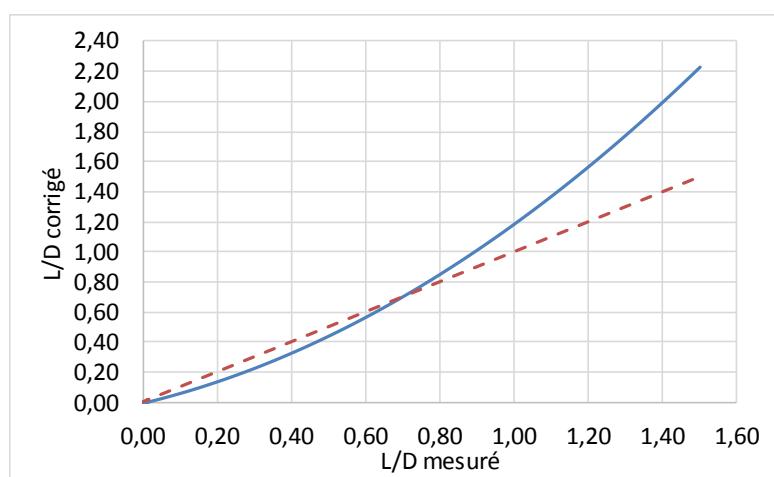


Figure 4.13 : Mesure T1-M6 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

### Mesure T1-M7 : méthode RPR

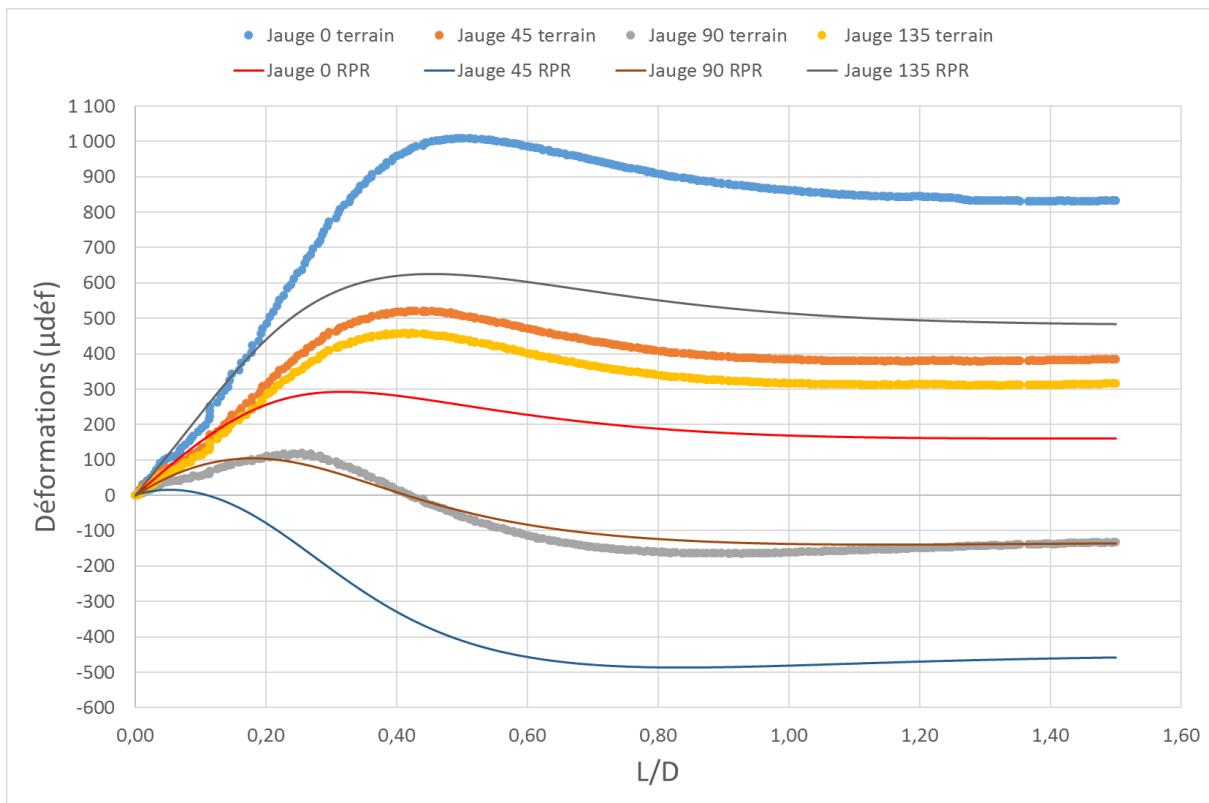


Figure 4.15 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.12 : Mesure T1-M7 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	7,75
$S_{YY}$ (MPa)	12,95
$S_{ZZ}$ (MPa)	29,31
$S_{XY}$ (MPa)	10,06
$\Sigma e^2/N$	924 538

### Mesure T1-M7 : méthode inverse conventionnelle

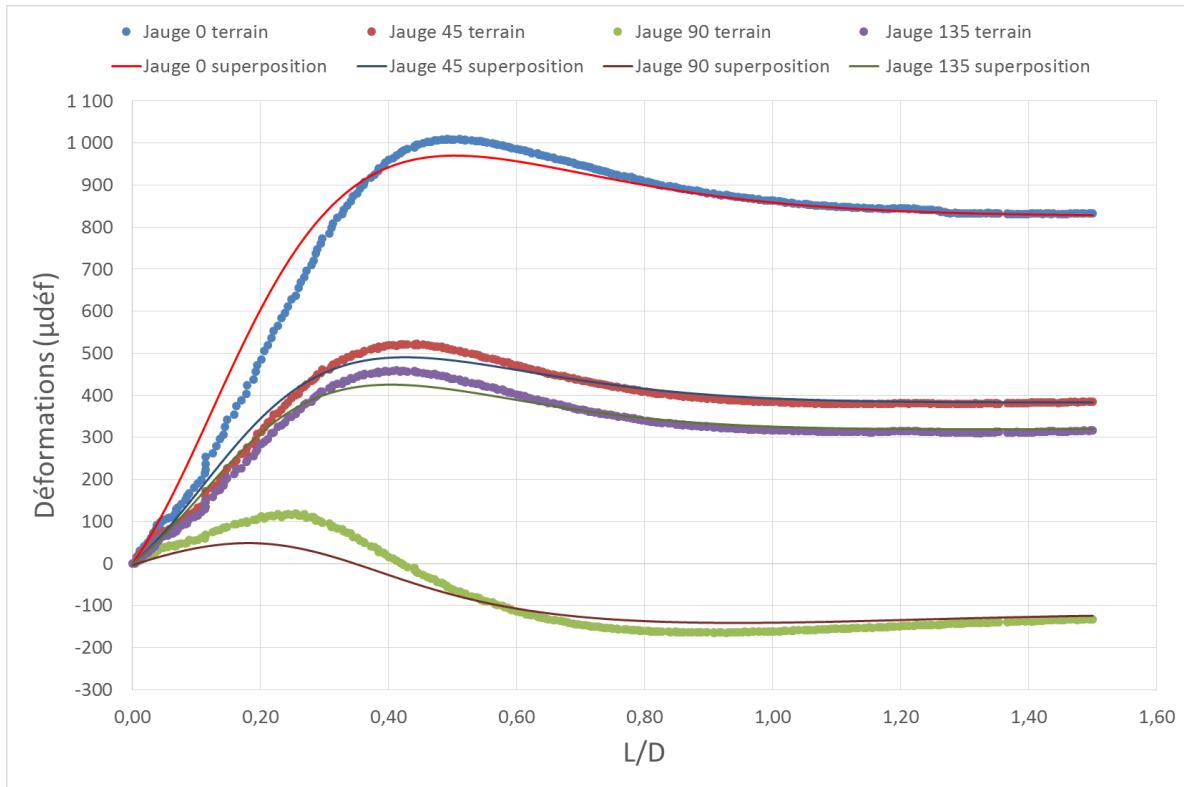


Figure 4.16 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.13 : Mesure T1-M7 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	2,57
$S_{YY}$ (MPa)	27,27
$S_{ZZ}$ (MPa)	7,66
$S_{XY}$ (MPa)	2,34
$\Sigma e^2/N$	3007

### Mesure T1-M7 : méthode des courbes partielles

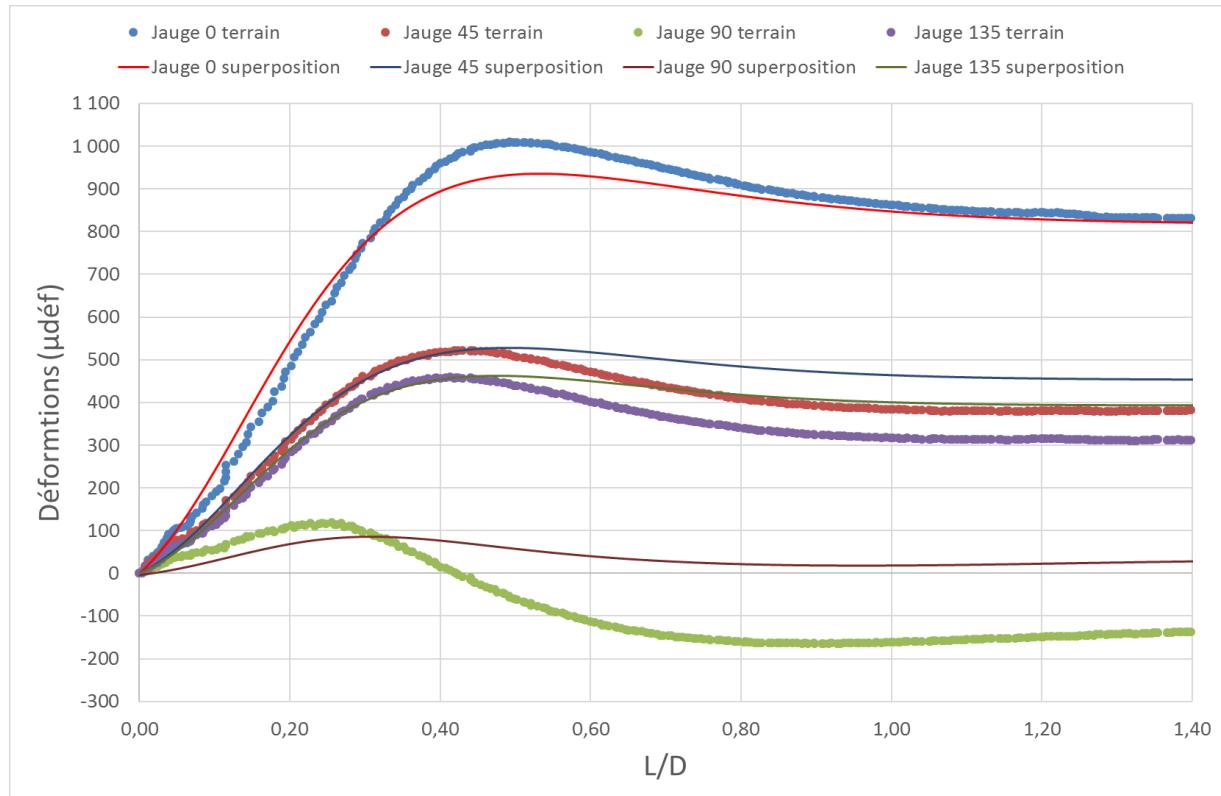


Figure 4.17 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.14 : Mesure T1-M7 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	13,42
$S_{YY}$ (MPa)	23,03
$S_{ZZ}$ (MPa)	-4,51
$S_{XY}$ (MPa)	1,91
$\Sigma e^2/N$	2482

### Mesure T1-M7 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

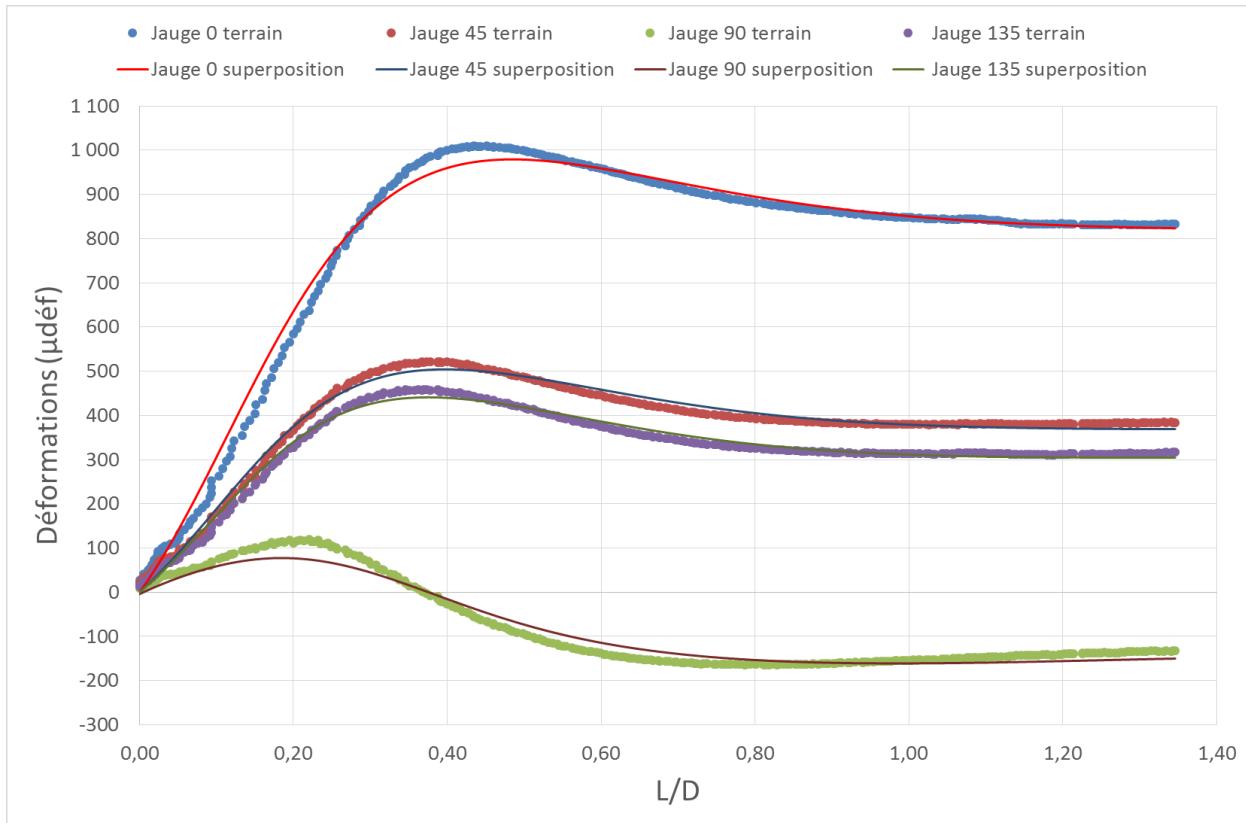


Figure 4.19 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D

Tableau 4.15 : Mesure T1-M7 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D

$S_{XX}$ (MPa)	4,02
$S_{YY}$ (MPa)	29,66
$S_{ZZ}$ (MPa)	15,02
$S_{XY}$ (MPa)	2,45
$\Sigma e^2/N$	1203
a	-0,01
b	0,90

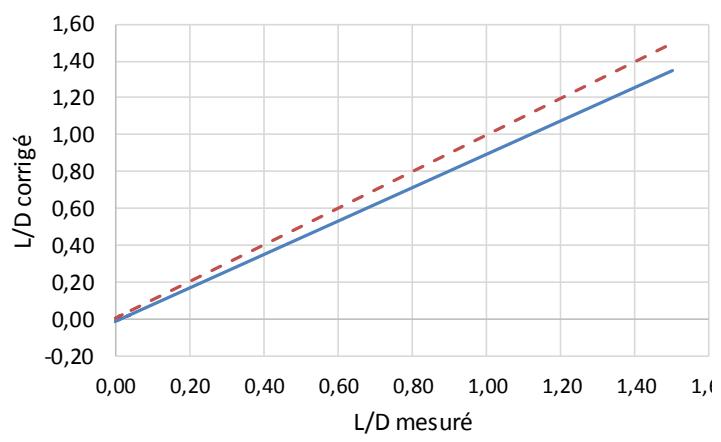


Figure 4.18 : Mesure T1-M7 – Correction linéaire effectuée sur L/D

### Mesure T1-M7 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

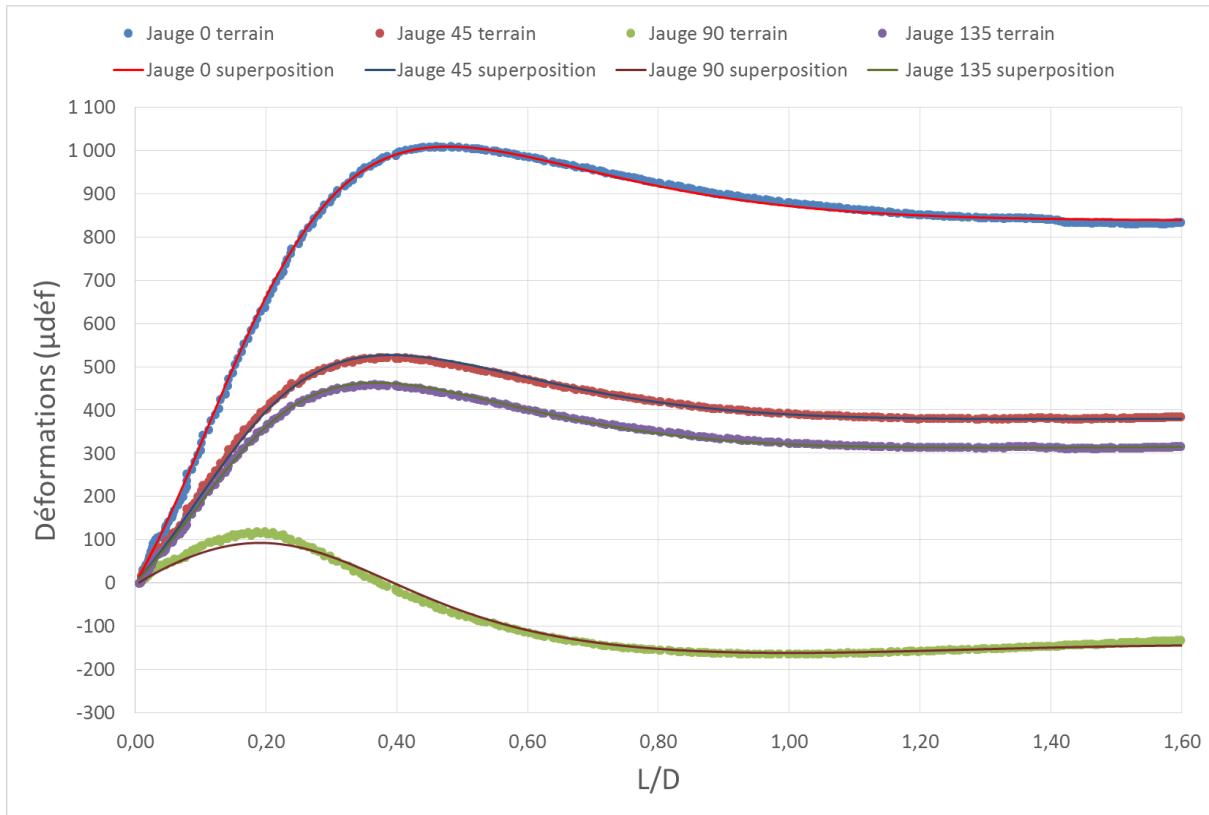


Figure 4.21 : Mesure T1-M7 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.16 : Mesure T1-M7 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	4,72
$S_{YY}$ (MPa)	31,19
$S_{ZZ}$ (MPa)	17,57
$S_{XY}$ (MPa)	2,54
$\Sigma \epsilon^2 / N$	182
a	0,01
b	0,51
c	1,05
d	-0,46

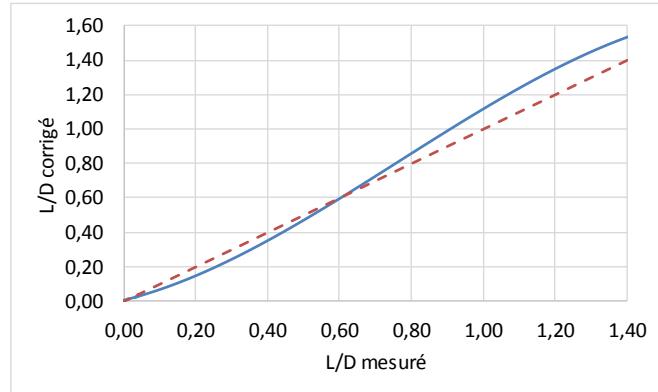


Figure 4.20 : Mesure T1-M7 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

### Mesure T2-M1 : méthode RPR

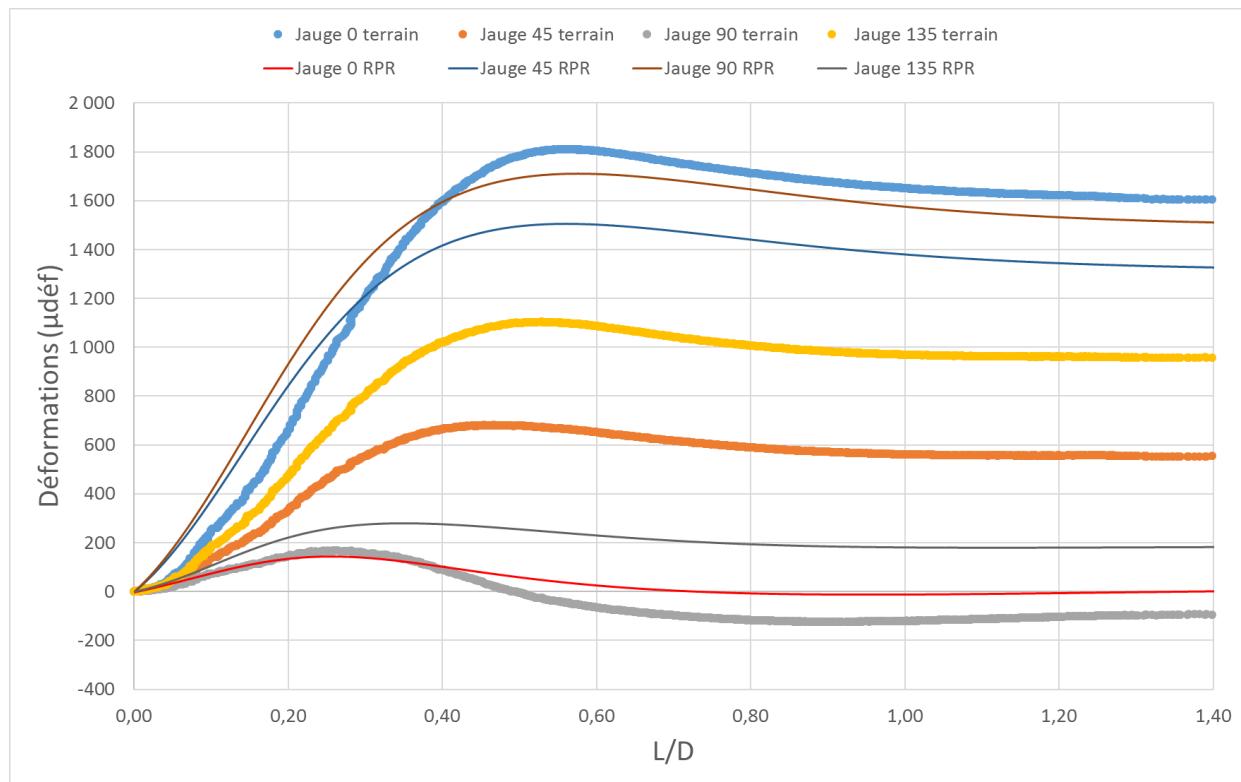


Figure 4.22 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.17 : Mesure T2-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	2,69
$S_{YY}$ (MPa)	24,41
$S_{ZZ}$ (MPa)	0,41
$S_{XY}$ (MPa)	2,72
$\Sigma e^2/N$	5 080 308

### Mesure T2-M1 : méthode inverse conventionnelle

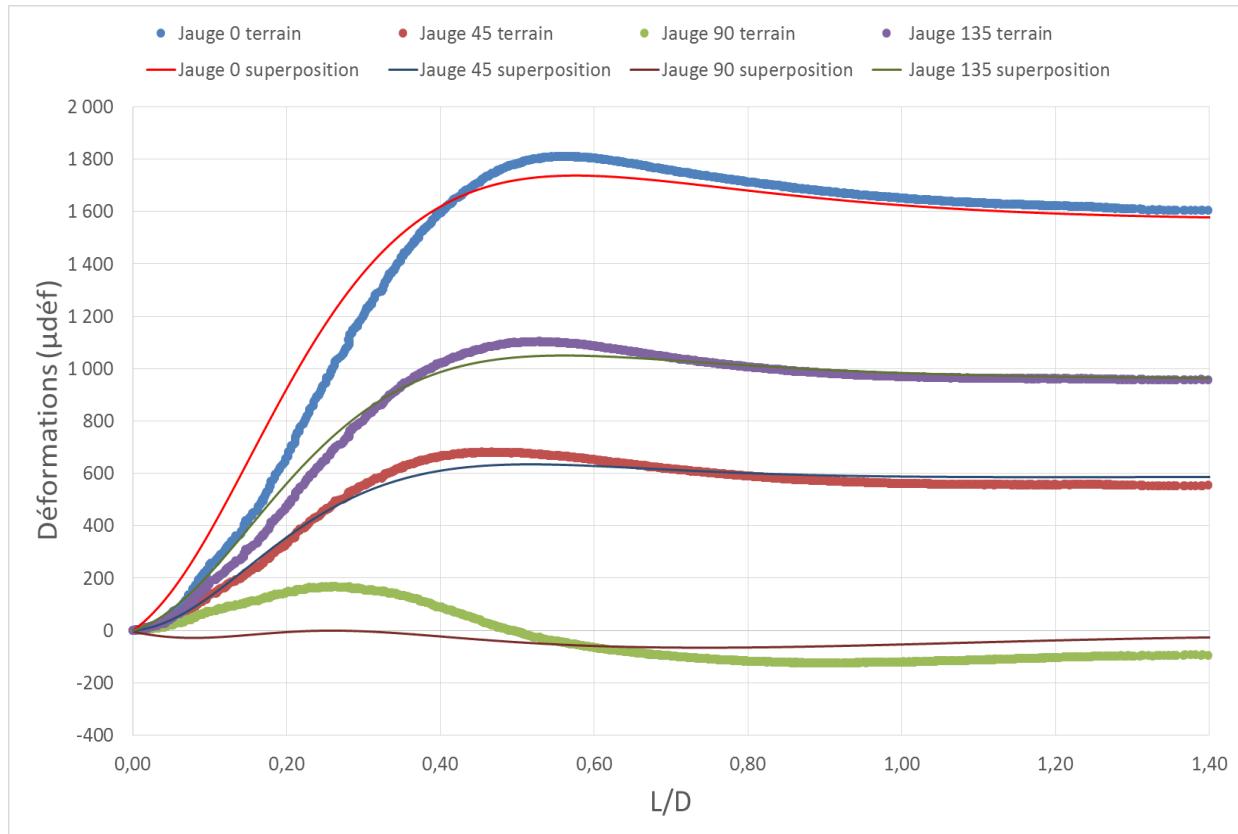


Figure 4.23 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.18 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	22,83
$S_{YY}$ (MPa)	-1,98
$S_{ZZ}$ (MPa)	-23,42
$S_{XY}$ (MPa)	4,13
$\Sigma e^2/N$	19121

### Mesure T2-M1 : méthode des courbes partielles

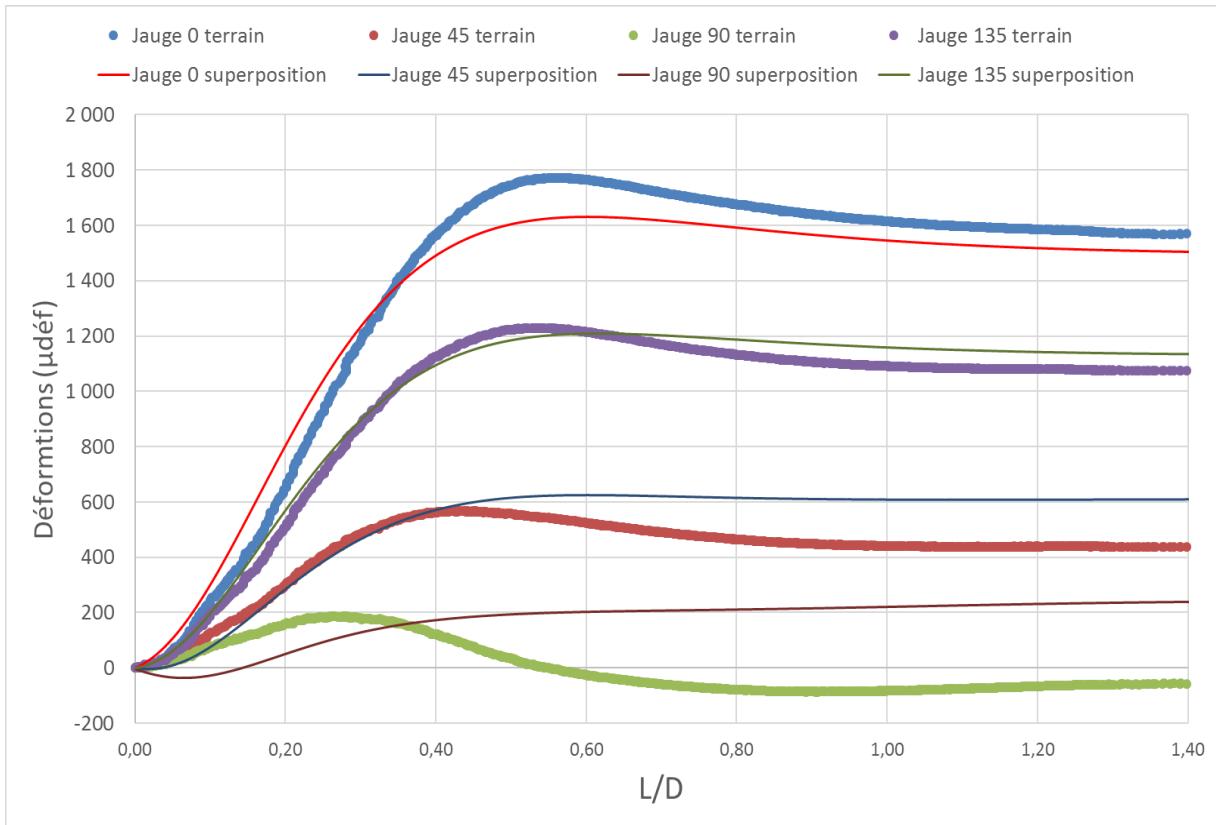


Figure 4.24 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.19 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	17,41
$S_{YY}$ (MPa)	-3,65
$S_{ZZ}$ (MPa)	-36,59
$S_{XY}$ (MPa)	1,90
$\Sigma e^2/N$	16667

### Mesure T2-M1 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

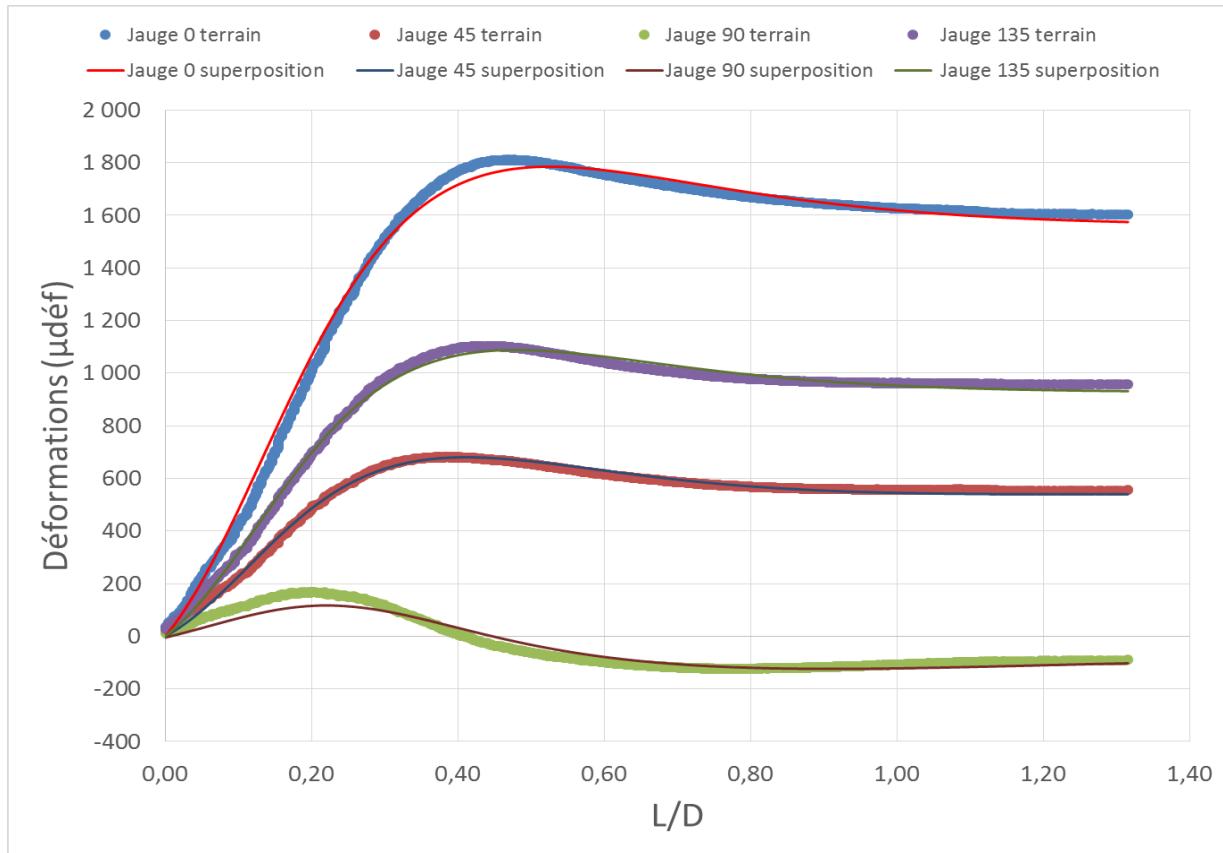


Figure 4.26 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D

Tableau 4.20 : Mesure T2-M1 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction linéaire de  
L/D

$S_{XX}$ (MPa)	31,82
$S_{YY}$ (MPa)	4,43
$S_{ZZ}$ (MPa)	-1,21
$S_{XY}$ (MPa)	4,77
$\Sigma \epsilon^2/N$	2637
a	-0,04
b	0,90

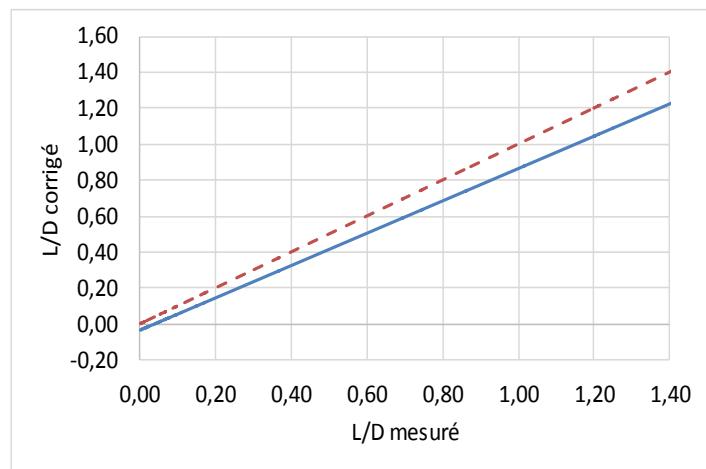


Figure 4.25 : Mesure T2-M1 – Correction linéaire effectuée sur L/D

### Mesure T2-M1 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

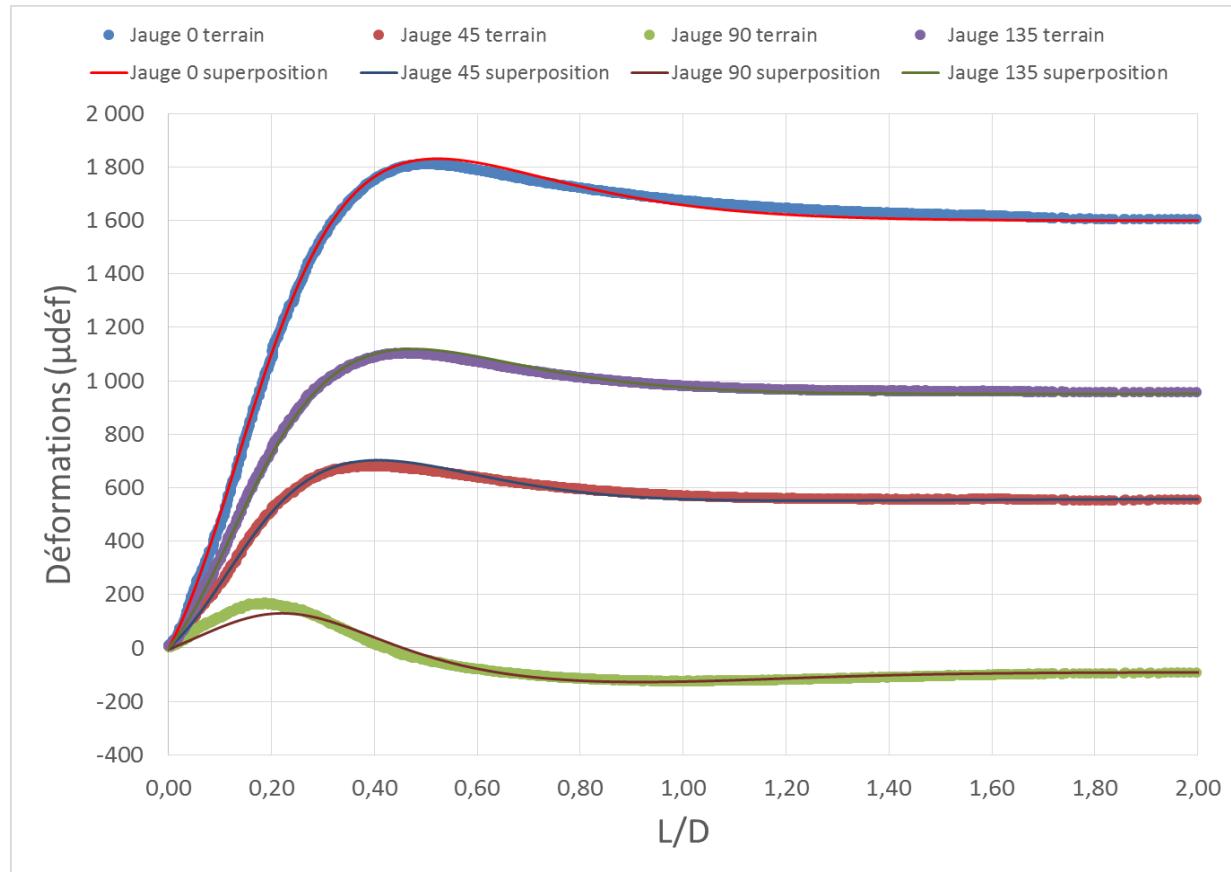


Figure 4.28 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.21 : Mesure T2-M1 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction  
polynomiale de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	33,14
$S_{YY}$ (MPa)	4,98
$S_{ZZ}$ (MPa)	0,15
$S_{XY}$ (MPa)	4,91
$\Sigma \epsilon^2/N$	964
a	-0,01
b	0,60
c	0,56
d	0,00

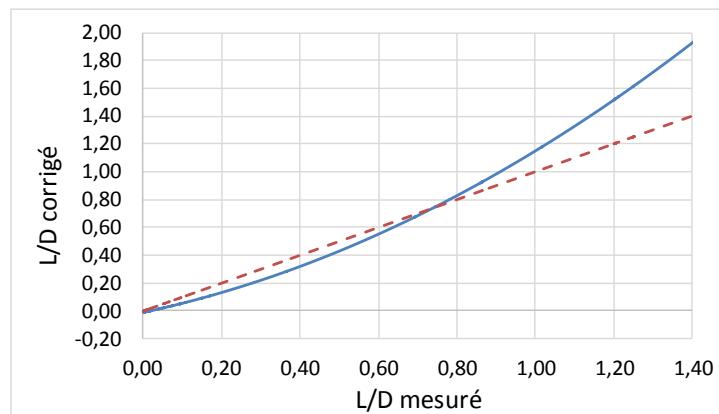


Figure 4.27 : Mesure T2-M1 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

### Mesure T2-M2 : méthode RPR

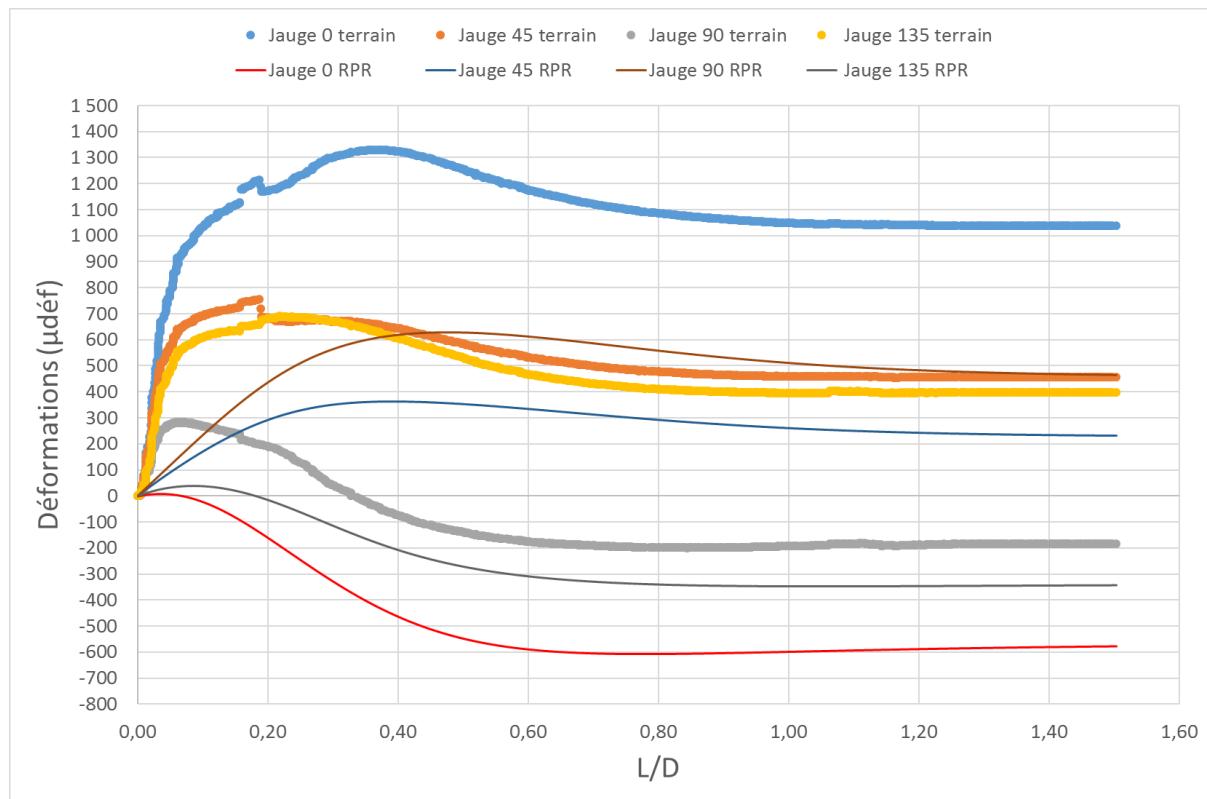


Figure 4.29 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.22 : Mesure T2-M2 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	-1,07
$S_{YY}$ (MPa)	18,22
$S_{ZZ}$ (MPa)	43,03
$S_{XY}$ (MPa)	-3,94
$\Sigma e^2/N$	3 252 077

### Mesure T2-M2 : méthode inverse conventionnelle

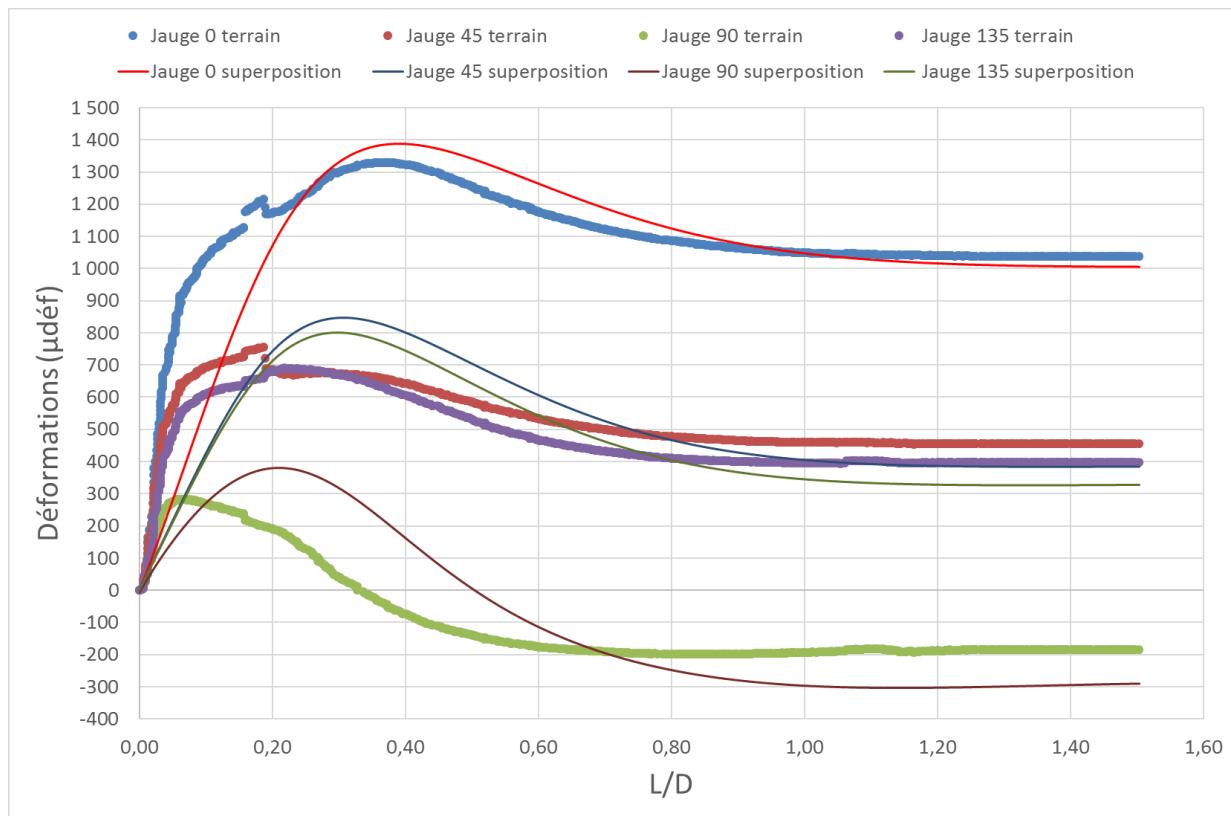


Figure 4.30 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.23 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	54,76
$S_{YY}$ (MPa)	30,21
$S_{ZZ}$ (MPa)	83,17
$S_{XY}$ (MPa)	18,57
$\Sigma e^2/N$	102022

### Mesure T2-M2 : méthode des courbes partielles

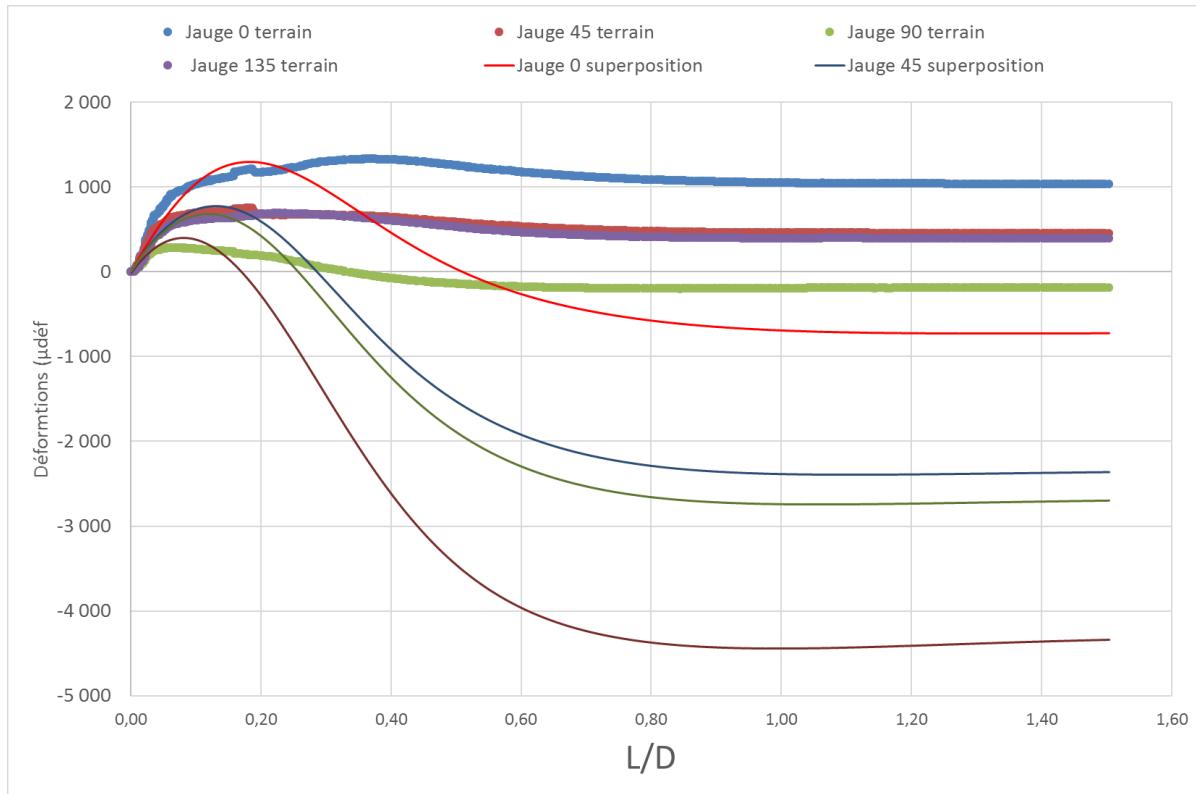


Figure 4.31 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.24 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	105,24
$S_{YY}$ (MPa)	53,74
$S_{ZZ}$ (MPa)	430,08
$S_{XY}$ (MPa)	42,62
$\Sigma e^2/N$	31010

### Mesure T2-M2 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

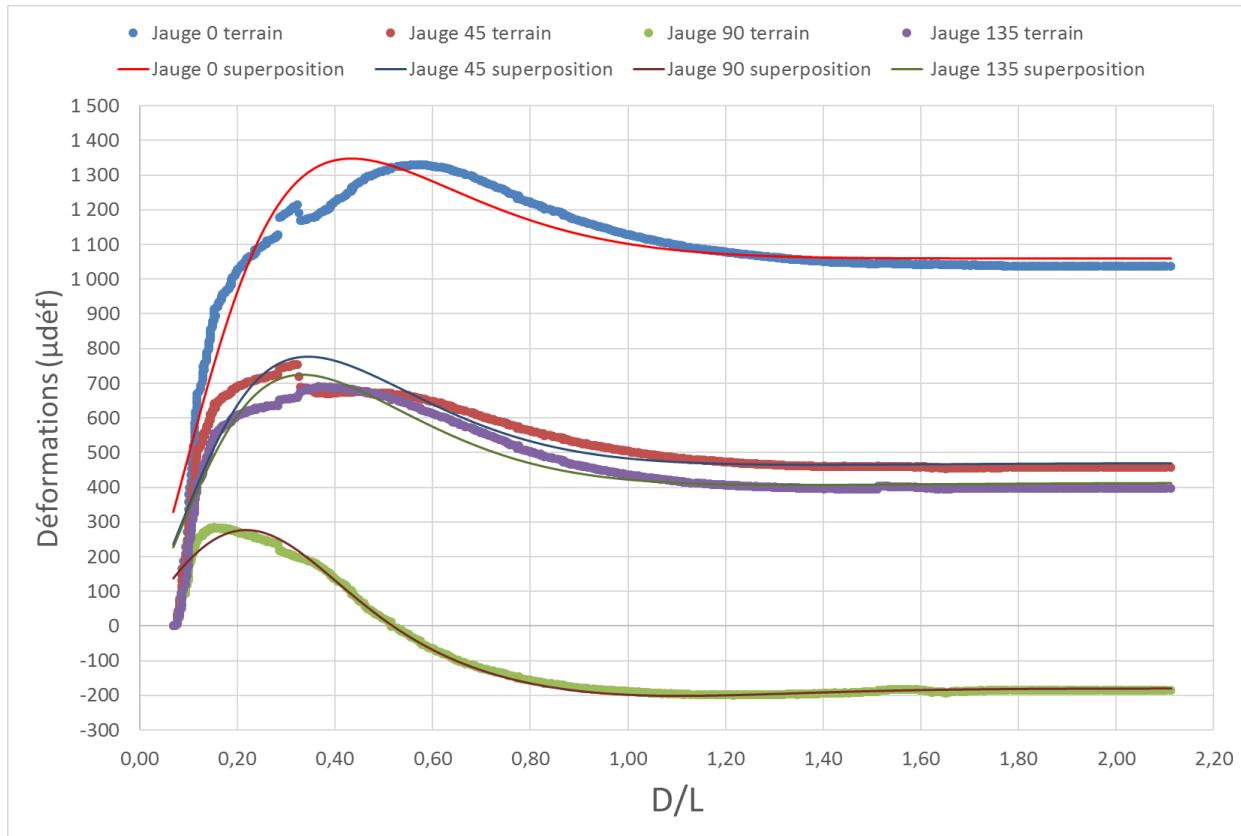


Figure 4.33 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.25 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	45,26
$S_{YY}$ (MPa)	23,14
$S_{ZZ}$ (MPa)	51,20
$S_{XY}$ (MPa)	16,84
$\Sigma e^2/N$	11097
a	0,07
b	1,36

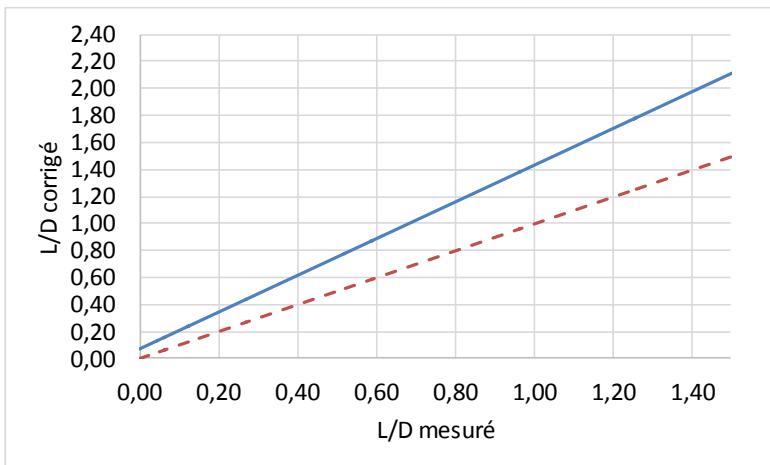


Figure 4.32 : Mesure T2-M2 – Correction linéaire effectuée sur  $L/D$

### Mesure T2-M2 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

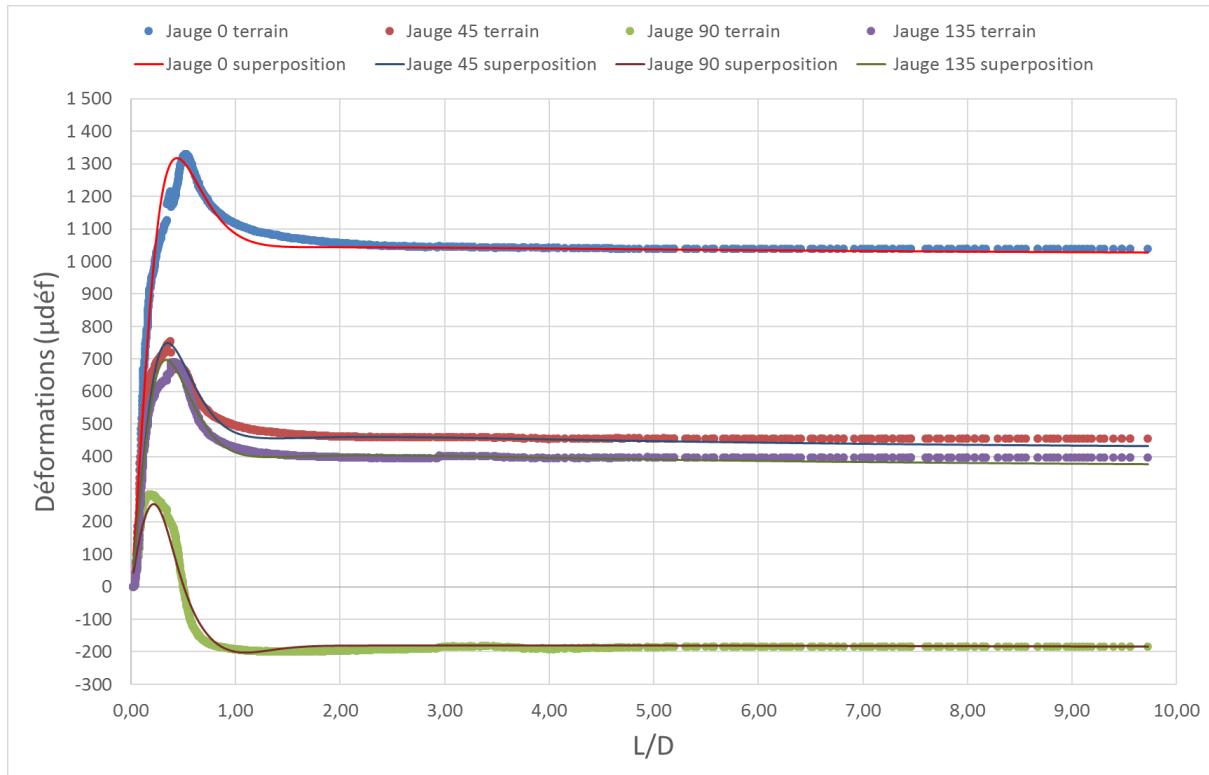


Figure 4.35 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale

Tableau 4.26 : Mesure T2-M2 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction polynomiale  
de L/D

$S_{XX}$ (MPa)	43,40
$S_{YY}$ (MPa)	21,85
$S_{ZZ}$ (MPa)	47,30
$S_{XY}$ (MPa)	16,44
$\Sigma e^2/N$	5437
a	0,02
b	2,83
c	-6,06
d	5,63

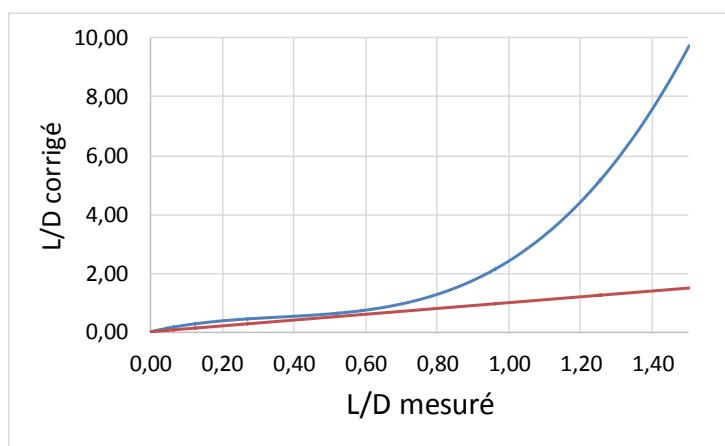


Figure 4.34 : Mesure T2-M2 – Correction polynomiale effectuée sur L/D

## Mesure T2-M3 : méthode RPR

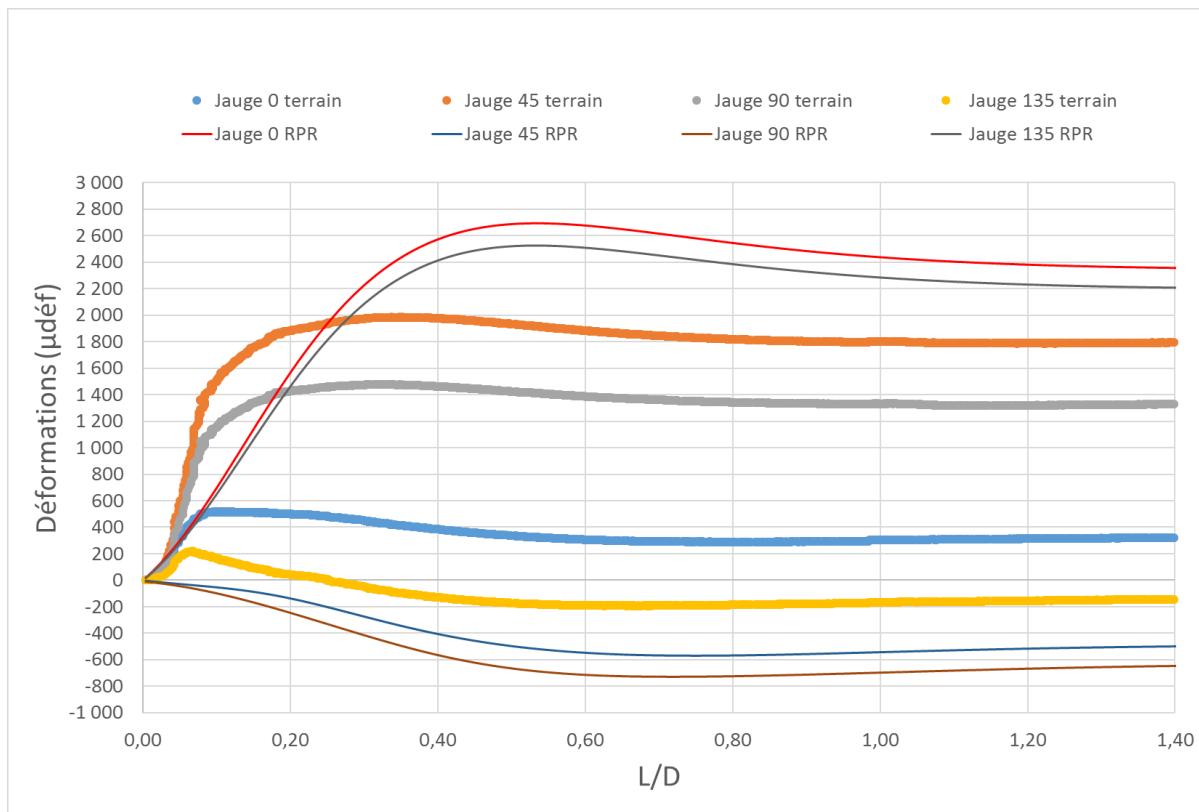


Figure 4.36 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.27 : Mesure T2-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	63,84
$S_{YY}$ (MPa)	16,64
$S_{ZZ}$ (MPa)	-1,64
$S_{XY}$ (MPa)	4,53
$\Sigma e^2/N$	17 186 588

### Mesure T2-M3 : méthode inverse conventionnelle

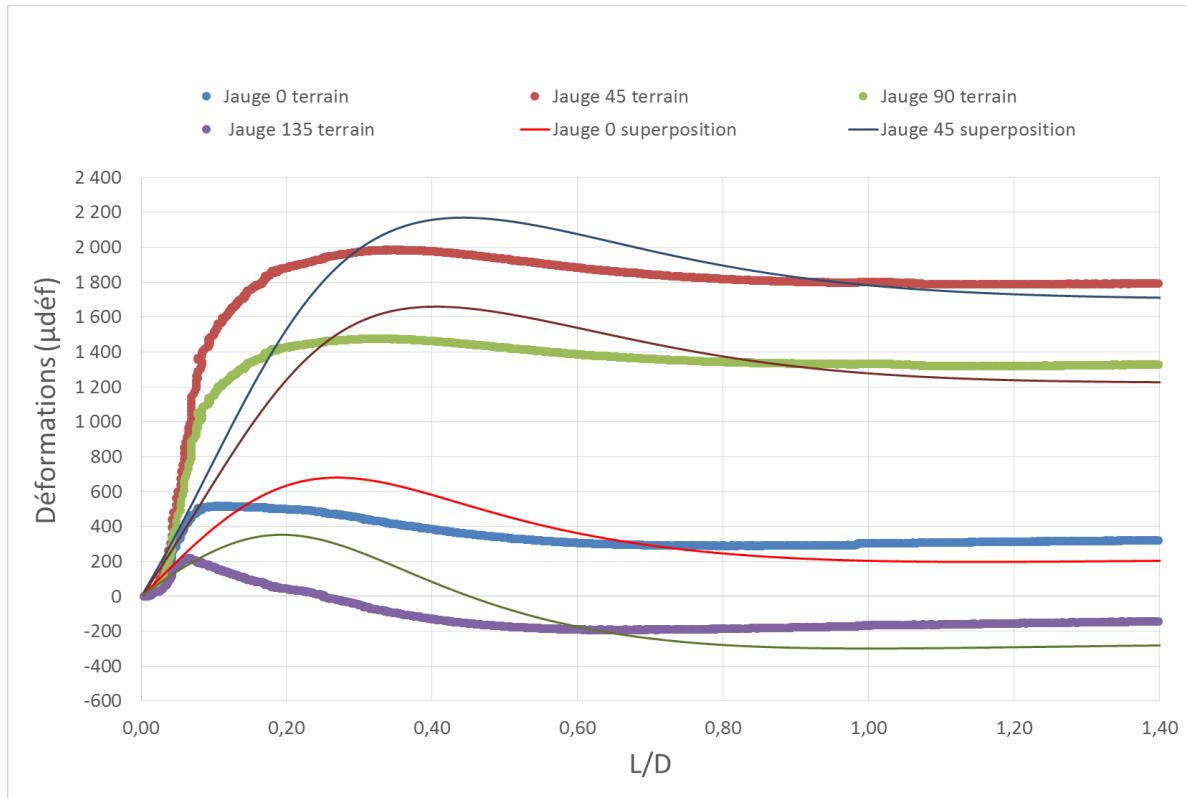


Figure 4.37 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.28 : Mesure T2-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	18,44
$S_{YY}$ (MPa)	56,74
$S_{ZZ}$ (MPa)	64,18
$S_{XY}$ (MPa)	7,81
$\Sigma e^2/N$	157046

### Mesure T2-M3 : méthode des courbes partielles

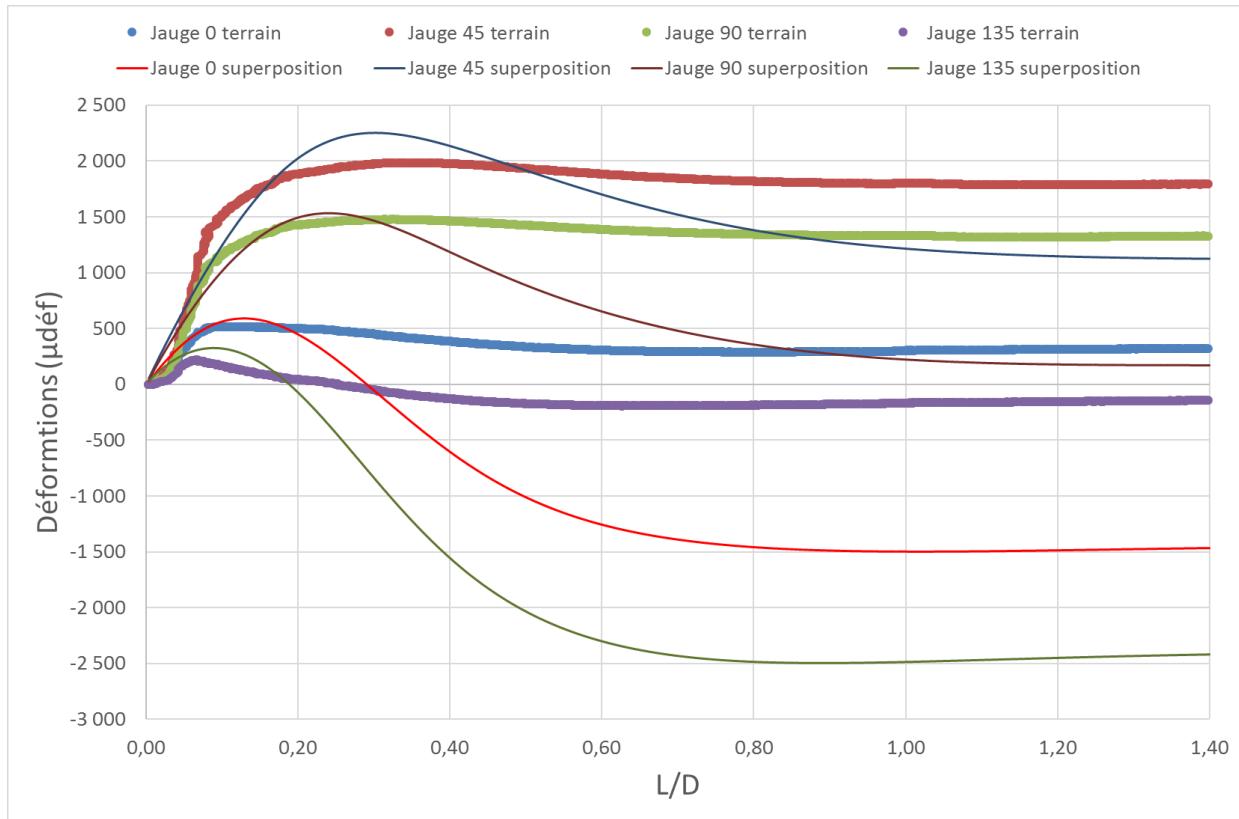


Figure 4.38 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.29 : Mesure T2-M3 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	21,62
$S_{YY}$ (MPa)	89,10
$S_{ZZ}$ (MPa)	226,89
$S_{XY}$ (MPa)	14,22
$\Sigma e^2/N$	66890

### Mesure T2-M3 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

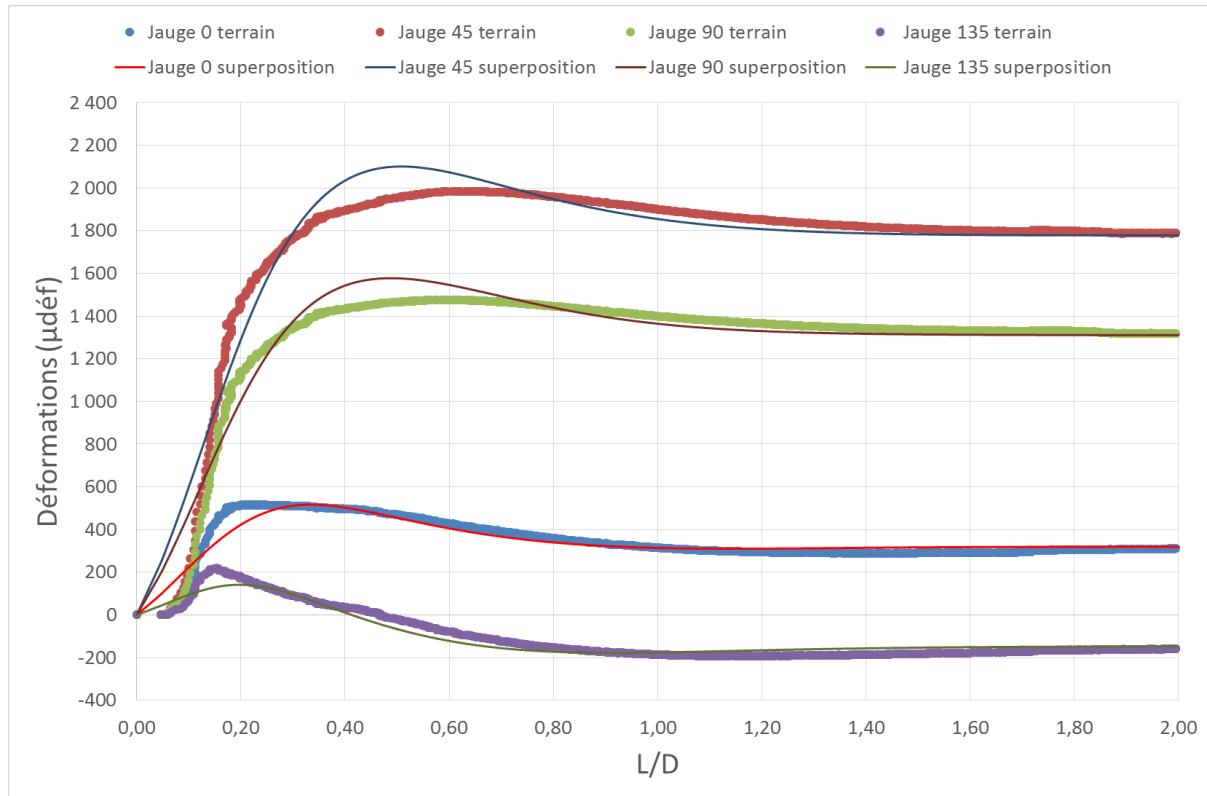


Figure 4.39 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.30 : Mesure T2-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	6,10
$S_{YY}$ (MPa)	44,42
$S_{ZZ}$ (MPa)	18,01
$S_{XY}$ (MPa)	7,11
$\Sigma e^2/N$	10927
a	0,04
b	1,71

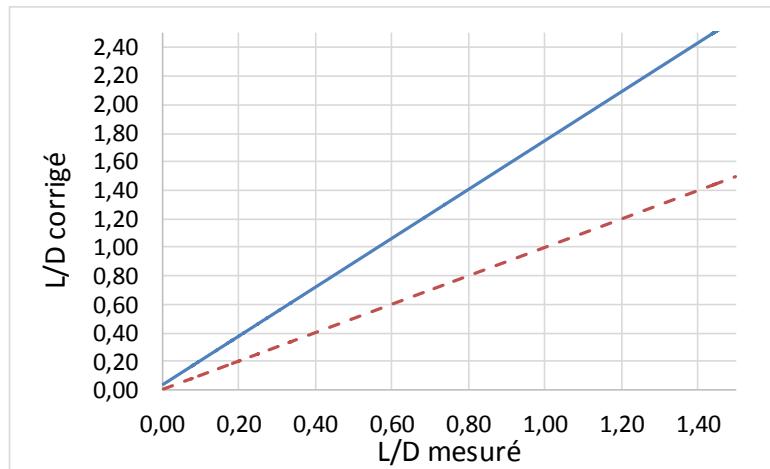


Figure 4.40 : Mesure T2-M3 – Correction linéaire effectuée sur  $L/D$

### Mesure T2-M3 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

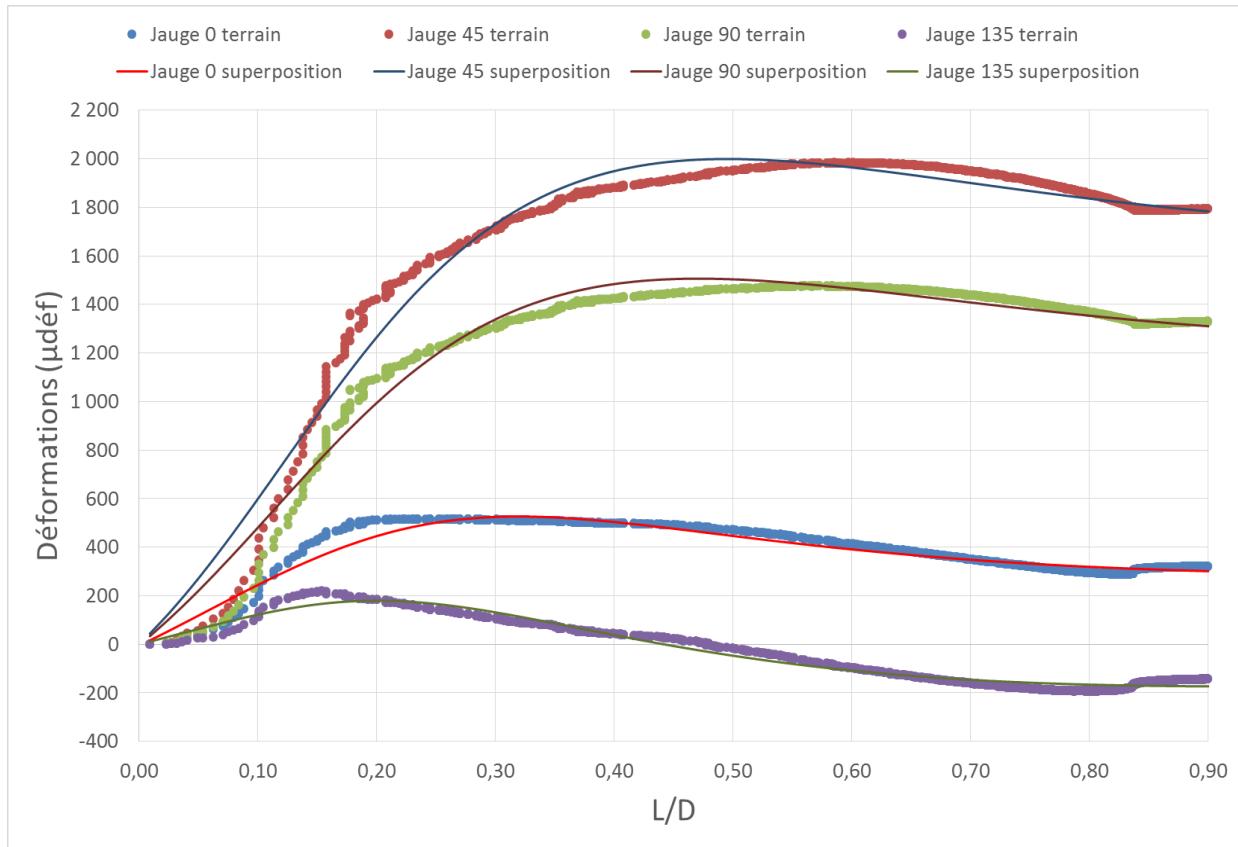


Figure 4.42 : Mesure T2-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.31 : Mesure T2-M3 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction  
polynomiale de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	8,28
$S_{YY}$ (MPa)	44,22
$S_{ZZ}$ (MPa)	25,07
$S_{XY}$ (MPa)	6,85
$\Sigma e^2/N$	4940
a	0,00
b	2,46
c	-2,43
d	0,80

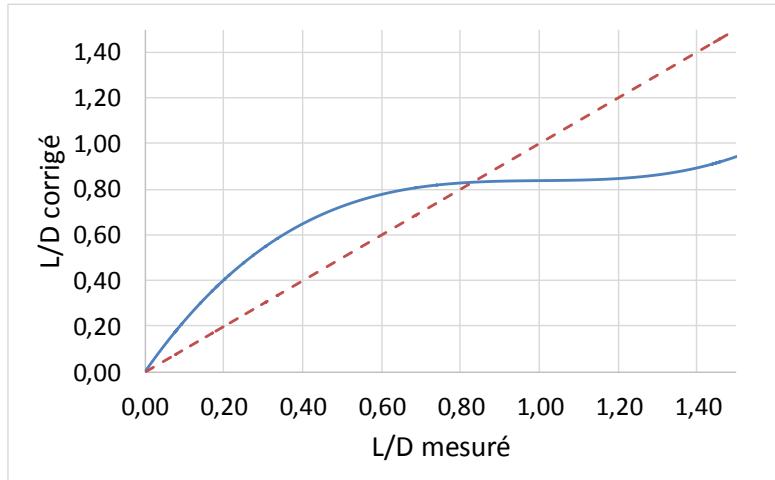


Figure 4.41 : Mesure T2-M3 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

### Mesure T3-M1 : méthode RPR

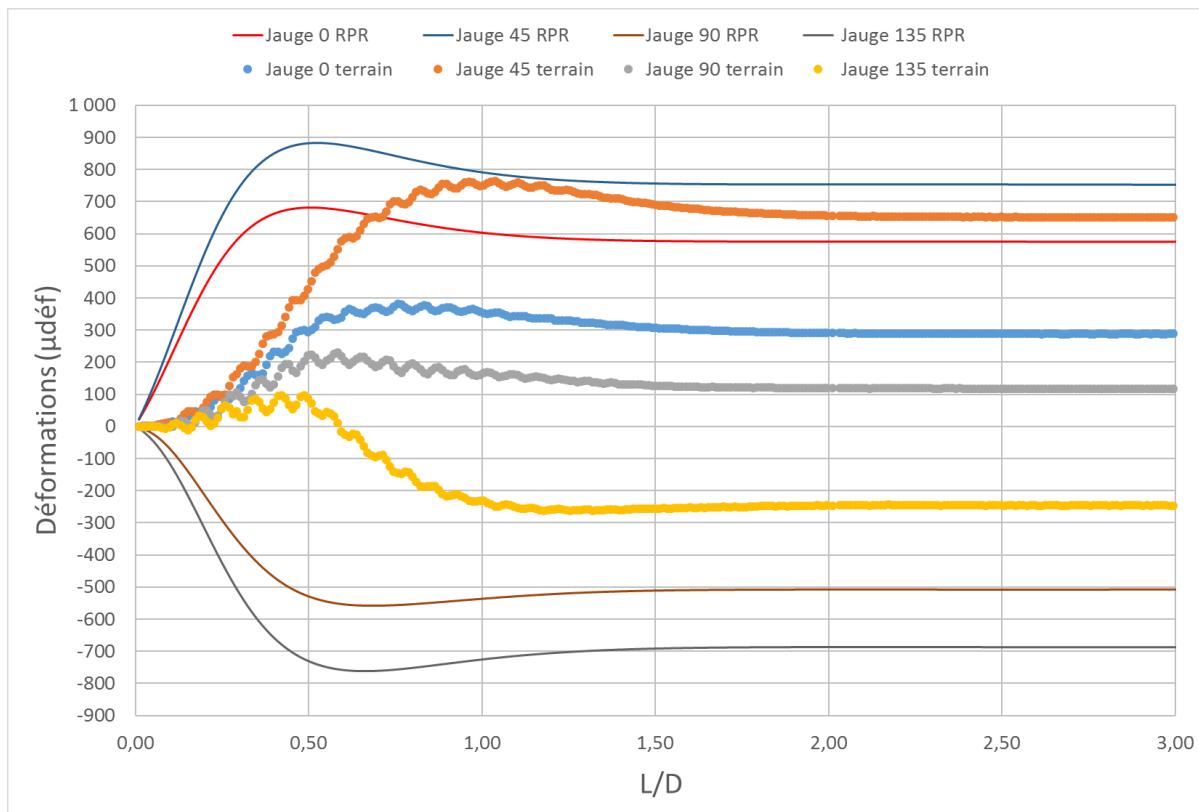


Figure 4.43 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.32 : Mesure T3-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	-10,52
$S_{YY}$ (MPa)	22,60
$S_{ZZ}$ (MPa)	12,13
$S_{XY}$ (MPa)	-4,04
$\Sigma e^2/N$	759 651

### Mesure T3-M1 : méthode inverse conventionnelle

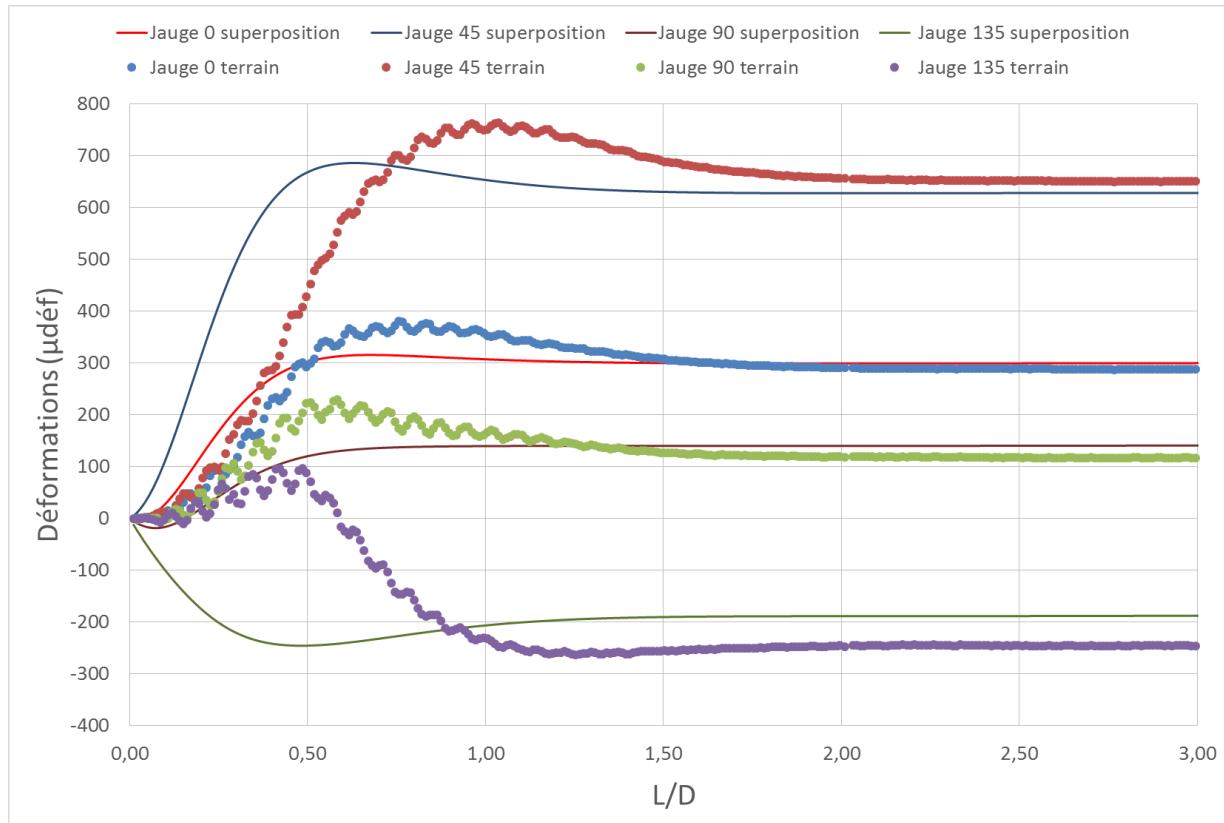


Figure 4.44 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.33 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

S <sub>XX</sub> (MPa)	-6,14
S <sub>YY</sub> (MPa)	5,81
S <sub>ZZ</sub> (MPa)	-16,43
S <sub>XY</sub> (MPa)	-5,02
$\Sigma e^2/N$	27495

### Mesure T3-M1 : méthode des courbes partielles

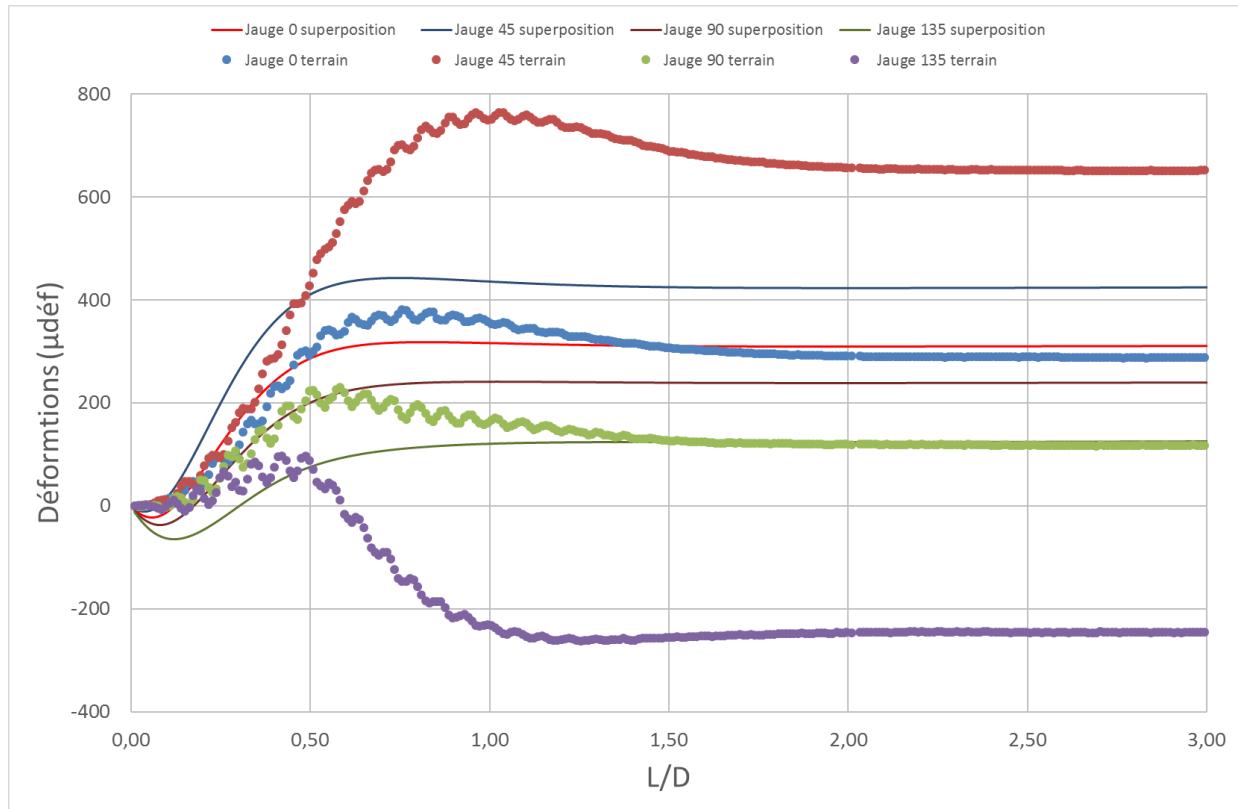


Figure 4.45 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.34 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	-5,07
$S_{YY}$ (MPa)	-0,60
$S_{ZZ}$ (MPa)	-27,41
$S_{XY}$ (MPa)	-1,81
$\Sigma e^2/N$	11597

### Mesure T3-M1 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

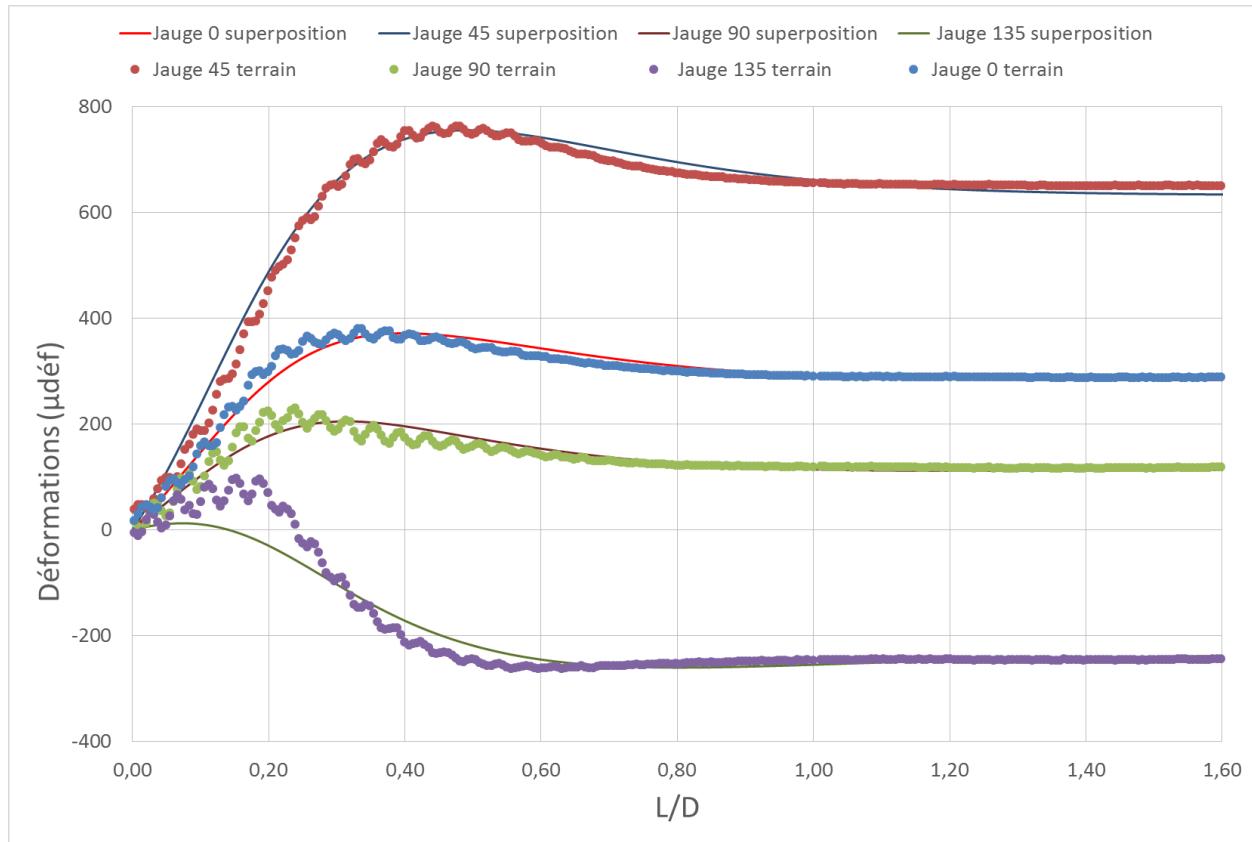


Figure 4.47 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.35 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	2,97
$S_{YY}$ (MPa)	16,33
$S_{ZZ}$ (MPa)	11,90
$S_{XY}$ (MPa)	-5,10
$\Sigma e^2/N$	1674
a	-0,07
b	0,53

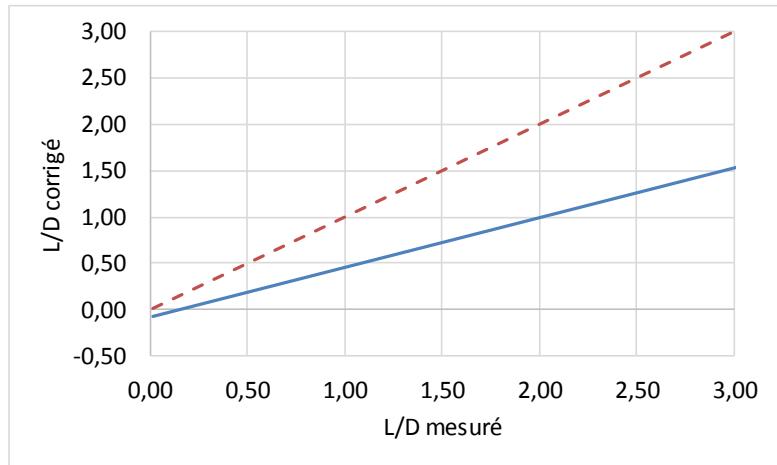


Figure 4.46 : Mesure T3-M1 – Correction linéaire effectuée sur  $L/D$

### Mesure T3-M1 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

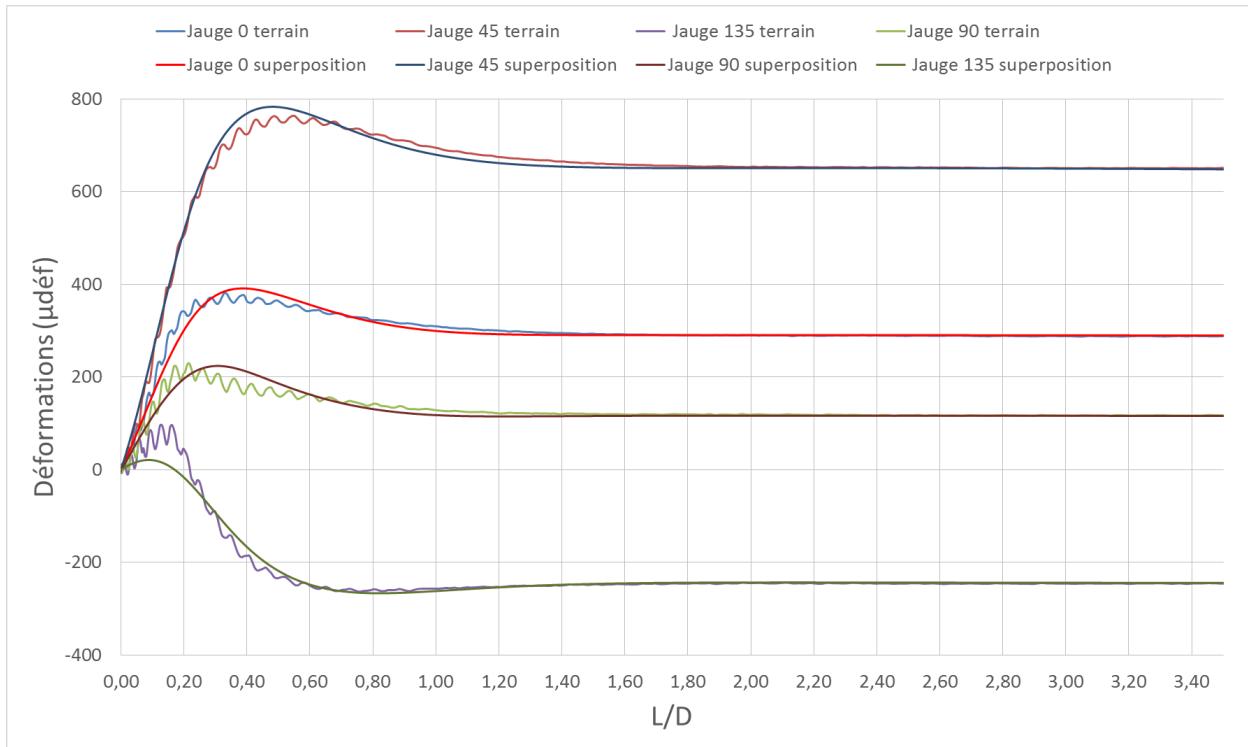


Figure 4.48 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D

Tableau 4.36 : Mesure T3-M1 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction  
polynomiale de L/D

$S_{XX}$ (MPa)	3,86
$S_{YY}$ (MPa)	17,62
$S_{ZZ}$ (MPa)	14,47
$S_{XY}$ (MPa)	-5,22
$\Sigma e^2/N$	885
a	-0,02
b	0,21
c	0,32
d	0,00

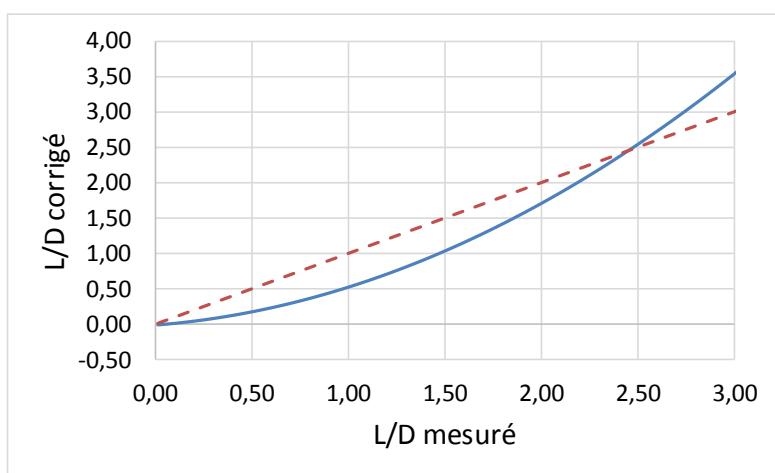


Figure 4.49 : Mesure T3-M1 – Correction polynomiale  
effectuée sur L/D

### Mesure T3-M2 : méthode RPR

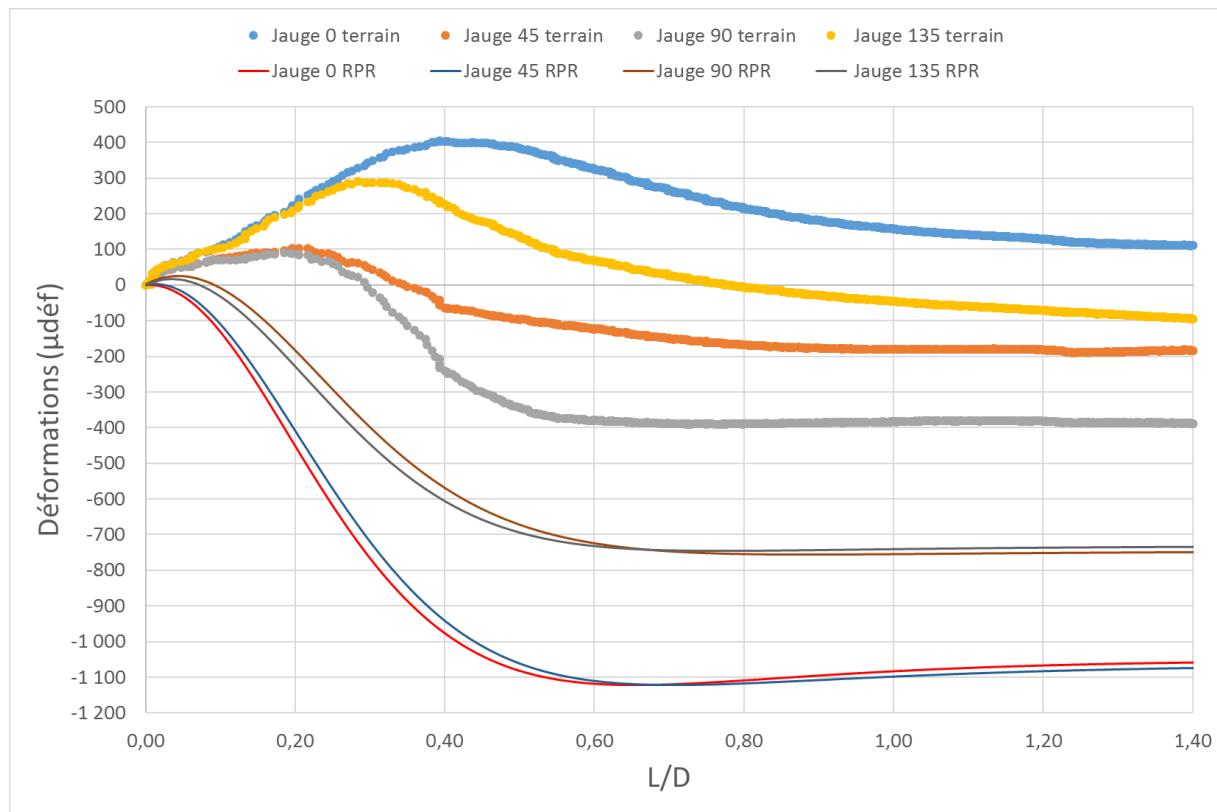


Figure 4.50 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.37 : Mesure T3-M2 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	-8,12
$S_{YY}$ (MPa)	0,43
$S_{ZZ}$ (MPa)	45,86
$S_{XY}$ (MPa)	-0,12
$\Sigma e^2/N$	2 970 411

### Mesure T3-M2 : méthode inverse conventionnelle

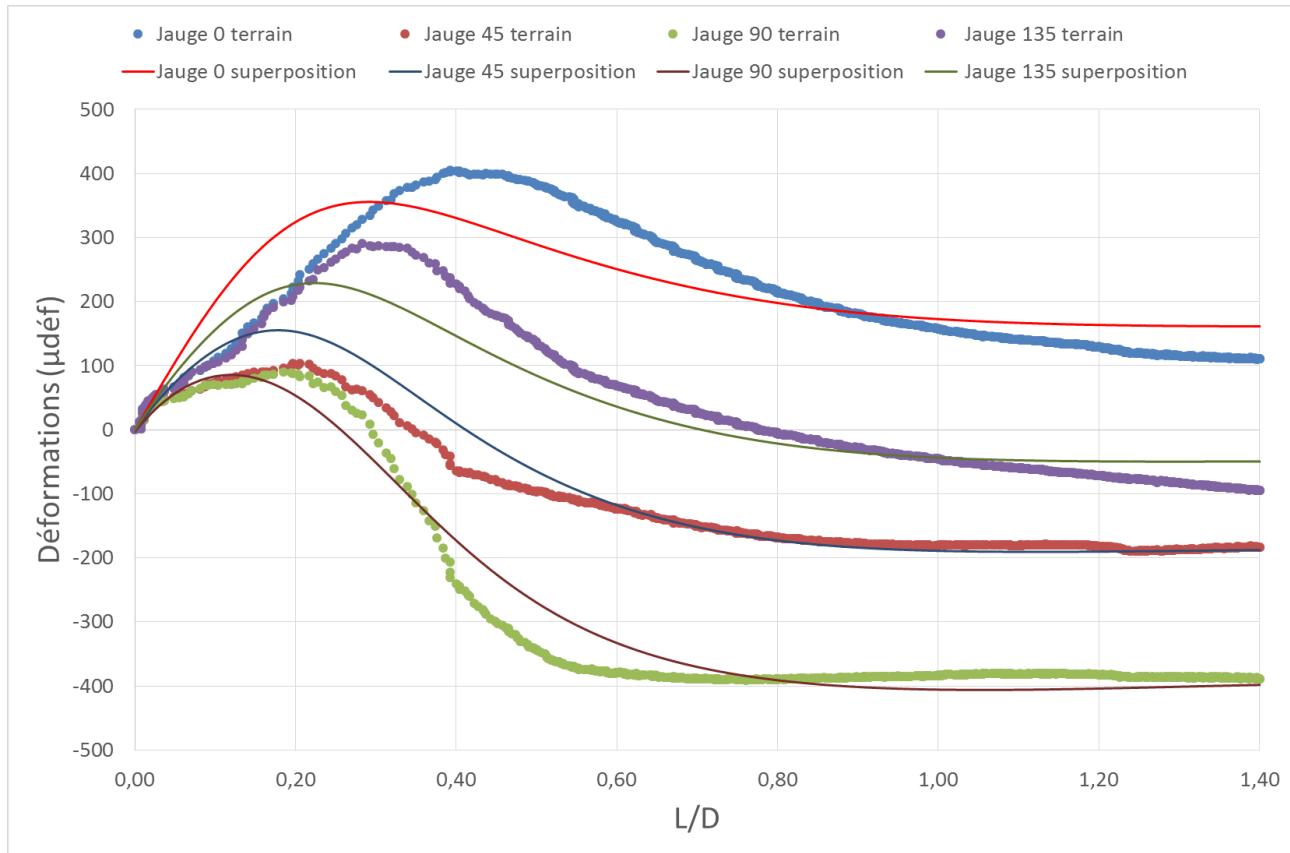


Figure 4.51 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.38 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	15,45
$S_{YY}$ (MPa)	4,81
$S_{ZZ}$ (MPa)	33,96
$S_{XY}$ (MPa)	2,45
$\Sigma e^2/N$	4431

### Mesure T3-M2 : méthode des courbes partielles

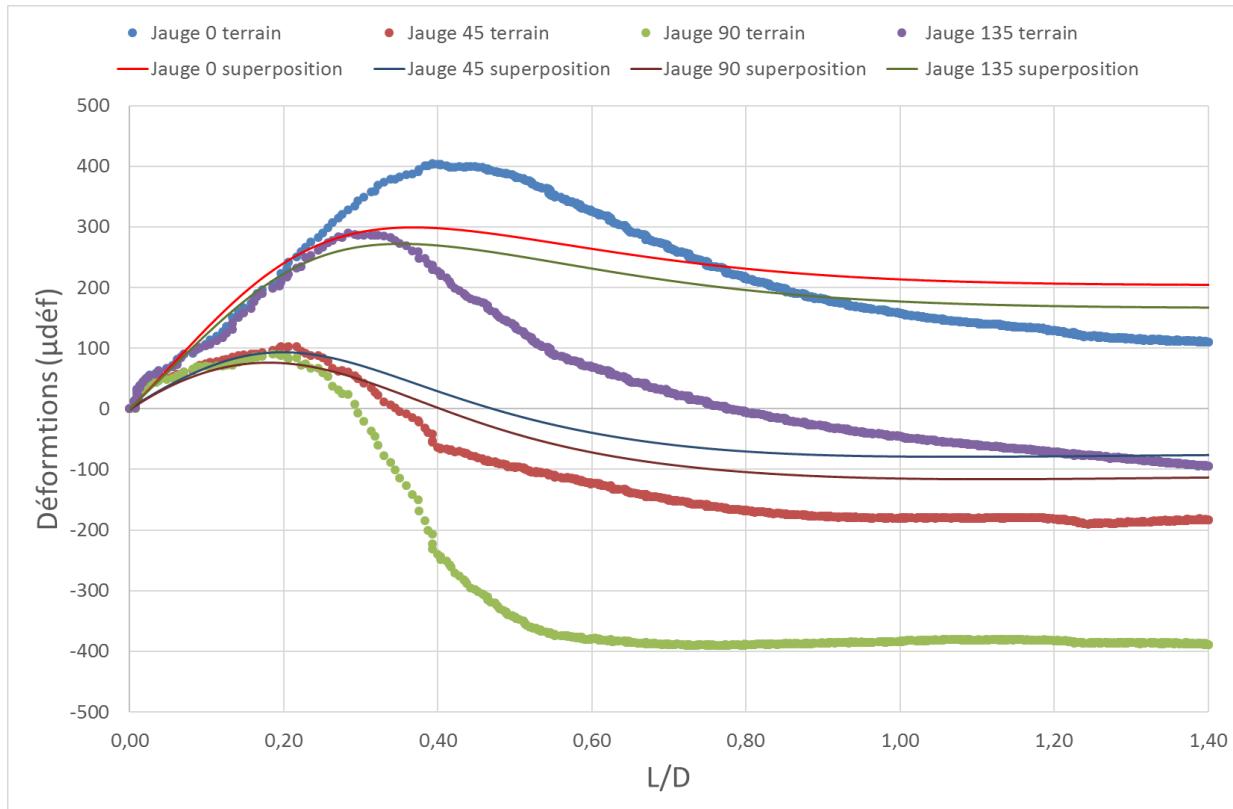


Figure 4.52 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.39 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	10,53
$S_{YY}$ (MPa)	2,80
$S_{ZZ}$ (MPa)	15,19
$S_{XY}$ (MPa)	0,62
$\Sigma e^2/N$	968

### Mesure T3-M2 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

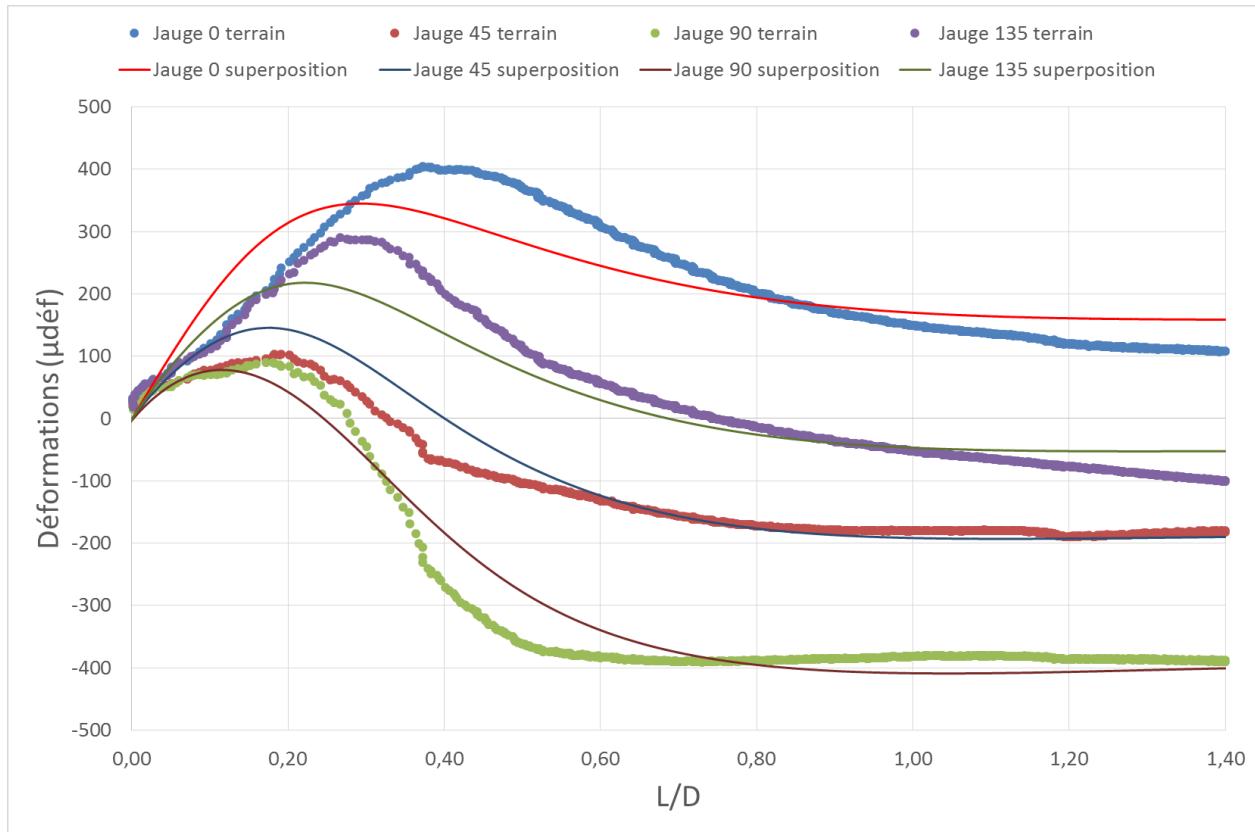


Figure 4.54 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.40 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	14,94
$S_{YY}$ (MPa)	4,46
$S_{ZZ}$ (MPa)	32,80
$S_{XY}$ (MPa)	2,40
$\Sigma e^2/N$	4304
a	-0,01
b	0,97

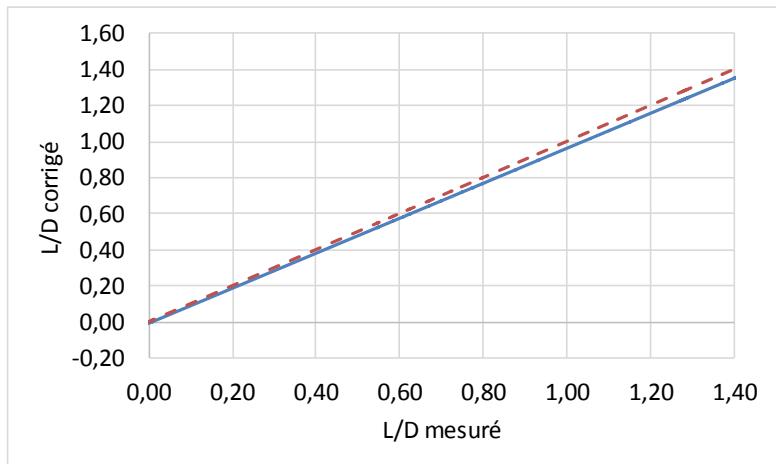


Figure 4.53 : Mesure T3-M2 – Correction linéaire effectuée sur  $L/D$

### Mesure T3-M2 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

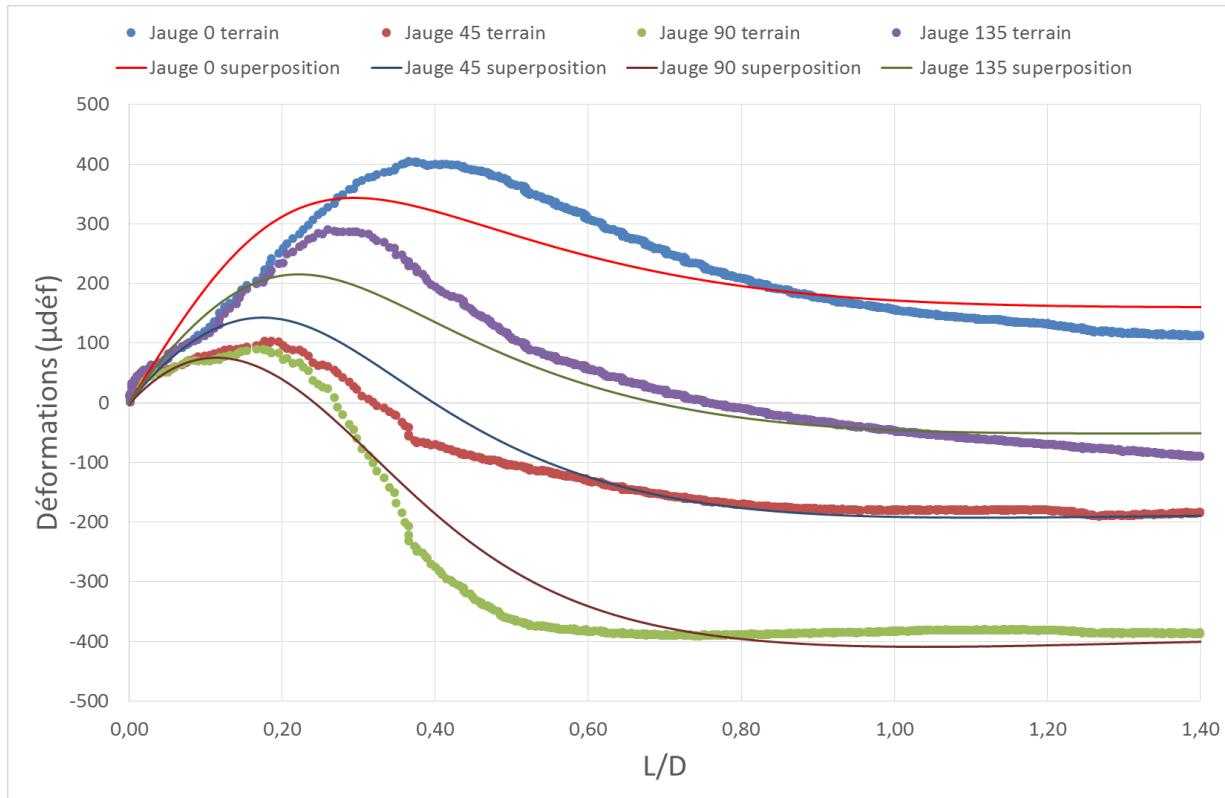


Figure 4.56 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D

Tableau 4.41 : Mesure T3-M2 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction  
polynomiale de L/D

$S_{XX}$ (MPa)	14,80
$S_{YY}$ (MPa)	4,34
$S_{ZZ}$ (MPa)	32,34
$S_{XY}$ (MPa)	2,39
$\Sigma e^2/N$	4284
a	0,00
b	0,91
c	0,09
d	0,00

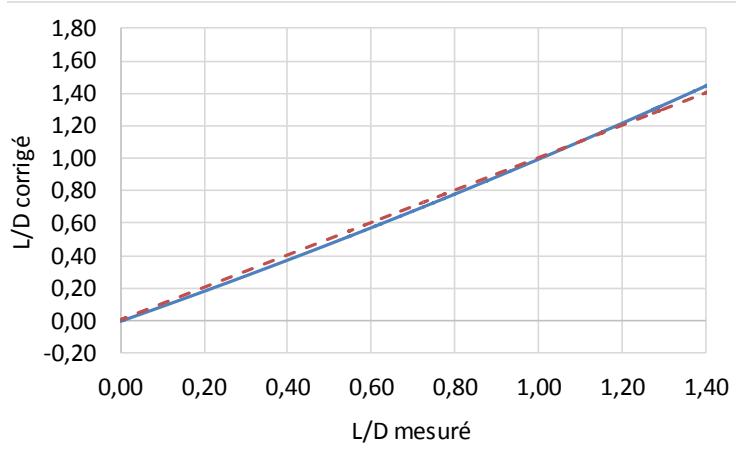


Figure 4.55 : Mesure T3-M2 – Correction polynomiale effectuée sur L/D

### Mesure T3-M3 : méthode RPR

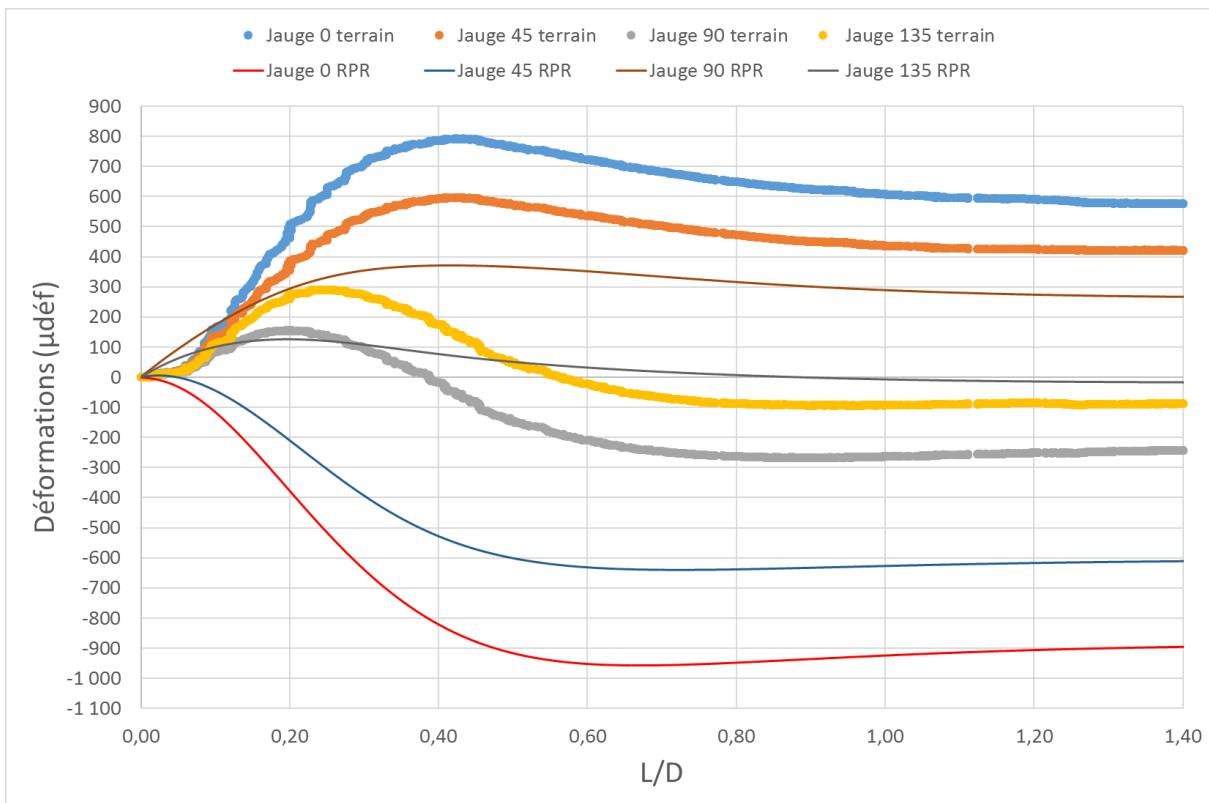


Figure 4.57 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.42 : Mesure T3-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	13,86
$S_{YY}$ (MPa)	-6,76
$S_{ZZ}$ (MPa)	29,50
$S_{XY}$ (MPa)	-1,87
$\Sigma e^2/N$	3 156 942

### Mesure T3-M3 : méthode inverse conventionnelle

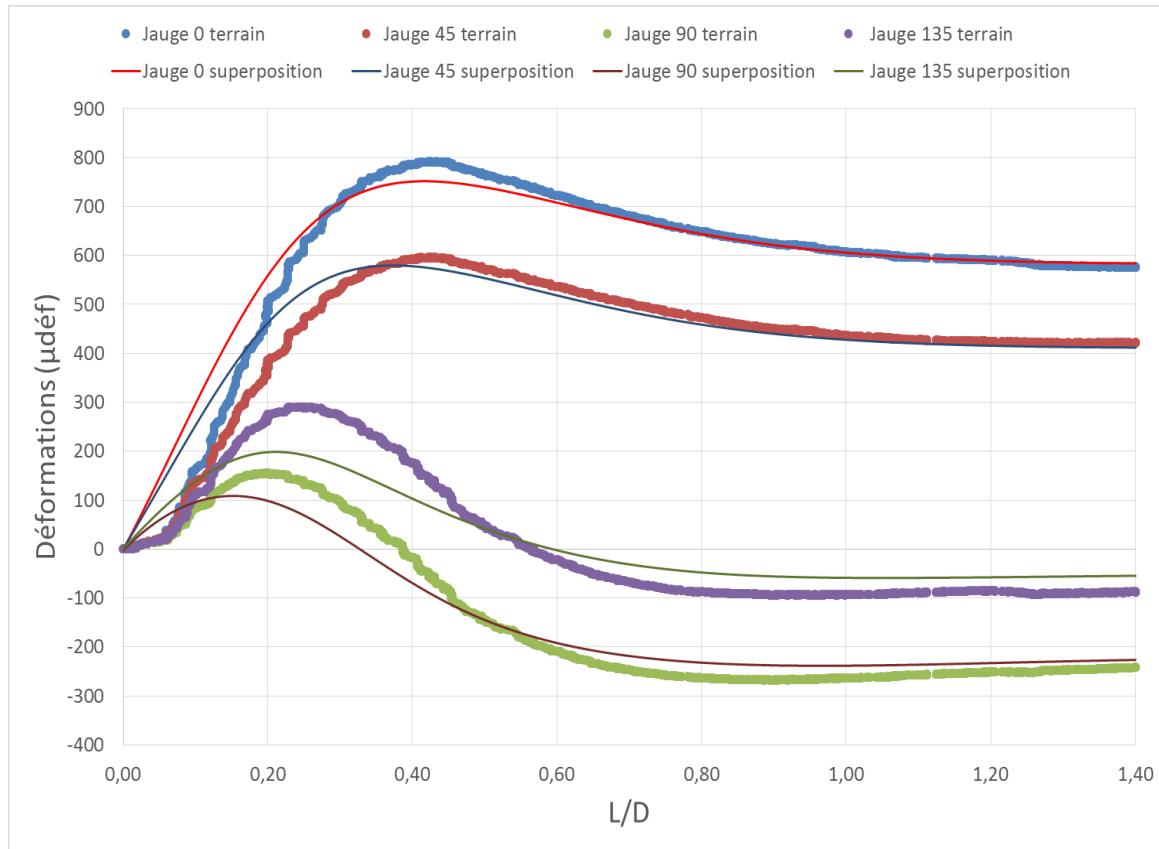


Figure 4.58 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.43 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	9,54
$S_{YY}$ (MPa)	20,94
$S_{ZZ}$ (MPa)	26,13
$S_{XY}$ (MPa)	-5,66
$\Sigma e^2/N$	9238

### Mesure T3-M3 : méthode des courbes partielles

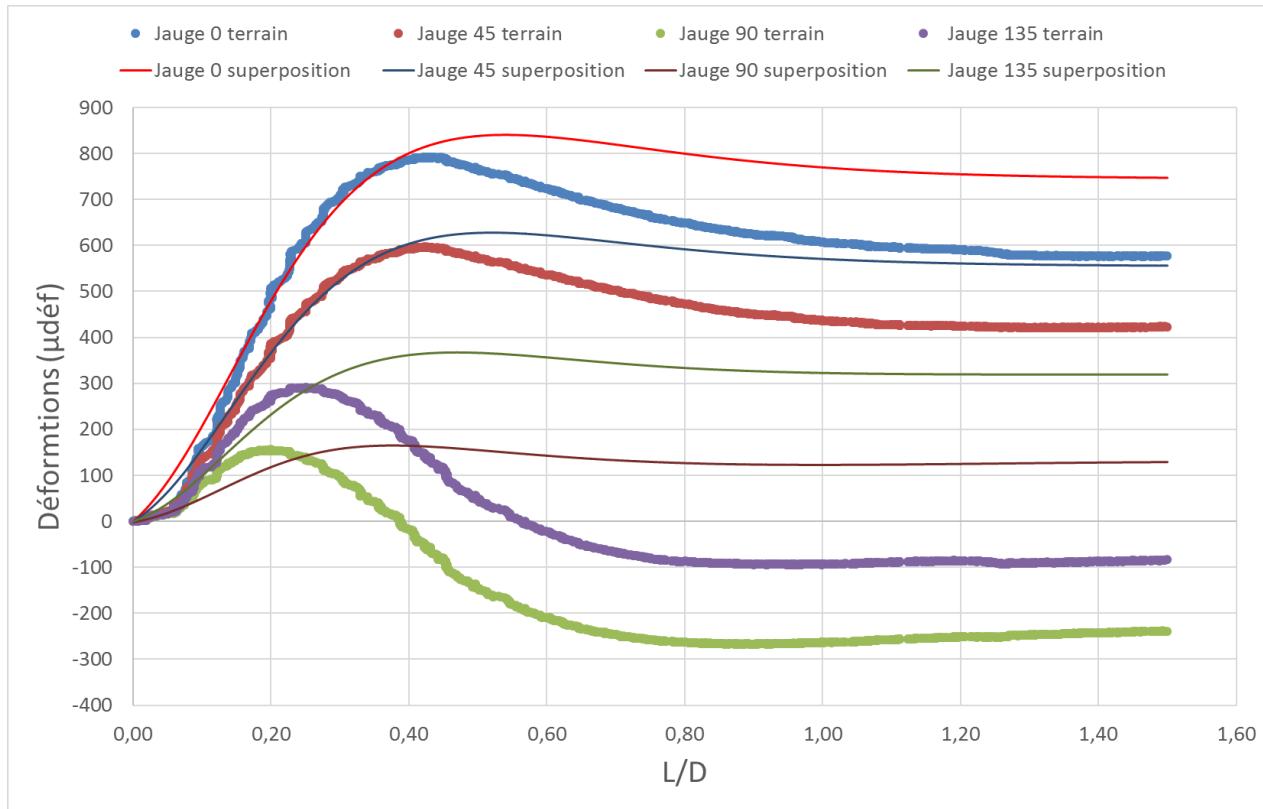


Figure 4.59 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.44 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	3,93
$S_{YY}$ (MPa)	13,13
$S_{ZZ}$ (MPa)	-6,22
$S_{XY}$ (MPa)	-3,40
$\Sigma e^2/N$	4301

### Mesure T3-M3 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

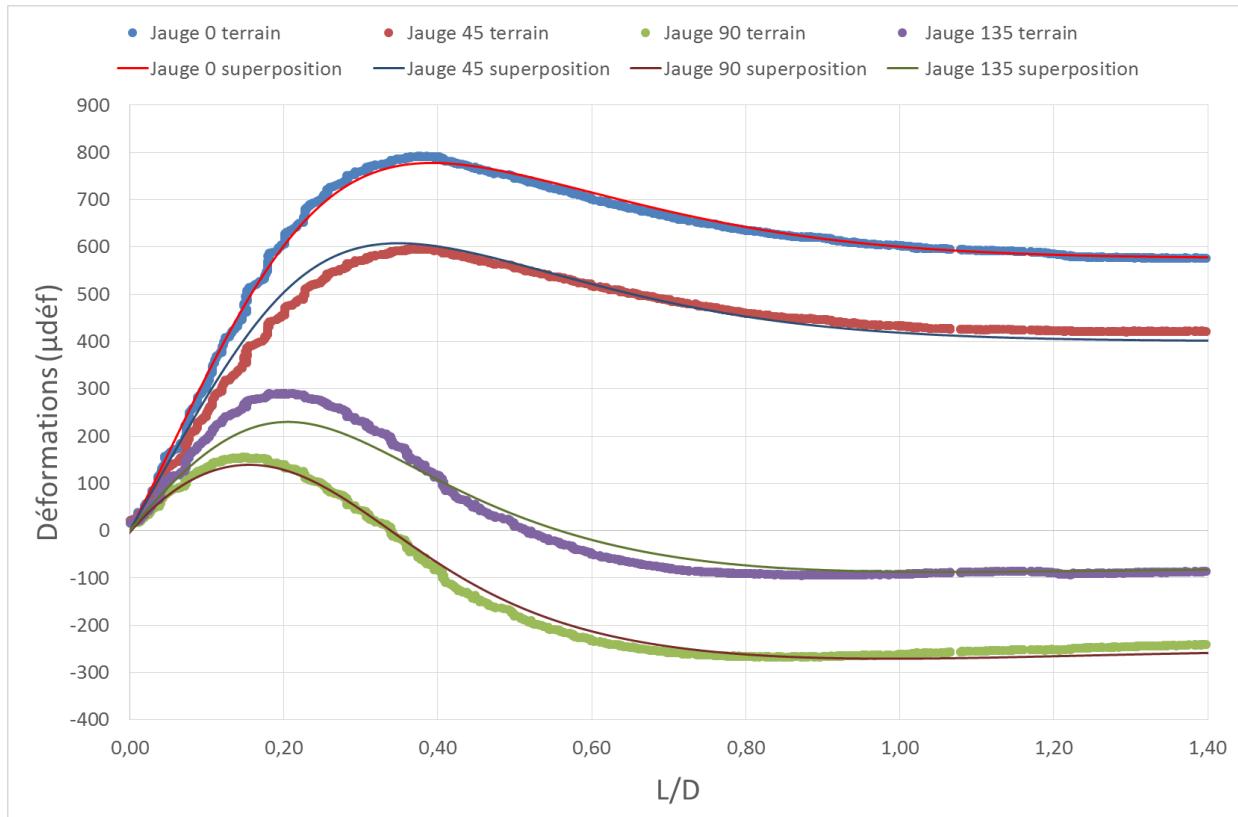


Figure 4.60 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D

Tableau 4.45 : Mesure T3-M3 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction linéaire  
de L/D

$S_{XX}$ (MPa)	11,75
$S_{YY}$ (MPa)	23,62
$S_{ZZ}$ (MPa)	33,36
$S_{XY}$ (MPa)	-5,89
$\Sigma e^2/N$	1915
a	-0,05
b	1,00

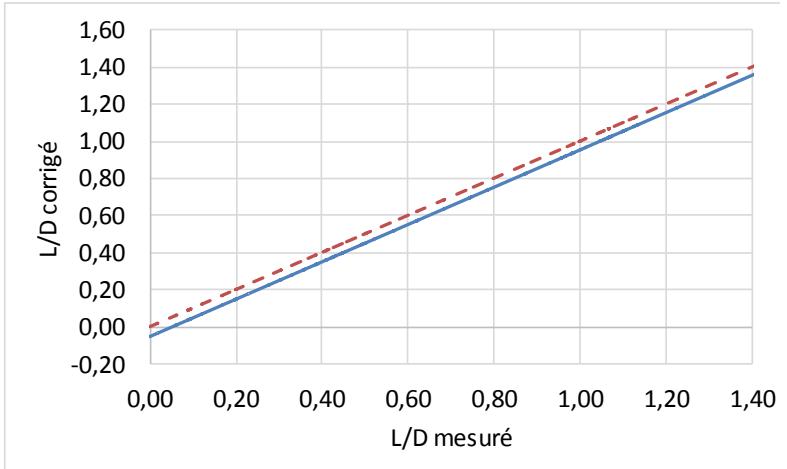


Figure 4.61 : Mesure T3-M3 – Correction linéaire effectuée  
sur L/D

### Mesure T3-M3 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

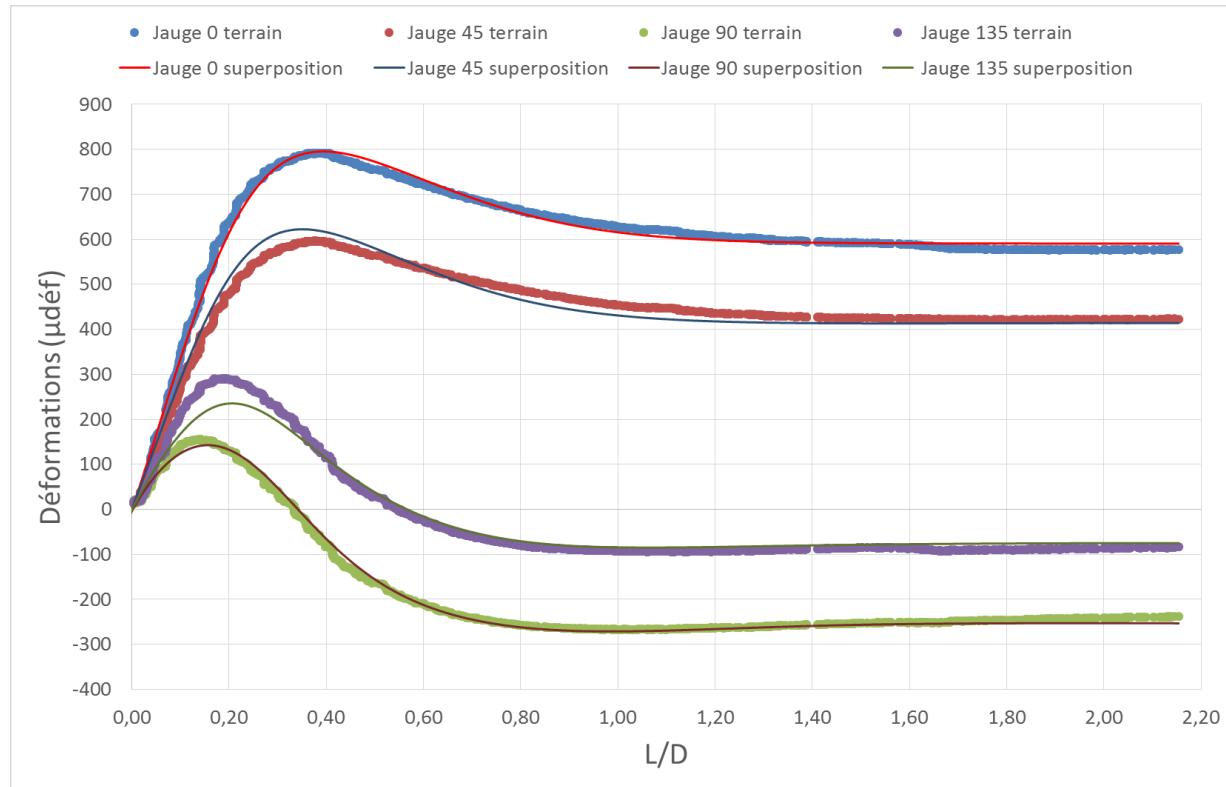


Figure 4.63 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.46 : Mesure T3-M3 -  
Contraintes estimées de la méthode  
inverse avec une correction  
polynomiale de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	11,96
$S_{YY}$ (MPa)	24,04
$S_{ZZ}$ (MPa)	33,70
$S_{XY}$ (MPa)	-6,00
$\Sigma e^2/N$	1479
a	-0,03
b	0,76
c	0,46
d	0,00

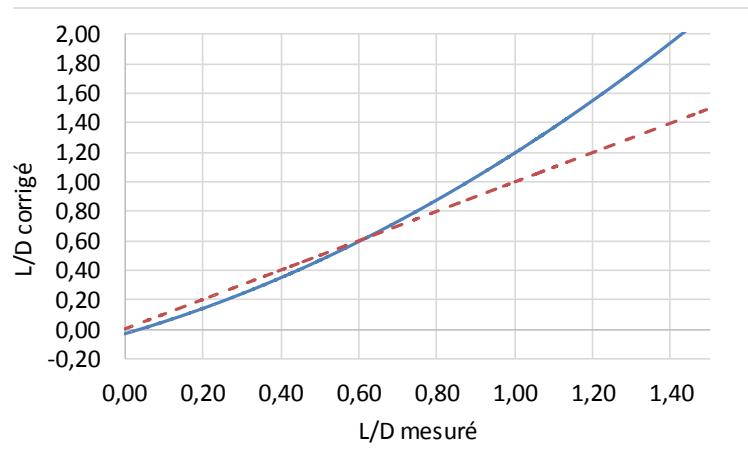


Figure 4.62 : Mesure T3-M3 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

Puisque les vraies composantes sont inconnues, les valeurs trouvées selon chaque méthode d'interprétation appliquée sont montrées sur les figures 4.64 à 4.67. Il est possible de vérifier la valeur des composantes par méthode d'interprétation dans chacun des forages. Théoriquement, les composantes trouvées avec chaque mesure d'un même forage devraient donner la même valeur. Les tableaux E.1 à E.4 situés en annexe ont permis de créer ces figures.

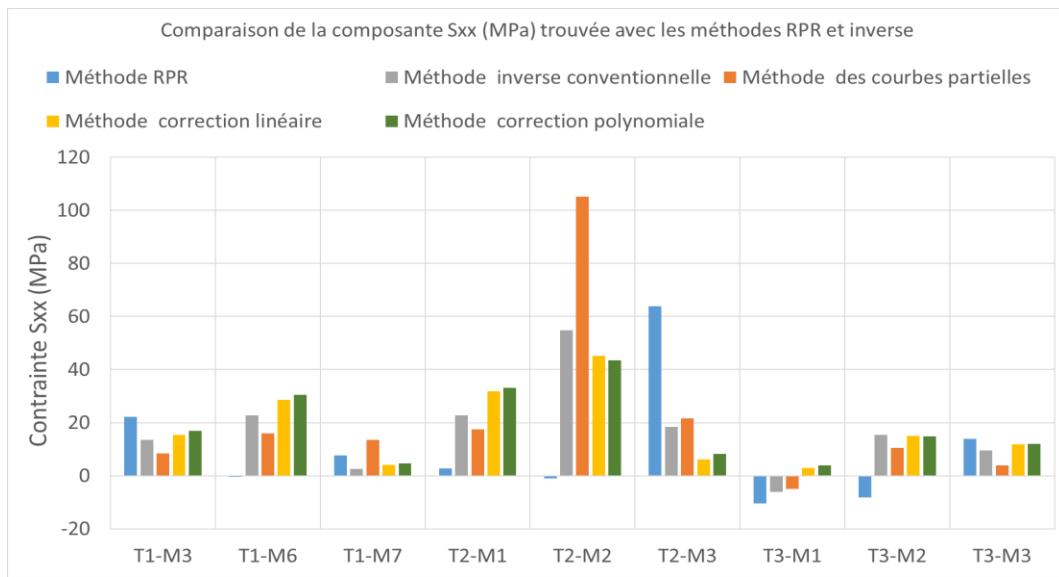


Figure 4.64 : Comparaison de la composante Sxx trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Alpha

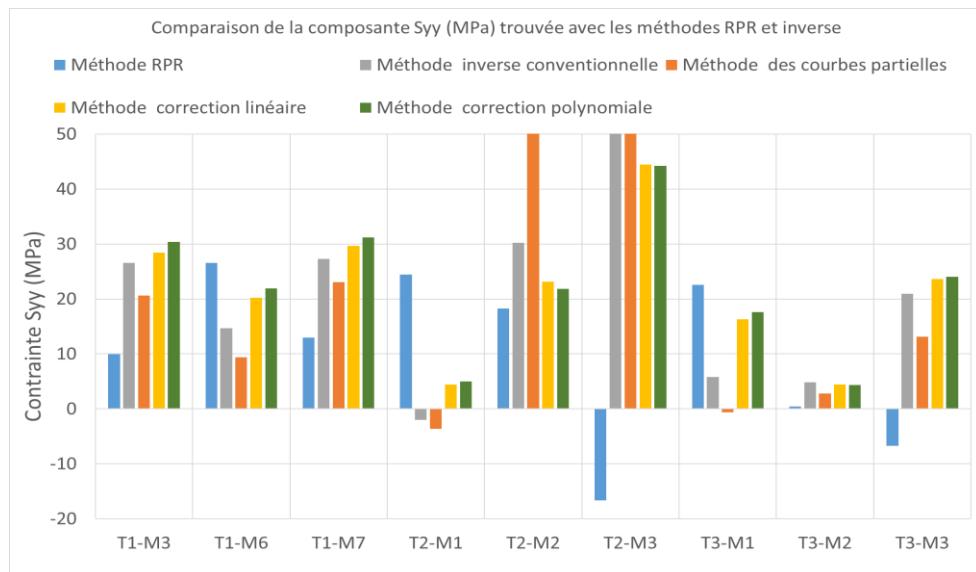


Figure 4.65 : Comparaison de la composante Syy trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Alpha

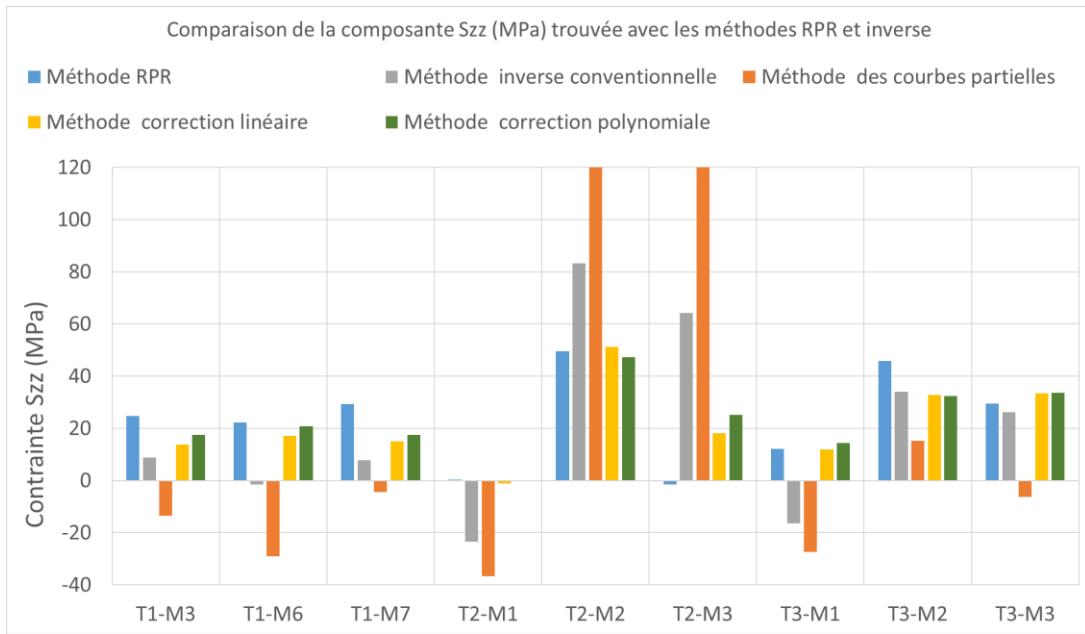


Figure 4.66 : Comparaison de la composante Szz trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Alpha

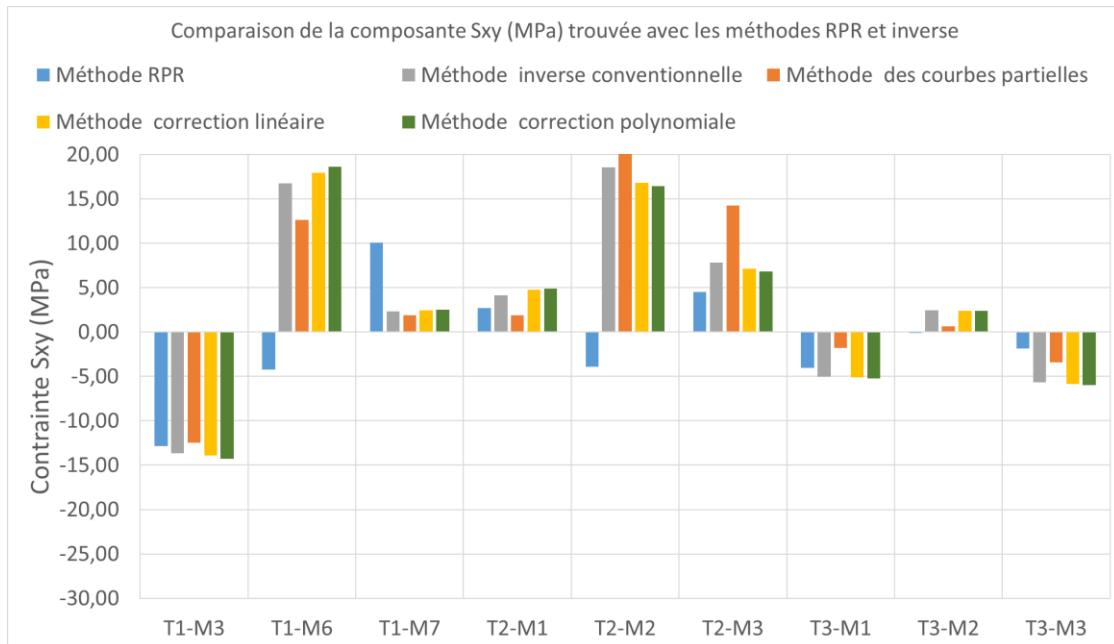


Figure 4.67 : Comparaison de la composante Sxy trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Alpha

En analysant les quatre figures précédentes, il semble que la correction de l'avancement ait un effet important sur les tenseurs. Pour les mesures dans les trous 1 et 3, les méthodes inverse avec

correction de l'avancement montrent que les contraintes dans un même trou sont relativement similaires d'une mesure à l'autre.

La figure 4.68 montre les résidus normalisés entre les courbes de terrain et estimées par méthode d'interprétation. La figure 4.69 est la même que la figure précédente mais cette fois sans les résidus normalisés de la méthode RPR. Le tableau D.5 contient les valeurs par mesure afin de créer ces figures.

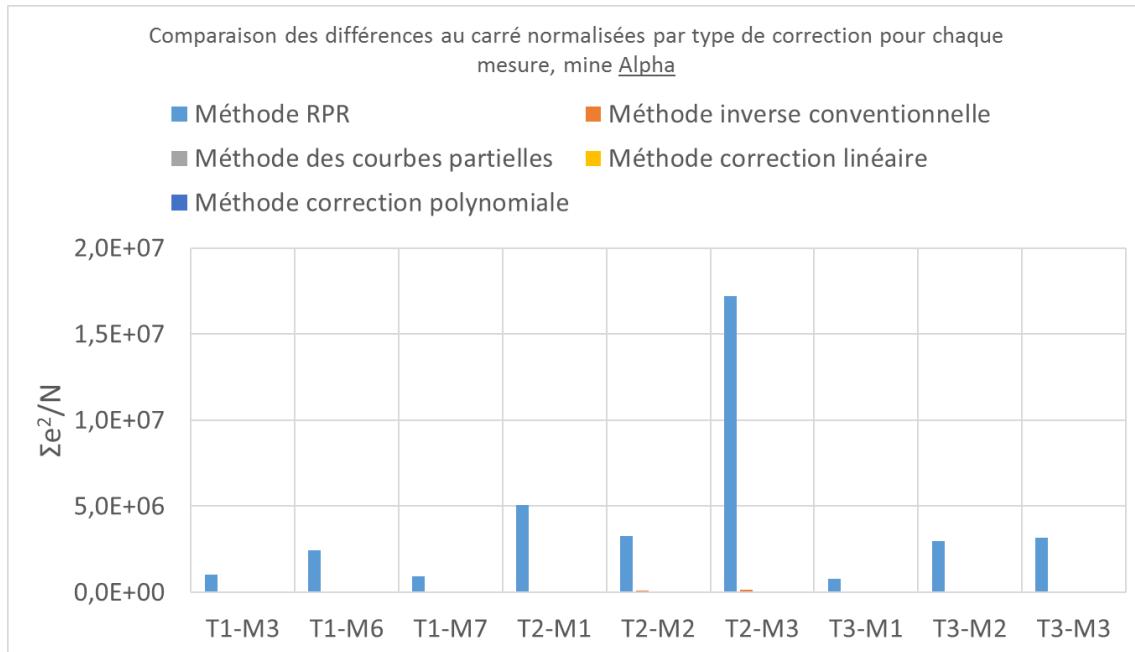


Figure 4.68 : Comparaison des différences au carré normalisées par type de correction pour chaque mesure, mine Alpha

Les différentes composantes du tenseurs tridimensionnels trouvés, par méthode d'interprétation, sont montrés sur la figure 4.70. Le tableau E.6 en annexe contient les valeurs montrées dans cette figure.

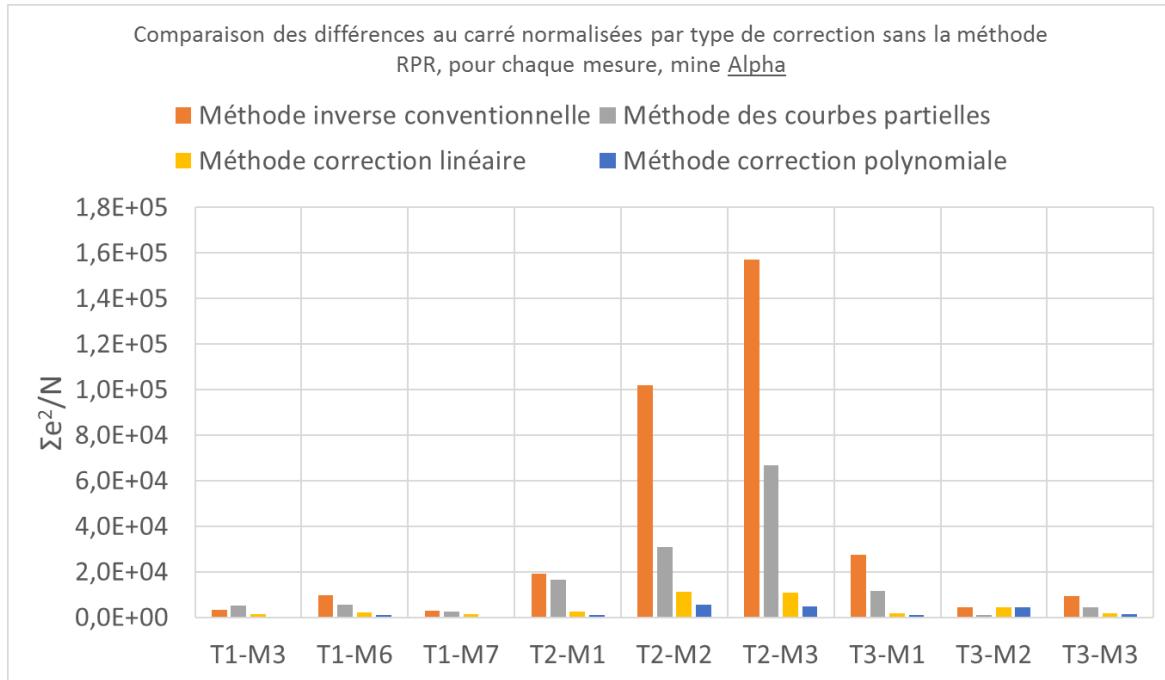


Figure 4.69 : Comparaison des différences au carré normalisées par type de correction sans la méthode RPR, pour chaque mesure, mine Alpha

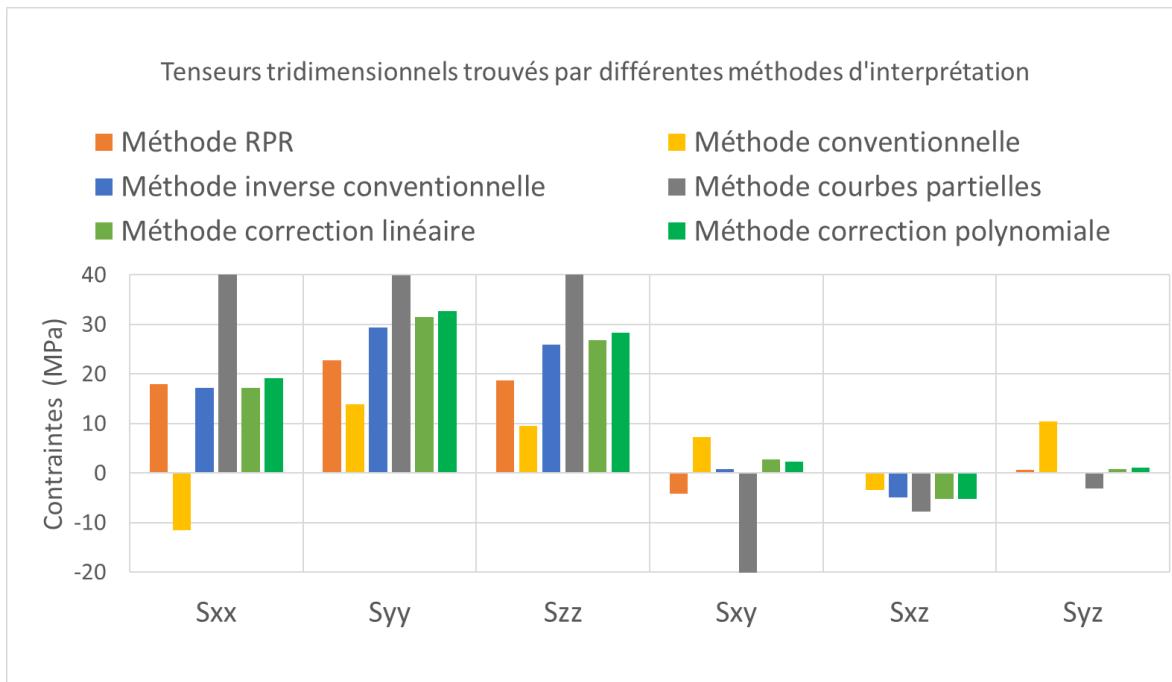


Figure 4.70 : Comparaison des différents tenseurs tridimensionnels trouvés par méthode d'interprétation, mine Alpha

Les tenseurs partiels de la mesure T2-M2 sont enlevées des calculs pour trouver le tenseur 3D selon chaque méthode d'interprétation car des doutes subsistent quant à la validité de cette mesure en raison de l'allure générale de la courbe de récupération qui lui est associée. Les tenseurs tridimensionnels calculés à partir des tenseurs partiels obtenus par différentes méthodes d'interprétation, sont montrés à la figure 4.71.

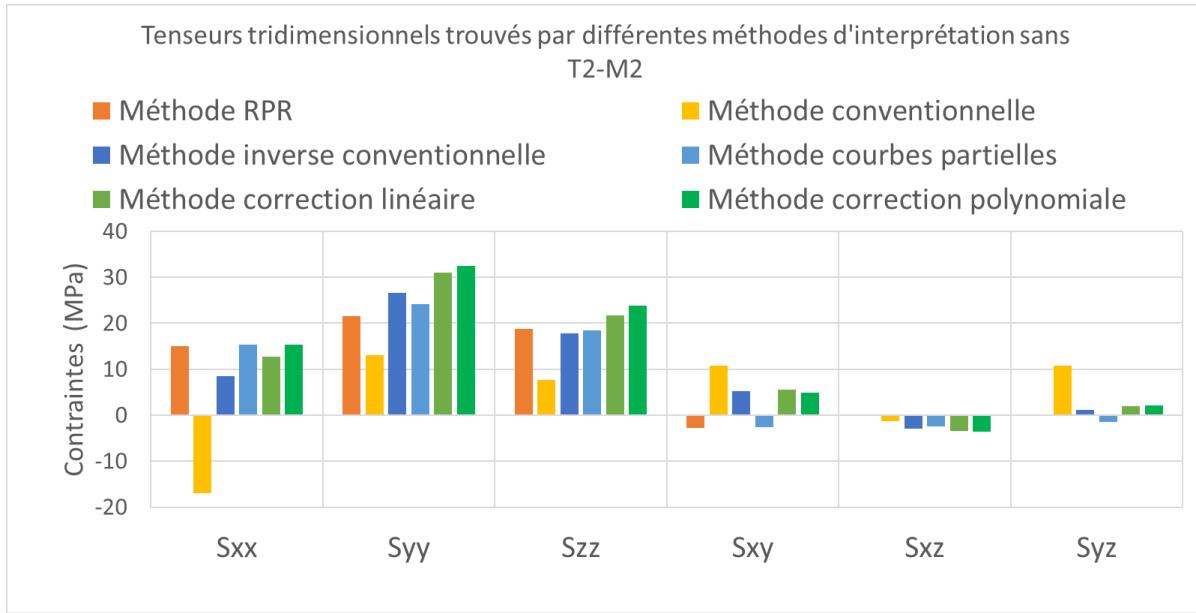


Figure 4.71 : Comparaison des différents tenseurs tridimensionnels trouvés par méthode d'interprétation, sans T2-M2, mine Alpha

#### 4.2 Interprétation des mesures, mine Beta

Pour la mine Beta, huit mesures ont été faites. Les courbes pour la mesure T1-M2 montrent qu'une rupture est survenue 2 cm après le début du surcarottage. Pendant les mesures, des signes d'endommagement de la roche ont été relevés. (Corthésy & Leite, 2016) Ceci est un signe de déformations élastoplastiques. Une hypothèse à la base des méthodes d'interprétation étant que le matériau se déforme de manière élastique n'est pas vérifiée. Cependant, l'interprétation des déformations est tout de même faite pour voir l'effet d'un tel comportement sur les tenseurs partiels et tridimensionnels.

Le traitement des données est effectué de la même manière qu'avec la mine Alpha. Mise à part la mesure T1-M2, toutes les courbes sont continues et présentent une allure comparable aux courbes extraites des modèles numériques. Les déformations résiduelles des mesures T1-M1 et T3-M1

remettent en question le relâchement complet de l'échantillon. Effectivement, les déformations post pic de ces deux mesures vont en augmentant ce qui donne un RPR de 0.95 pour chacune d'entre elles. Pour les mesures T1-M1, T1-M3 et T3-M1, l'influence des déformations résiduelles instables sur le tenseur partiel trouvé avec la méthode inverse a été vérifiée et celles-ci influencent au maximum de 1.0 MPa la contrainte dans l'axe du forage.

Les déformations de la mesure T1-M2 sur la figure 4.72 mettent en évidence un comportement non linéaire avant la rupture. Cette mesure ne sera pas prise en compte dans le reste du travail.

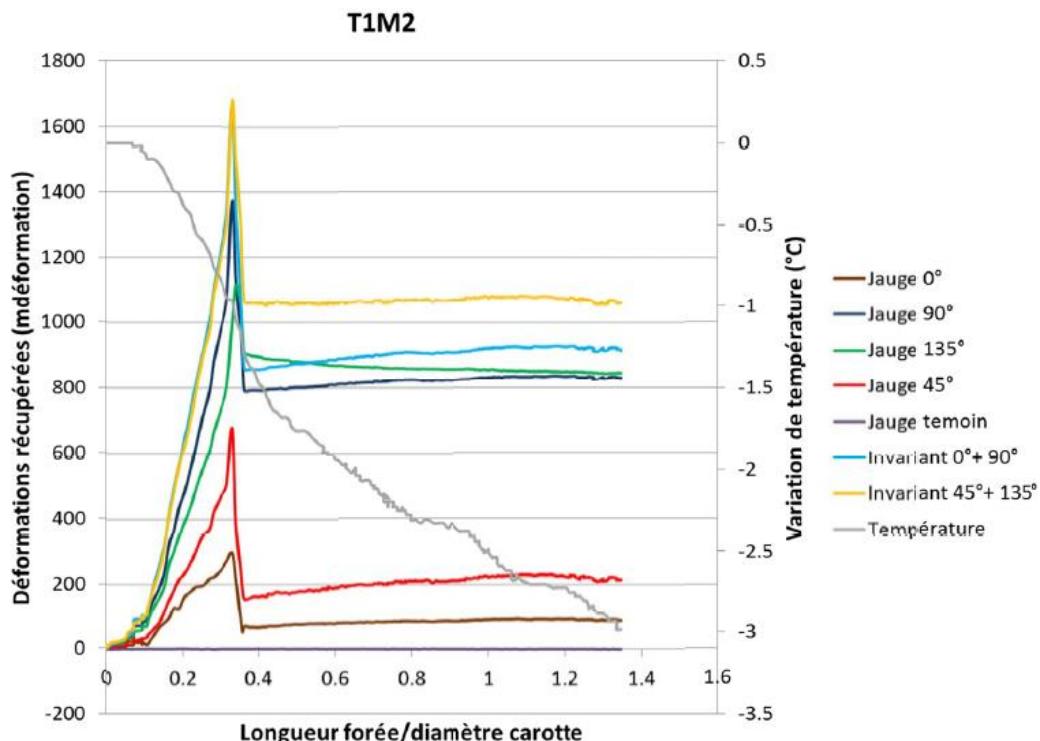


Figure 4.72 : Mesure T1-M2 – Courbes de terrain et variation de la température

Les recharges en laboratoire sont faites telles qu'expliquées dans la section 2.4.1.3 afin d'obtenir les paramètres de déformabilité des échantillons recueillis. L'angle  $\omega$  utilisé pour passer du système de référence des jauge à celui des axes d'anisotropie apparente est aussi présenté dans le tableau 4.47.

Tableau 4.47 : Paramètres de déformabilité, mine Beta

Mesures	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)	v	ω (°)
T1-M1	45,97	41,93	0,162	-20,09
T1-M3	45,04	40,02	0,238	-104,92
T2-M1	43,16	31,68	0,182	-133,60
T2-M2	40,70	31,71	0,232	-60,77
T3-M1	34,91	30,71	0,012	16,87
T3-M2	46,79	39,12	0,197	31,53
T3-M3	38,79	37,87	0,188	87,81

Les paramètres E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> et v sont ensuite introduits dans le modèle numérique afin de produire les courbes de récupération unitaires. L’application de la méthode inverse permet l’obtention des tenseurs partiels. Une rotation ( $\beta$ - $\omega$ ) des tenseurs partiels est alors faite pour ramener les contraintes estimées dans le référentiel du forage. Par la suite, les courbes de récupération de terrain sont superposées à celles obtenues de la méthode inverse. Celles-ci sont présentées comme pour la mine Alpha.

### Mesure T1-M1 : méthode RPR

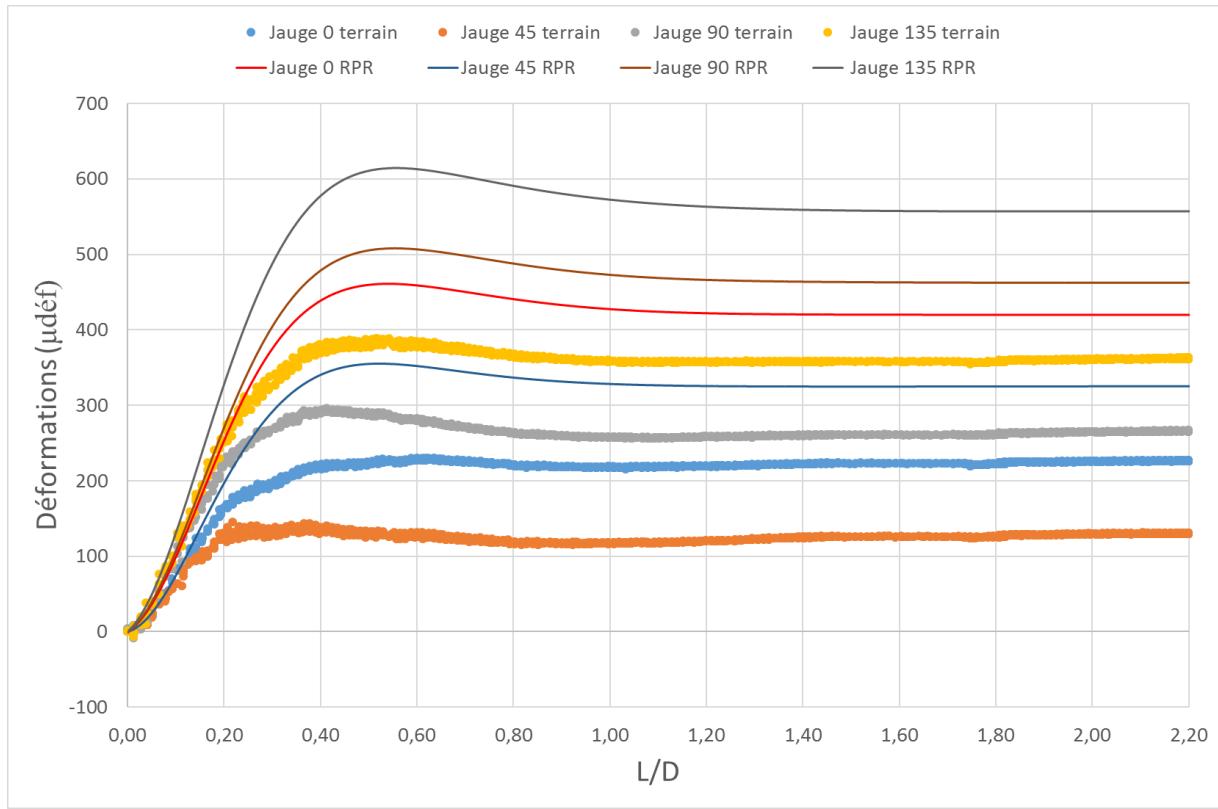


Figure 4.73 : Mesure T1-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.48 : Mesure T1-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	7,54
$S_{YY}$ (MPa)	13,01
$S_{ZZ}$ (MPa)	-16,42
$S_{XY}$ (MPa)	-1,49
$\Sigma e^2/N$	163 537

### Mesure T1-M1 : méthode inverse conventionnelle

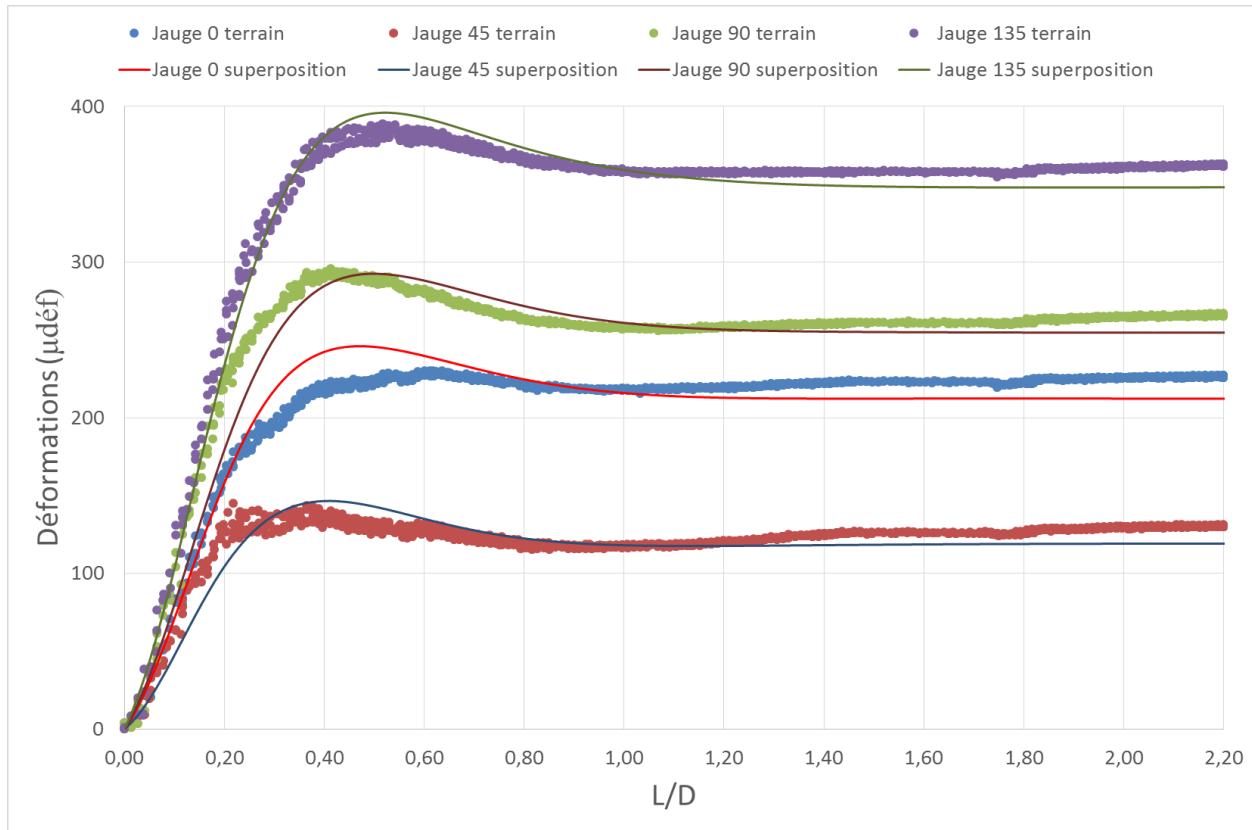


Figure 4.74 : Mesure T1-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.49 : Mesure T1-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	6,45
$S_{YY}$ (MPa)	9,59
$S_{ZZ}$ (MPa)	-4,46
$S_{XY}$ (MPa)	-2,66
$\Sigma e^2/N$	345

### Mesure T1-M1 : méthode des courbes partielles

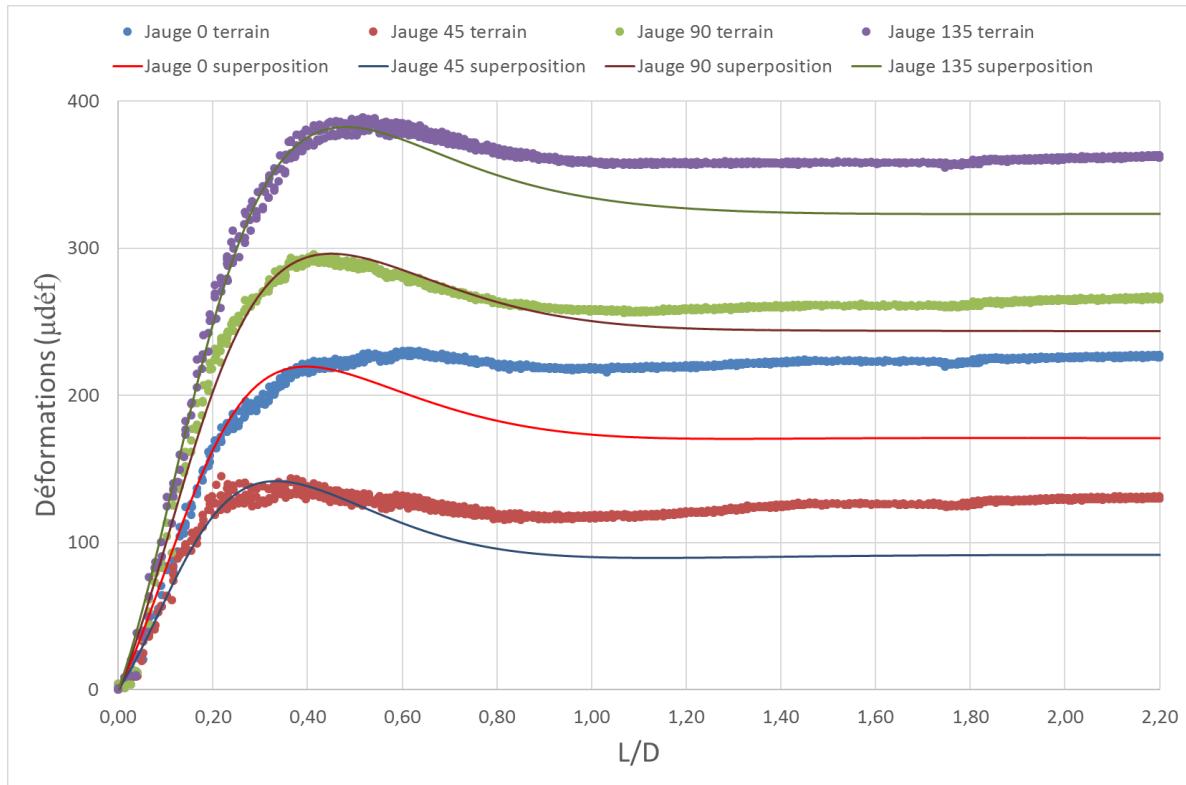


Figure 4.75 : Mesure T1-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.50 : Mesure T1-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	8,89
$S_{YY}$ (MPa)	12,69
$S_{ZZ}$ (MPa)	5,21
$S_{XY}$ (MPa)	-2,54
$\Sigma \epsilon^2/N$	279

### Mesure T1-M1 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

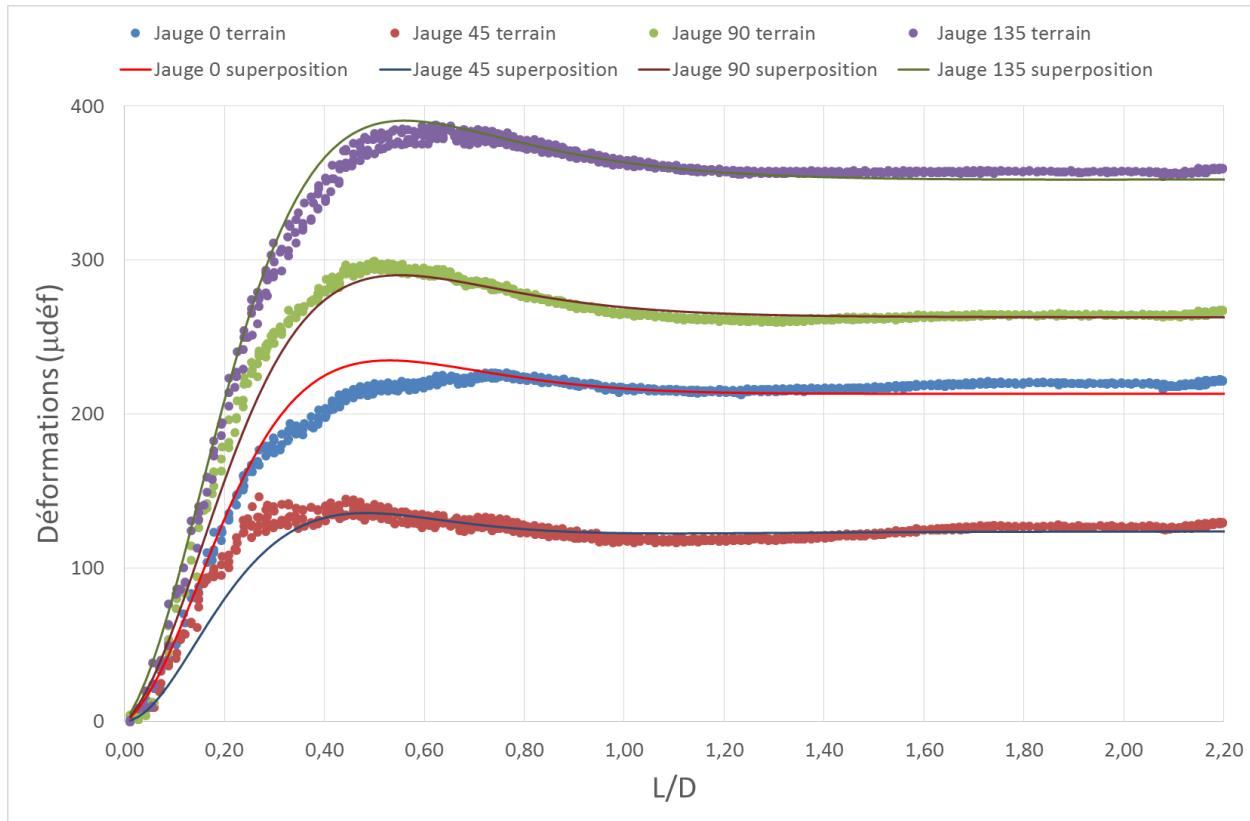


Figure 4.76: Mesure T1-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.51 : Mesure T1-M1 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	3,38
$S_{YY}$ (MPa)	6,84
$S_{ZZ}$ (MPa)	-11,74
$S_{XY}$ (MPa)	-2,59
$\Sigma e^2/N$	156
a	0,01
b	1,24

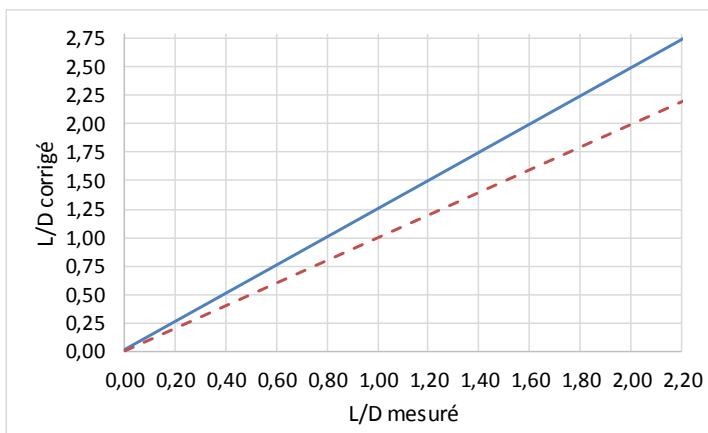


Figure 4.77 : Mesure T1-M1 – Correction linéaire effectuée sur  $L/D$

### Mesure T1-M1 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

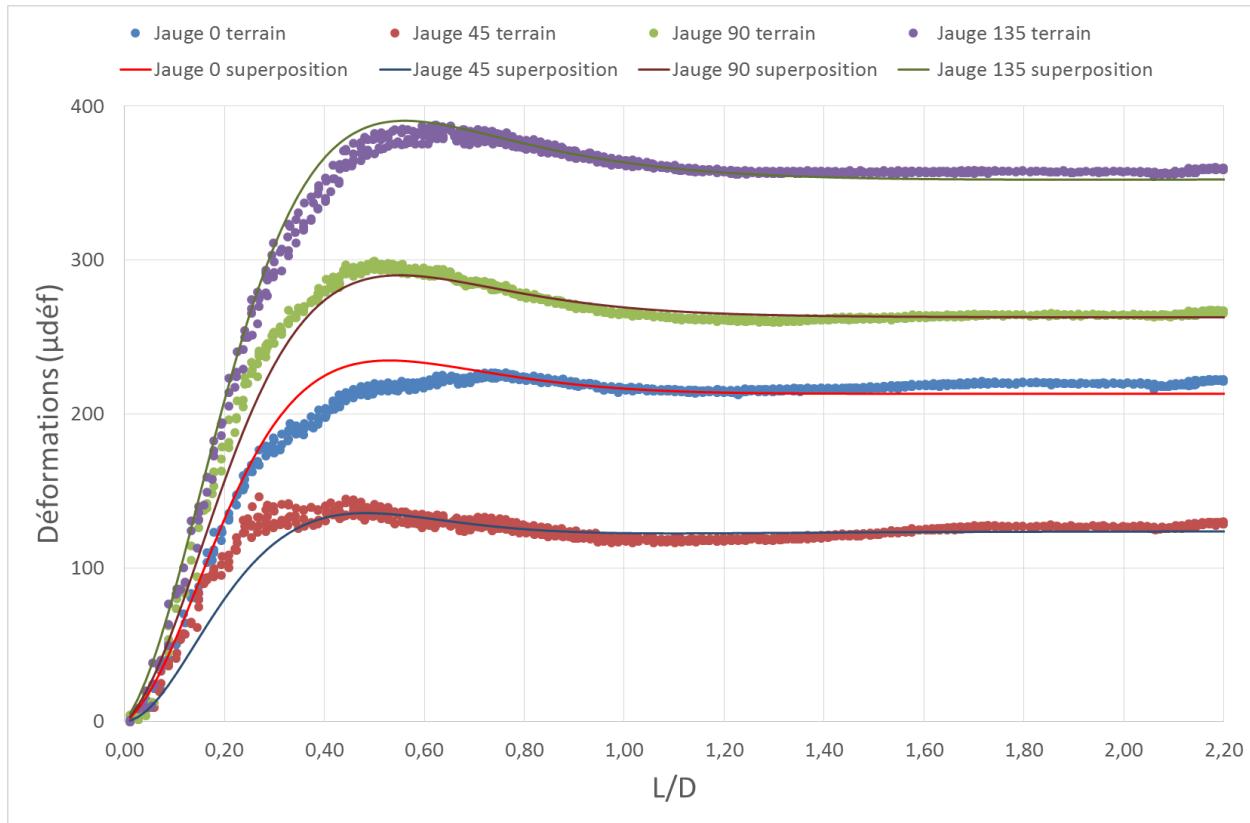


Figure 4.78 : Mesure T1-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D

Tableau 4.52 : Mesure T1-M1 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction polynomiale de L/D

$S_{XX}$ (MPa)	3,76
$S_{YY}$ (MPa)	7,22
$S_{ZZ}$ (MPa)	-10,85
$S_{XY}$ (MPa)	-2,61
$\Sigma e^2/N$	149
a	0,02
b	1,07
c	0,31
d	0,00

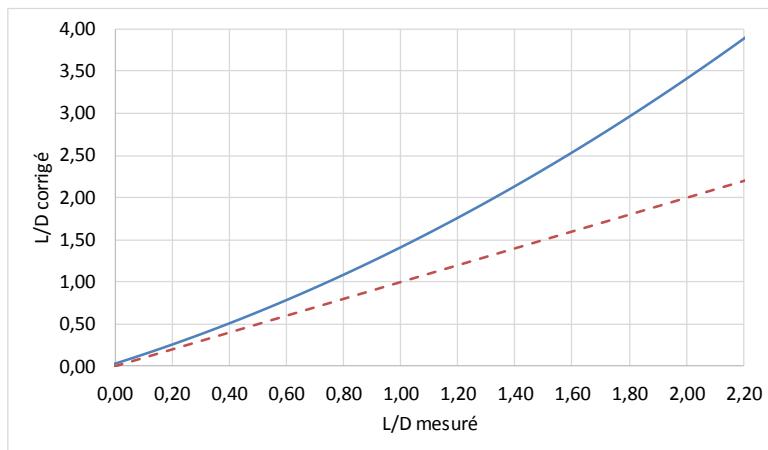


Figure 4.79 : Mesure T1-M1 – Correction polynomiale effectuée sur L/D

### Mesure T1-M3 : méthode RPR

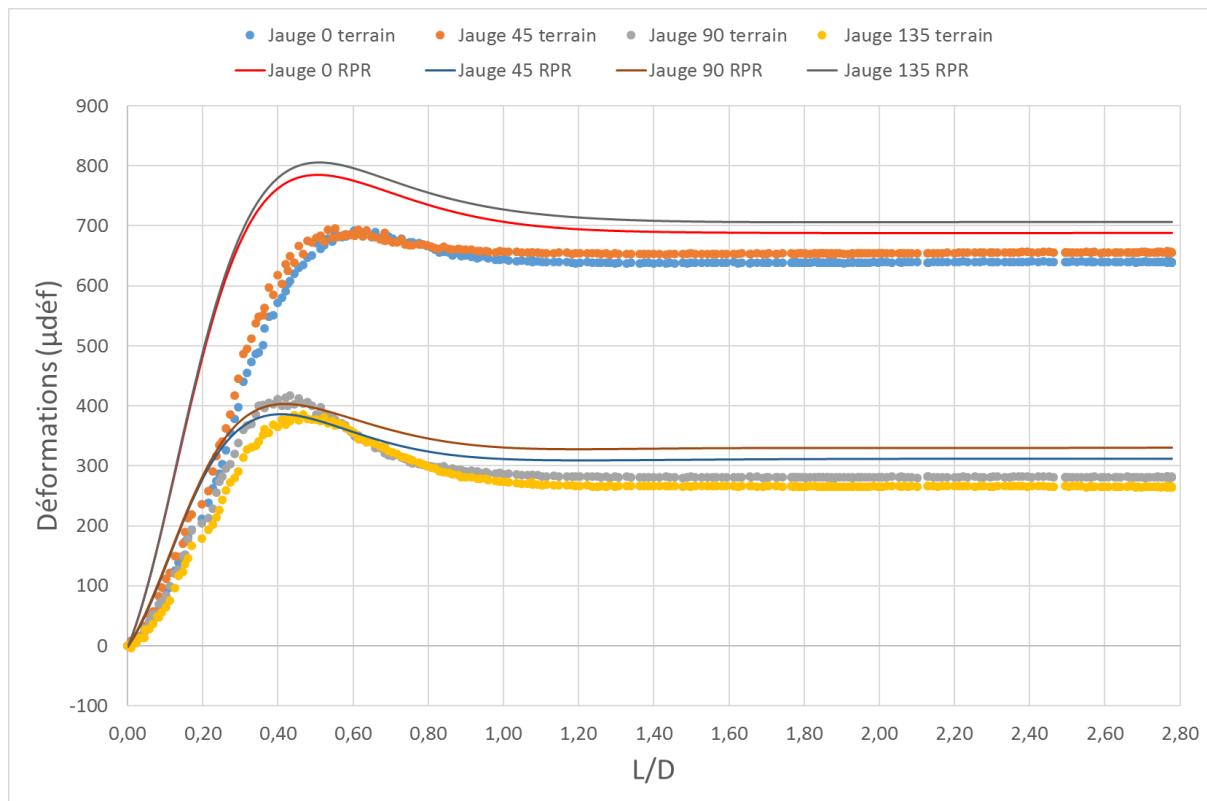


Figure 4.80 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.53 : Mesure T1-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	12,94
$S_{YY}$ (MPa)	27,30
$S_{ZZ}$ (MPa)	-4,50
$S_{XY}$ (MPa)	0,30
$\Sigma e^2/N$	290000

### Mesure T1-M3 : méthode inverse conventionnelle

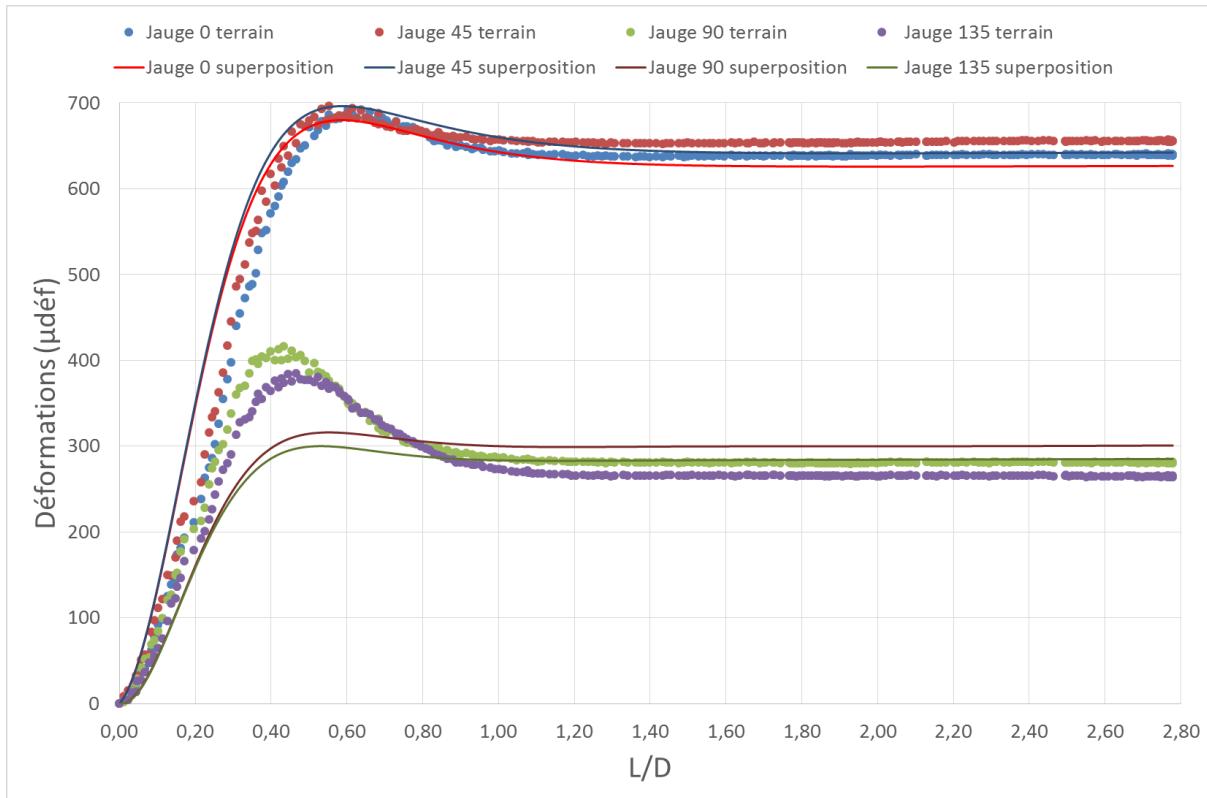


Figure 4.81 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.54 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	7,45
$S_{YY}$ (MPa)	7,47
$S_{ZZ}$ (MPa)	-27,48
$S_{XY}$ (MPa)	6,26
$\Sigma e^2/N$	4407

### Mesure T1-M3 : méthode des courbes partielles

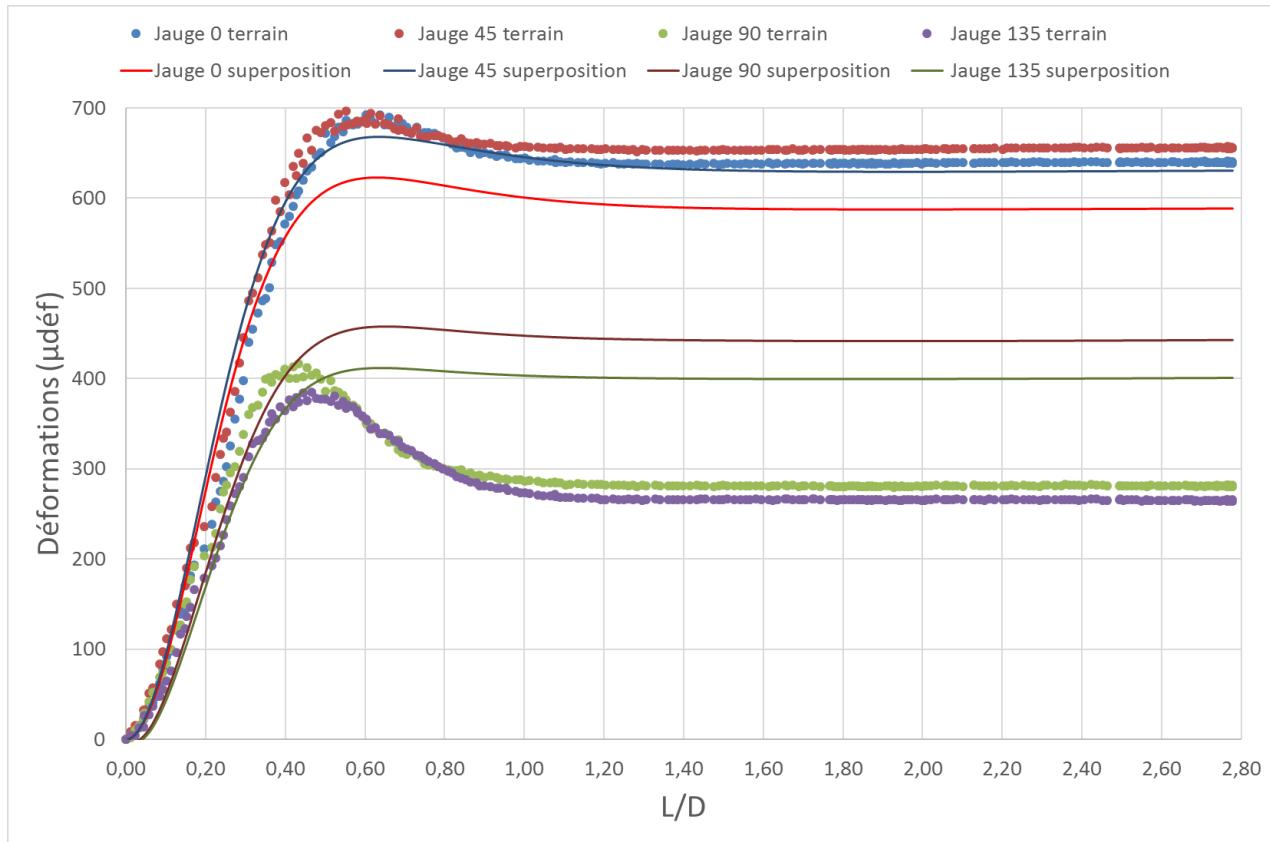


Figure 4.82 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.55 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	-0,82
$S_{YY}$ (MPa)	6,12
$S_{ZZ}$ (MPa)	-42,31
$S_{XY}$ (MPa)	-0,54
$\Sigma e^2/N$	3212

### Mesure T1-M3 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

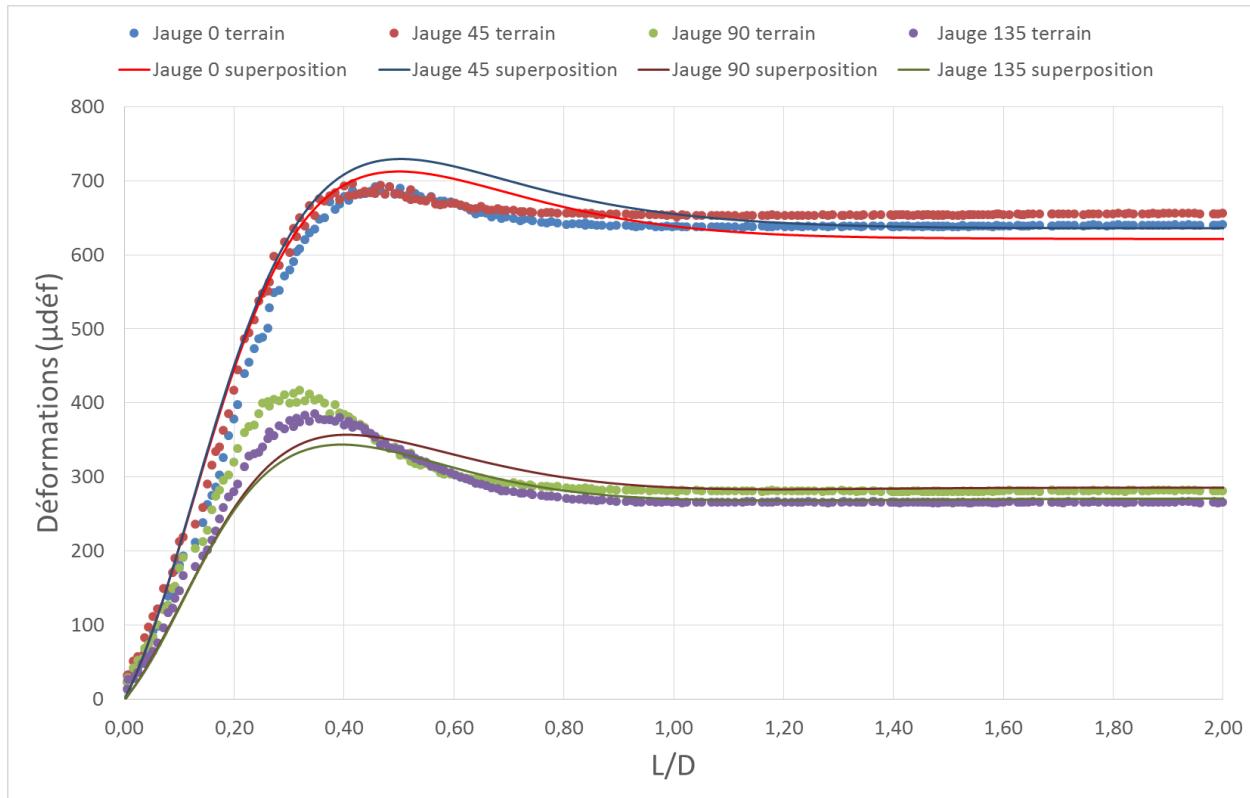


Figure 4.83 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.56 : Mesure T1-M3 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	12,32
$S_{YY}$ (MPa)	25,71
$S_{ZZ}$ (MPa)	-1,69
$S_{XY}$ (MPa)	0,31
$\Sigma e^2/N$	2112
a	-0,03
b	0,81

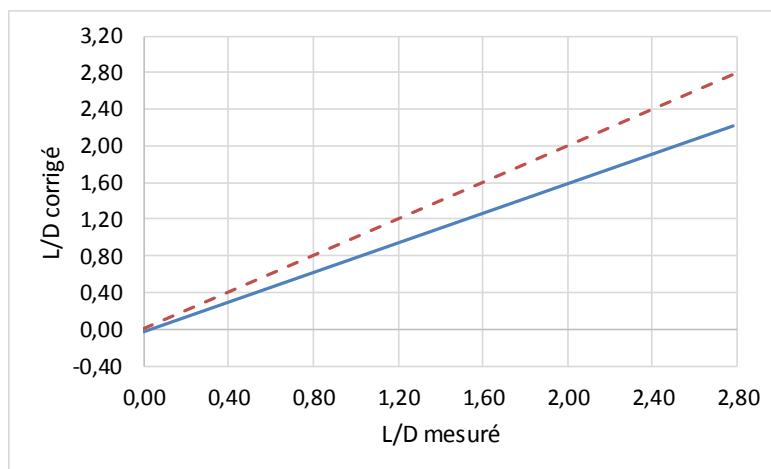


Figure 4.84 : Mesure T1-M3 – Correction linéaire effectuée sur  $L/D$

### Mesure T1-M3 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

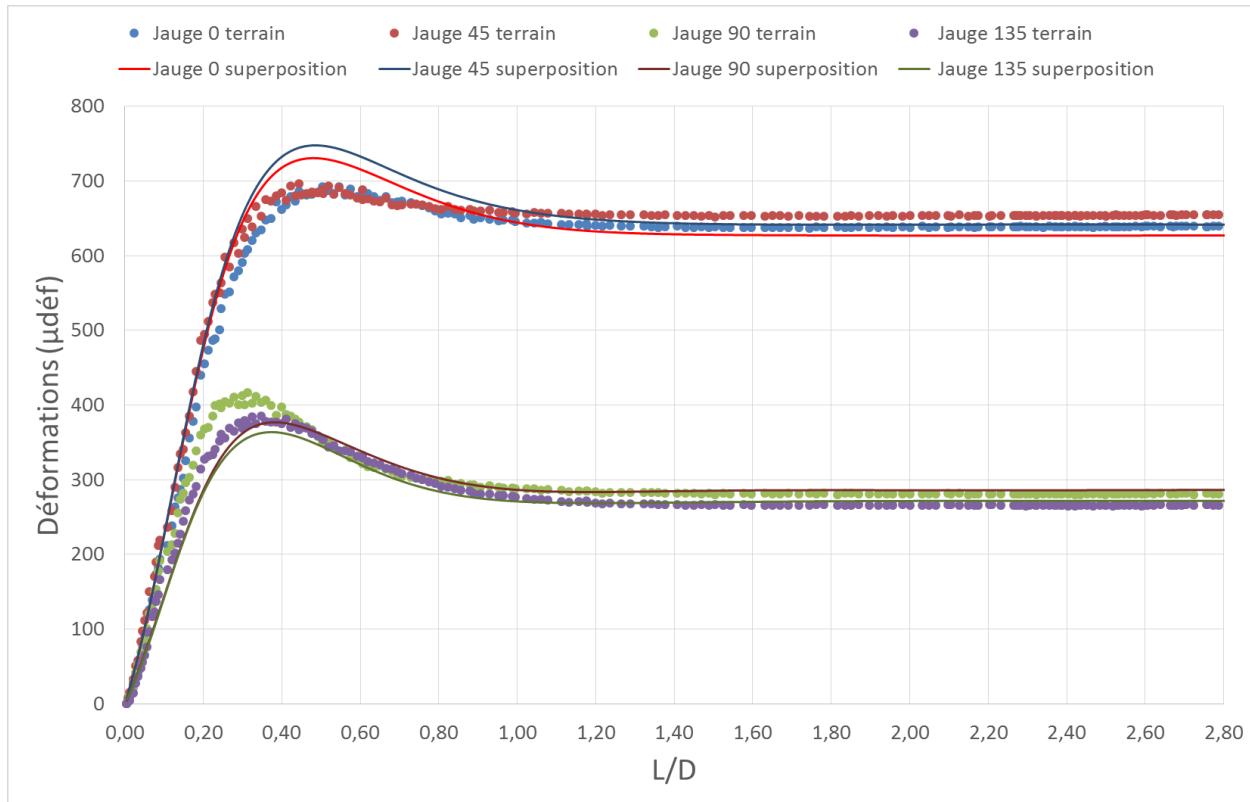


Figure 4.85 : Mesure T1-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.57 : Mesure T1-M3 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction polynomiale de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	15,22
$S_{YY}$ (MPa)	28,93
$S_{ZZ}$ (MPa)	4,61
$S_{XY}$ (MPa)	0,39
$\Sigma e^2/N$	1550
a	0,01
b	0,35
c	0,94
d	0,00

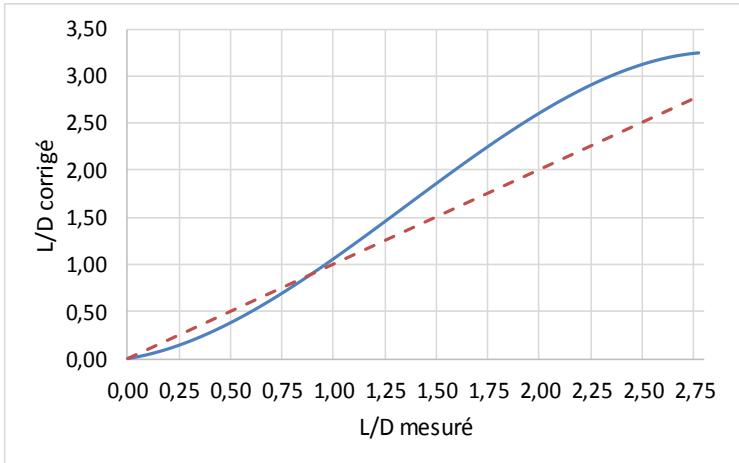


Figure 4.86 : Mesure T1-M3 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

### Mesure T2-M1 : méthode RPR

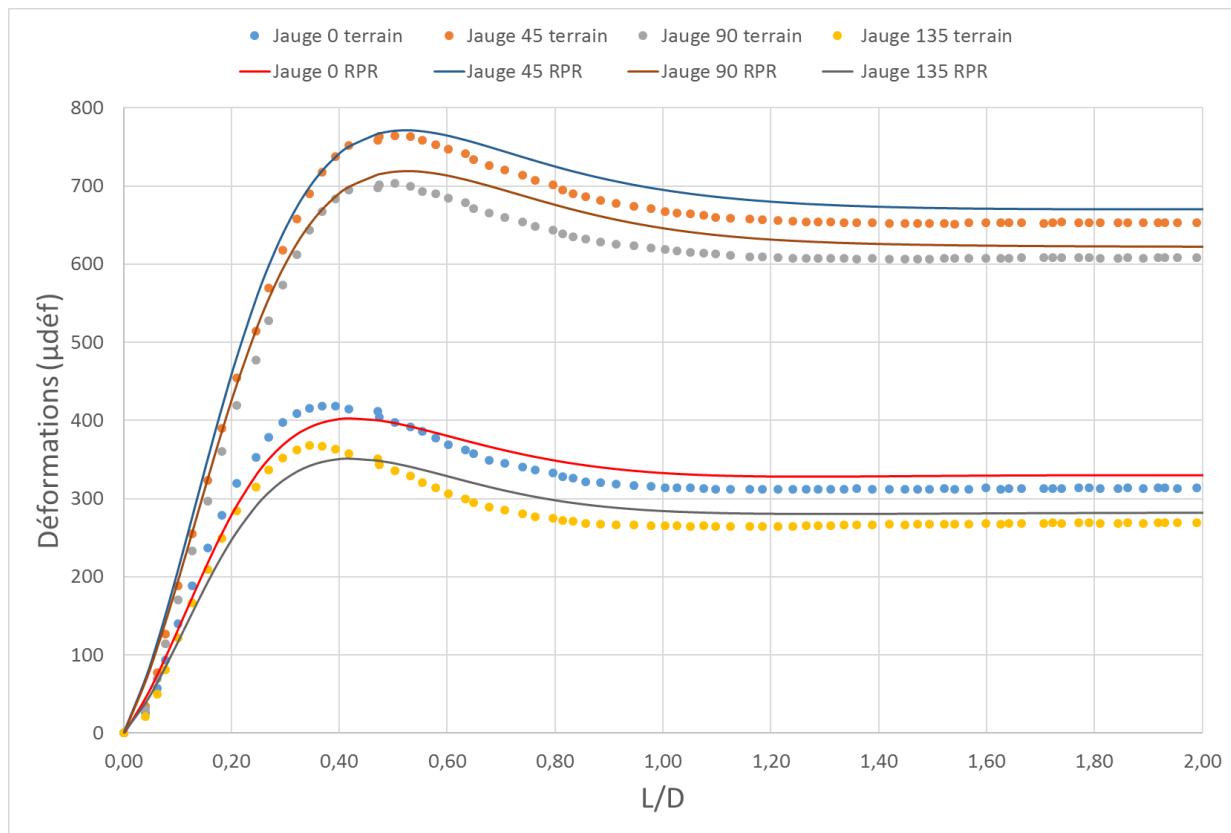


Figure 4.87 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.58 : Mesure T2-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	13,17
$S_{YY}$ (MPa)	18,65
$S_{ZZ}$ (MPa)	-0,93
$S_{XY}$ (MPa)	-3,68
$\Sigma e^2/N$	1 329

### Mesure T2-M1 : méthode inverse conventionnelle

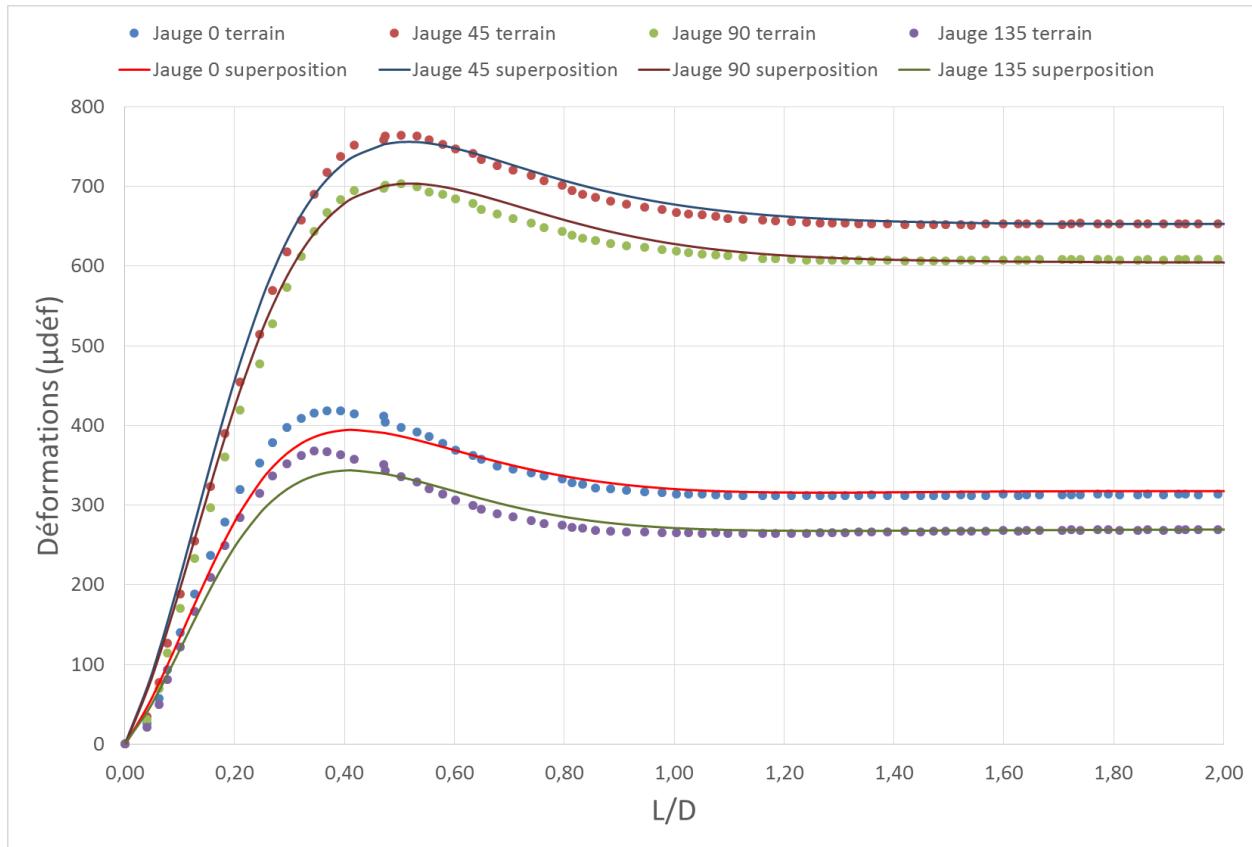


Figure 4.88 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.59 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	11,93
$S_{YY}$ (MPa)	20,78
$S_{ZZ}$ (MPa)	1,48
$S_{XY}$ (MPa)	0,86
$\Sigma e^2/N$	296

### Mesure T2-M1 : méthode des courbes partielles

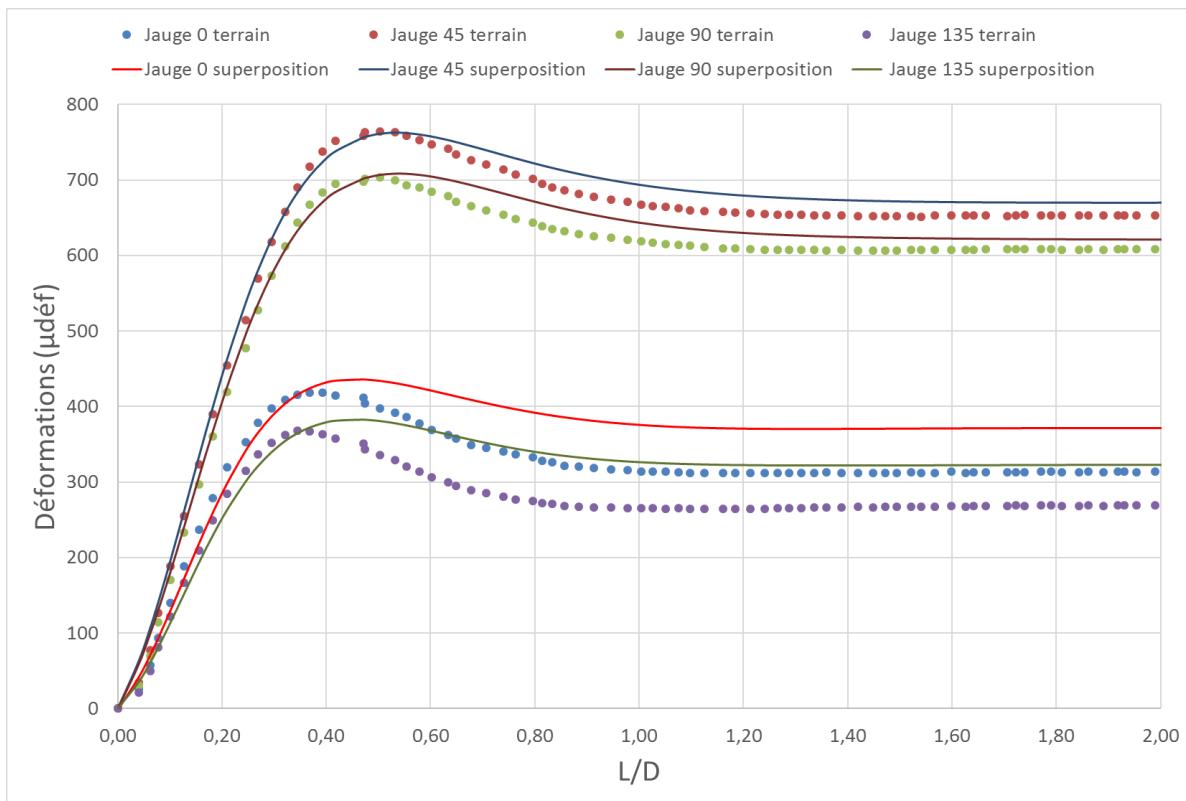


Figure 4.89 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.60 : Mesure T2-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	10,82
$S_{YY}$ (MPa)	18,67
$S_{ZZ}$ (MPa)	-5,84
$S_{XY}$ (MPa)	0,93
$\Sigma e^2/N$	878

### Mesure T2-M1 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

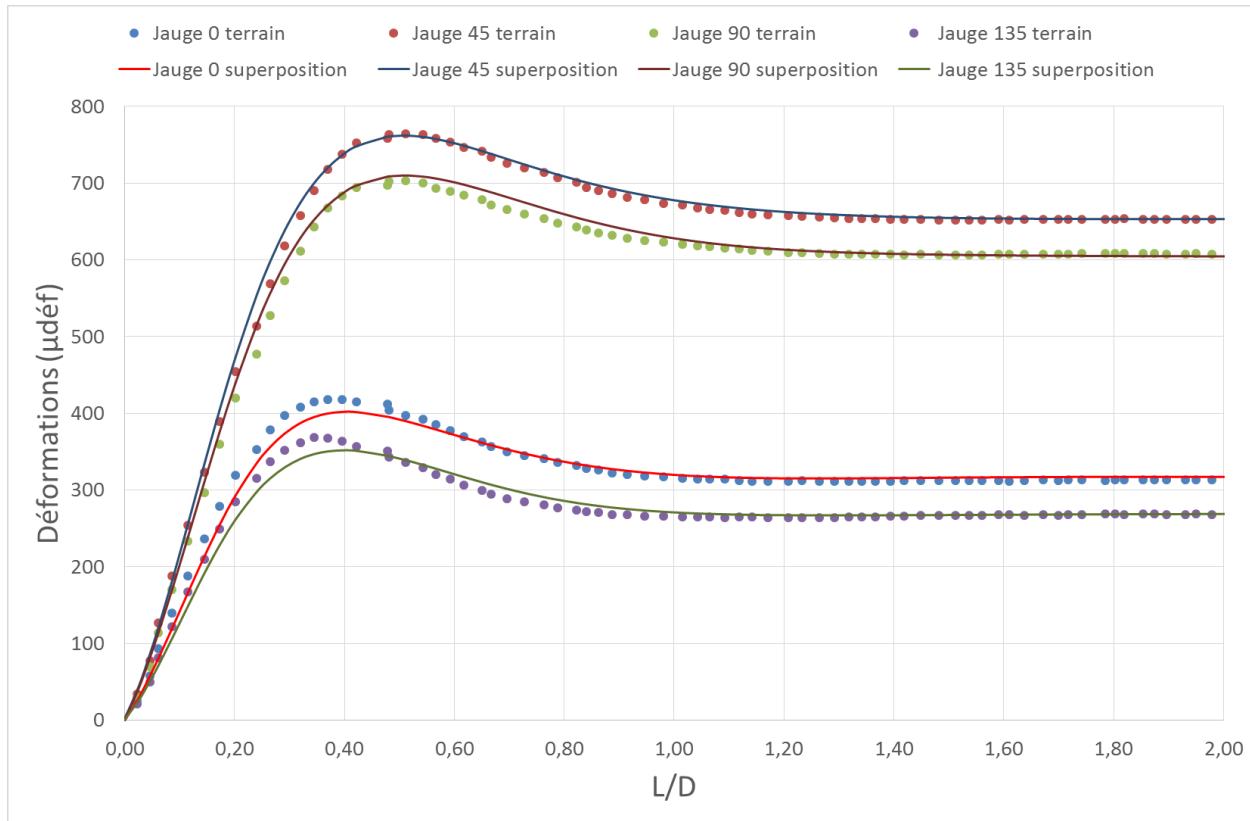


Figure 4.90 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D

Tableau 4.61 : Mesure T2-M1 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction linéaire de L/D

S <sub>XX</sub> (MPa)	13,09
S <sub>YY</sub> (MPa)	21,87
S <sub>ZZ</sub> (MPa)	4,29
S <sub>XY</sub> (MPa)	0,95
$\Sigma e^2/N$	188
a	-0,02
b	1,06

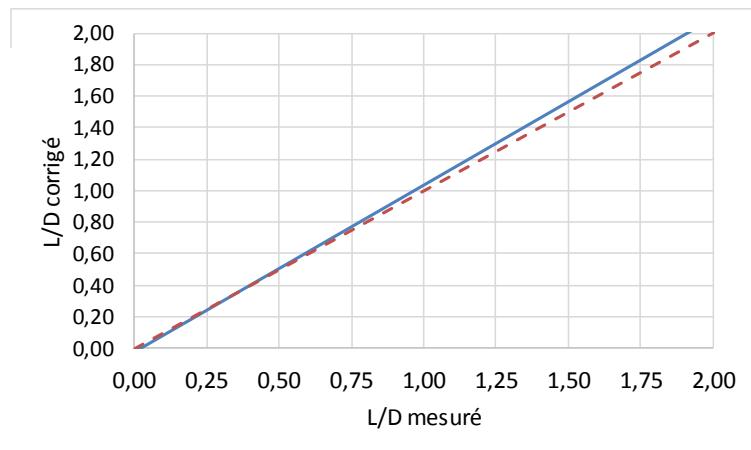


Figure 4.91 : Mesure T2-M1 – Correction linéaire effectuée sur L/D

### Mesure T2-M1 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

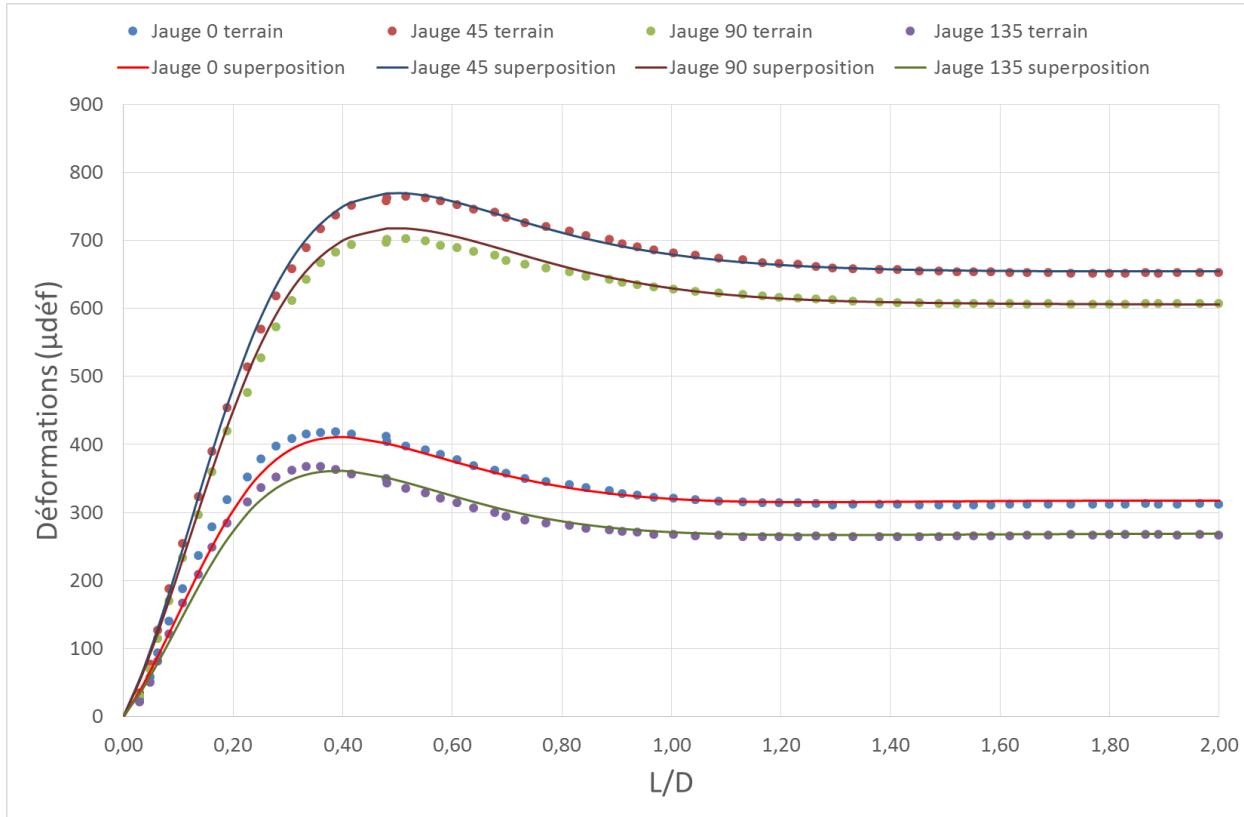


Figure 4.93 : Mesure T2-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de L/D

Tableau 4.62 : Mesure T2-M1 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction polynomiale de L/D

$S_{XX}$ (MPa)	14,28
$S_{YY}$ (MPa)	23,00
$S_{ZZ}$ (MPa)	7,12
$S_{XY}$ (MPa)	1,04
$\Sigma e^2/N$	130
a	-0,01
b	0,83
c	0,48
d	0,00

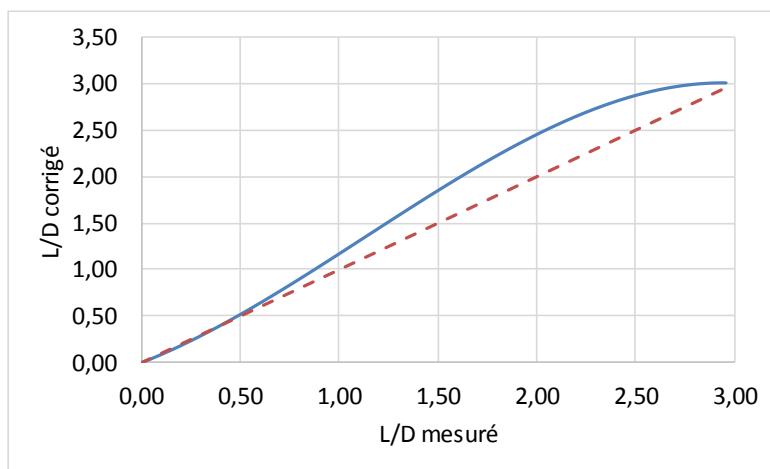


Figure 4.92 : Mesure T2-M1 – Correction polynomiale effectuée sur L/D

### Mesure T2-M2 : méthode RPR

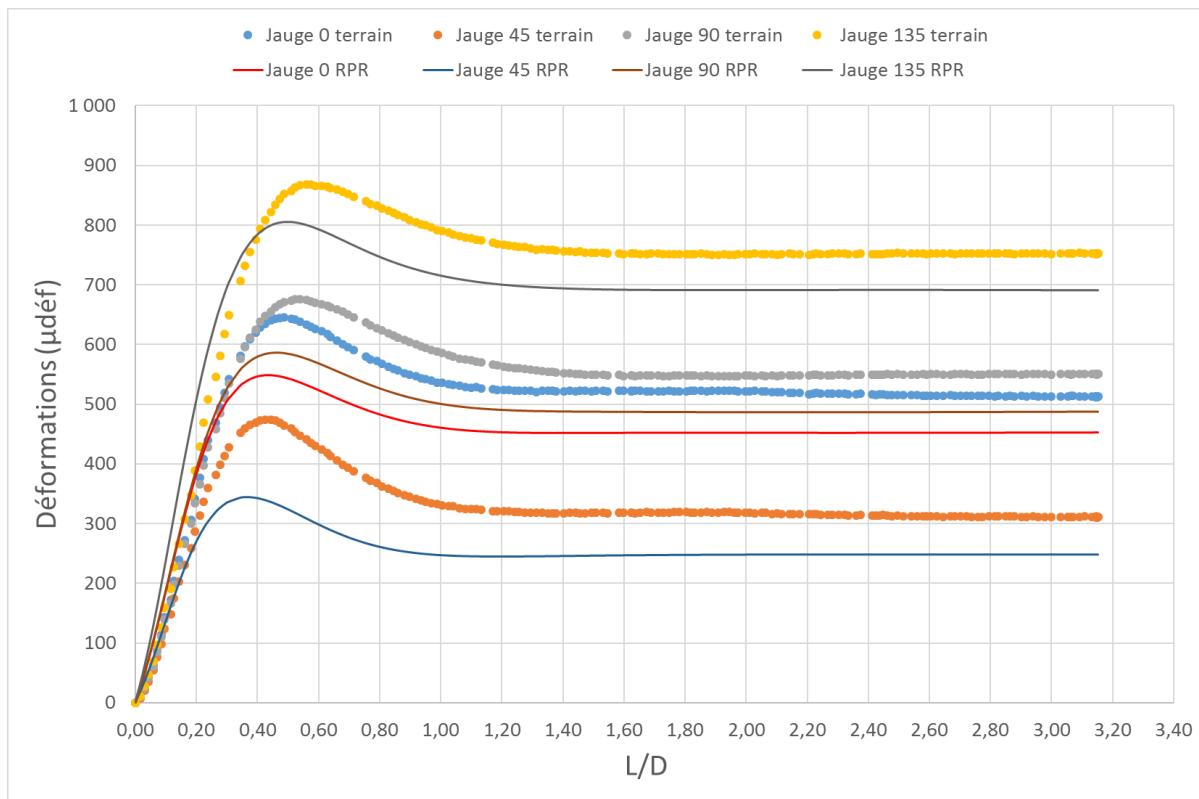


Figure 4.94 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.63 : Mesure T2-M2 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

S <sub>xx</sub> (MPa)	15,12
S <sub>yy</sub> (MPa)	22,95
S <sub>zz</sub> (MPa)	5,11
S <sub>xy</sub> (MPa)	2,85
$\Sigma e^2/N$	18 567

### Mesure T2-M2 : méthode inverse conventionnelle

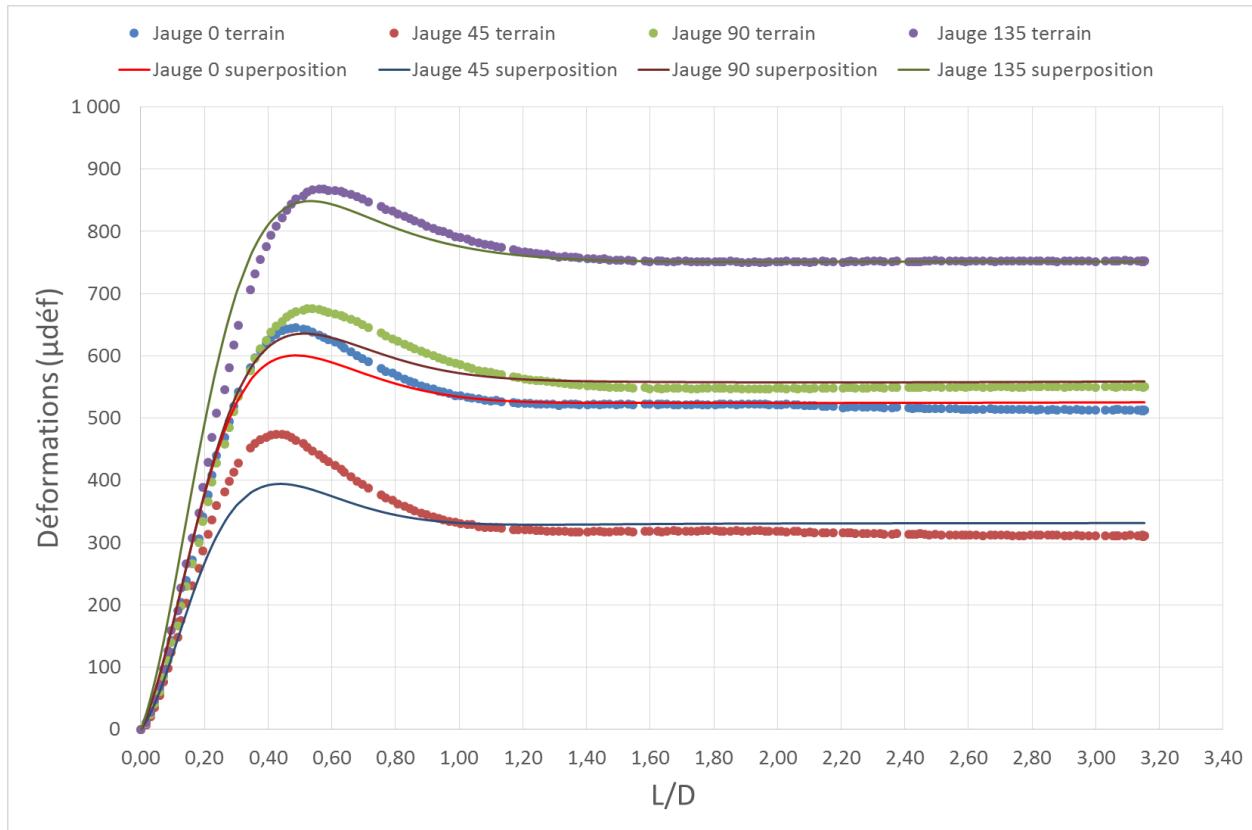


Figure 4.95 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.64 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	11,20
$S_{YY}$ (MPa)	20,33
$S_{ZZ}$ (MPa)	-8,16
$S_{XY}$ (MPa)	-0,17
$\Sigma e^2/N$	1939

### Mesure T2-M2 : méthode des courbes partielles

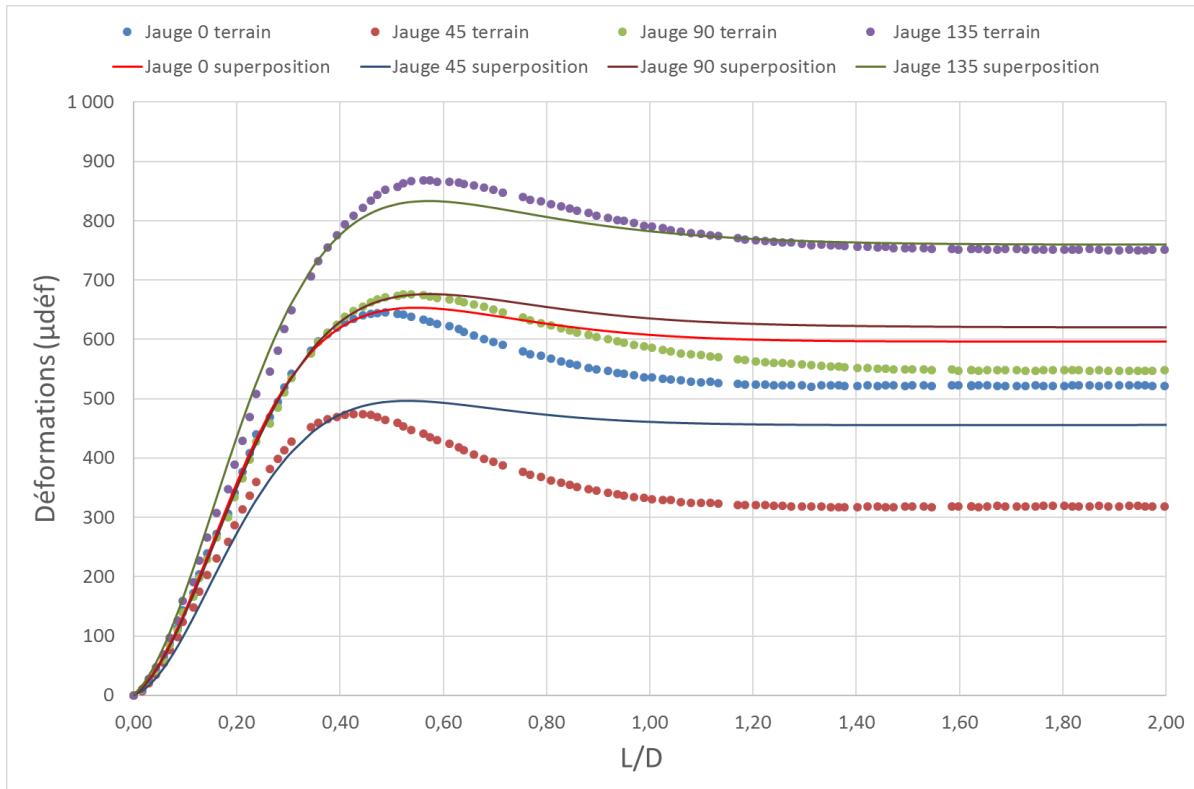


Figure 4.96 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.65 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	7,64
$S_{YY}$ (MPa)	14,30
$S_{ZZ}$ (MPa)	-24,58
$S_{XY}$ (MPa)	-0,21
$\Sigma e^2/N$	917

### Mesure T2-M2 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

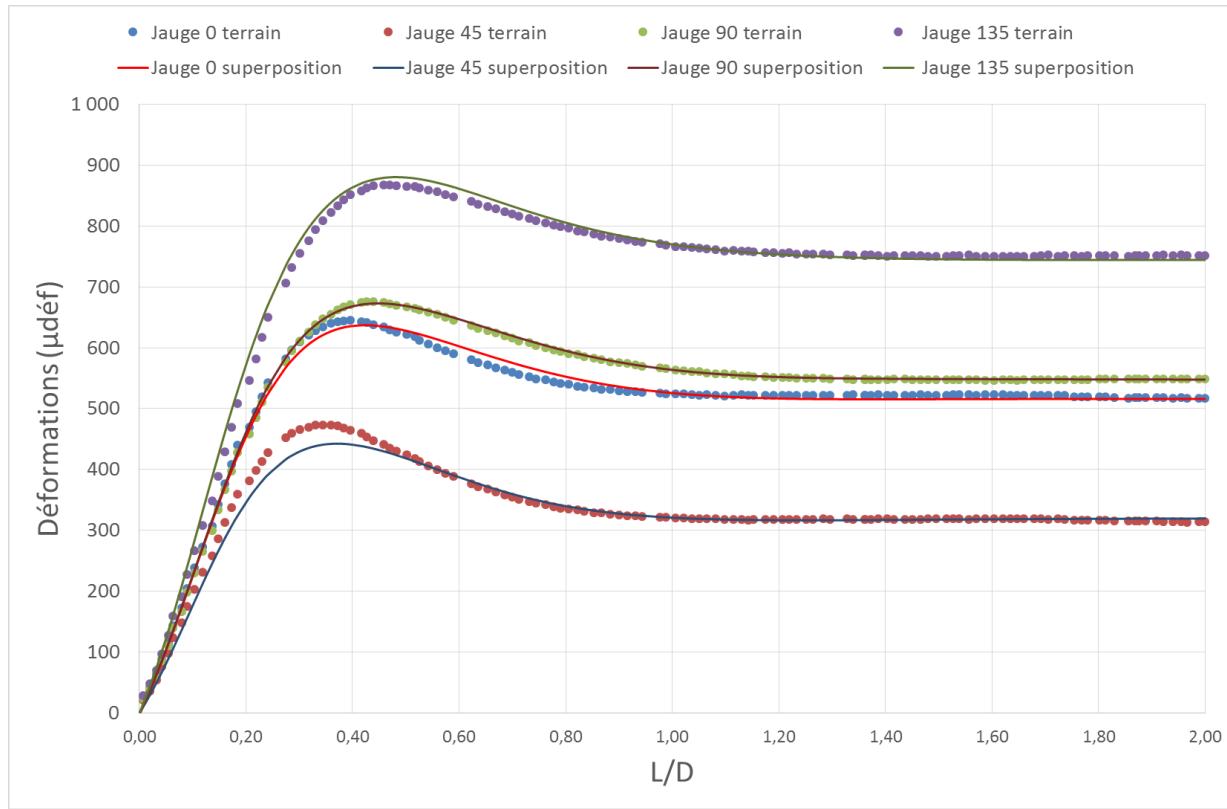


Figure 4.97 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.66 : Mesure T2-M2 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction linéaire de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	18,77
$S_{YY}$ (MPa)	28,23
$S_{ZZ}$ (MPa)	10,21
$S_{XY}$ (MPa)	-0,71
$\Sigma e^2/N$	354
a	-0,02
b	0,85

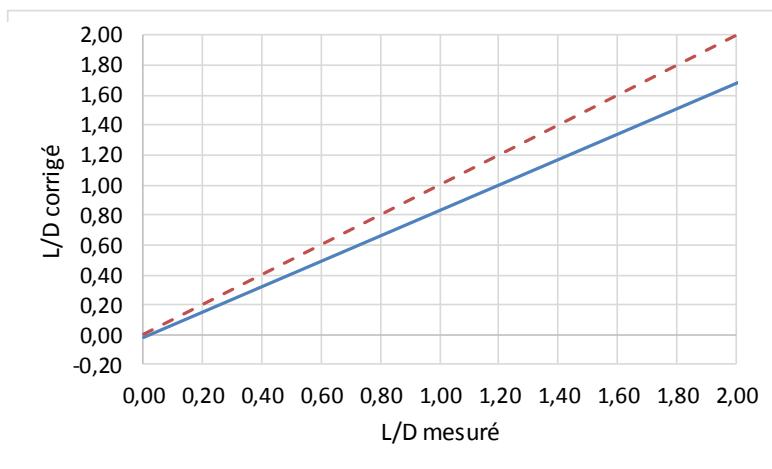


Figure 4.98 : Mesure T2-M2 – Correction linéaire effectuée  
sur  $L/D$

### Mesure T2-M2 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

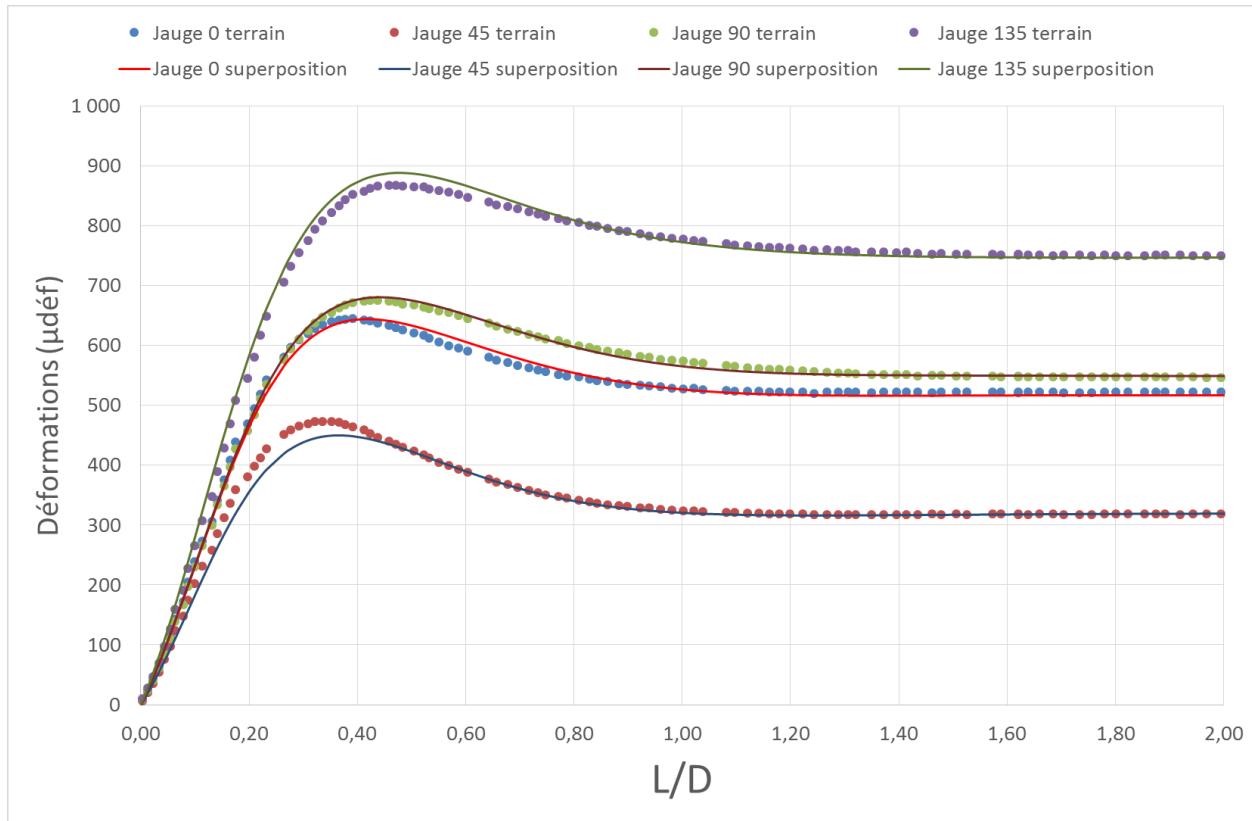


Figure 4.99 : Mesure T2-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.67 : Mesure T2-M2 - Contraintes estimées de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	19,70
$S_{YY}$ (MPa)	29,24
$S_{ZZ}$ (MPa)	12,31
$S_{XY}$ (MPa)	-0,77
$\Sigma e^2/N$	283
a	-0,01
b	0,74
c	0,17
d	0,00

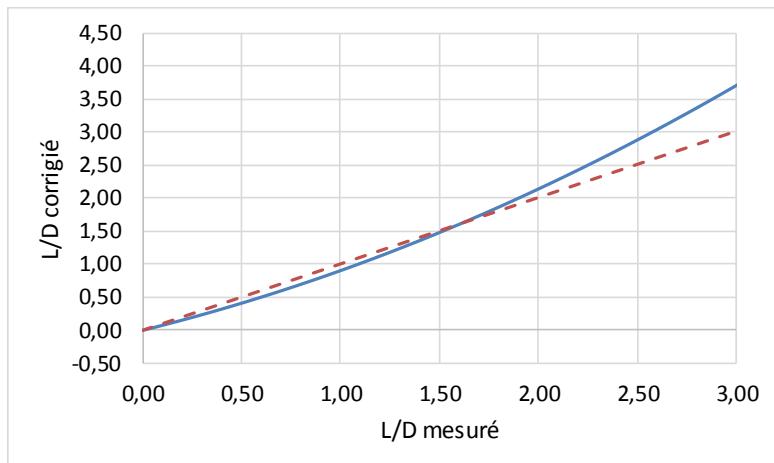


Figure 4.100 : Mesure T2-M2 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

### Mesure T3-M1 : méthode RPR

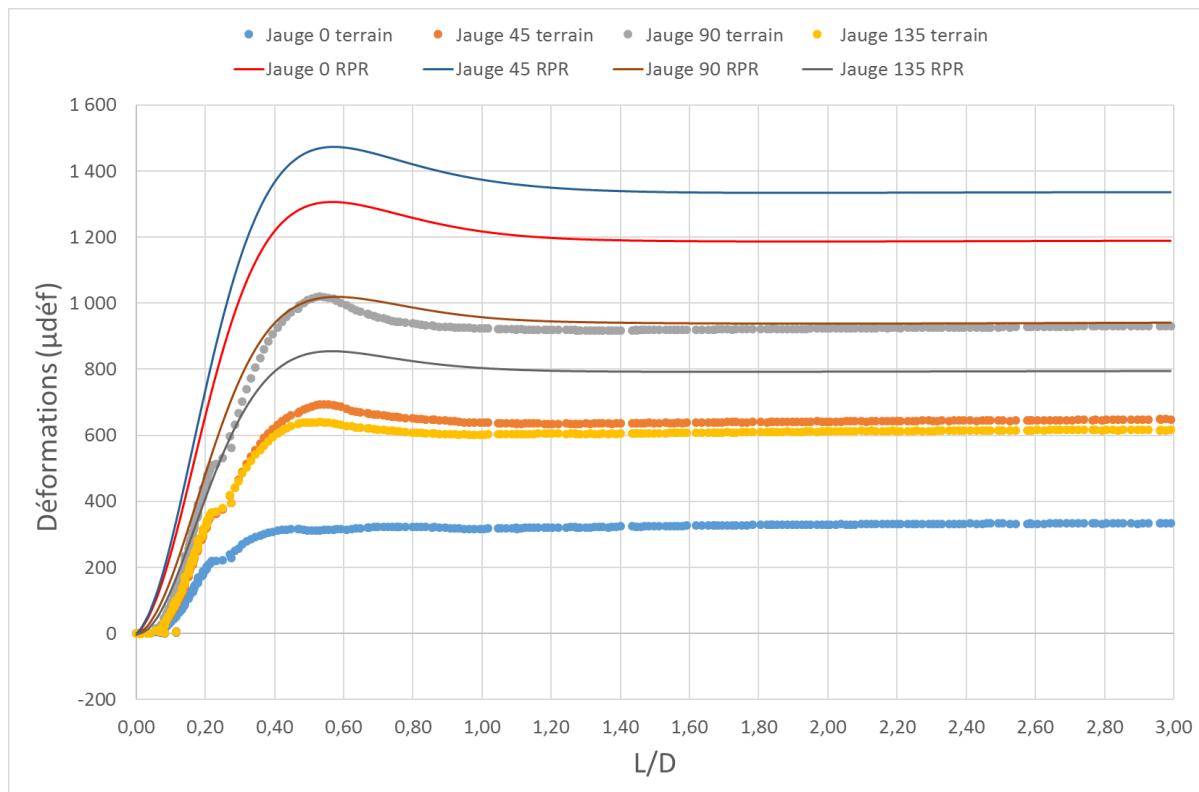


Figure 4.101 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.68 : Mesure T3-M1 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	13,98
$S_{YY}$ (MPa)	21,72
$S_{ZZ}$ (MPa)	-38,24
$S_{XY}$ (MPa)	-6,07
$\Sigma e^2/N$	1 035 540

### Mesure T3-M1 : méthode inverse conventionnelle

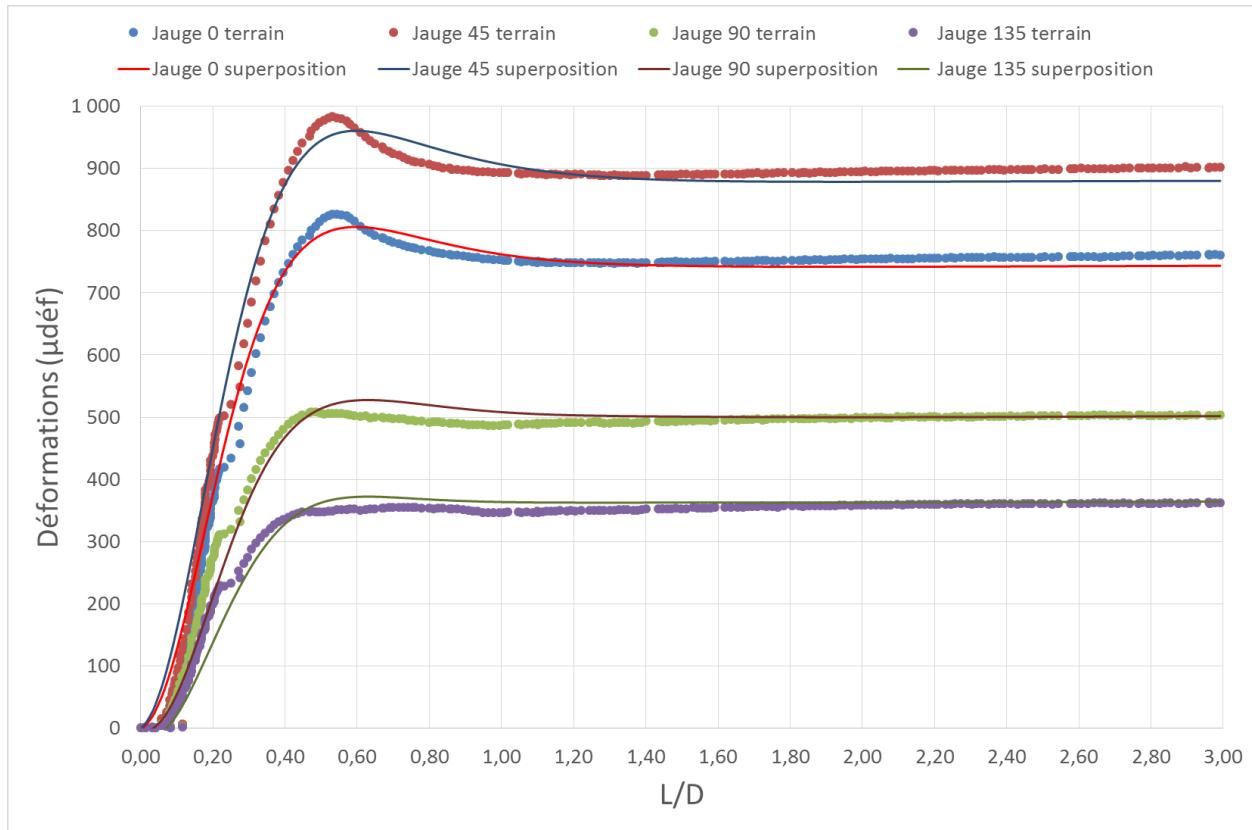


Figure 4.102 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.69 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	9,95
$S_{YY}$ (MPa)	5,92
$S_{ZZ}$ (MPa)	-28,61
$S_{XY}$ (MPa)	-5,60
$\Sigma e^2/N$	2533

### Mesure T3-M1 : méthode des courbes partielles

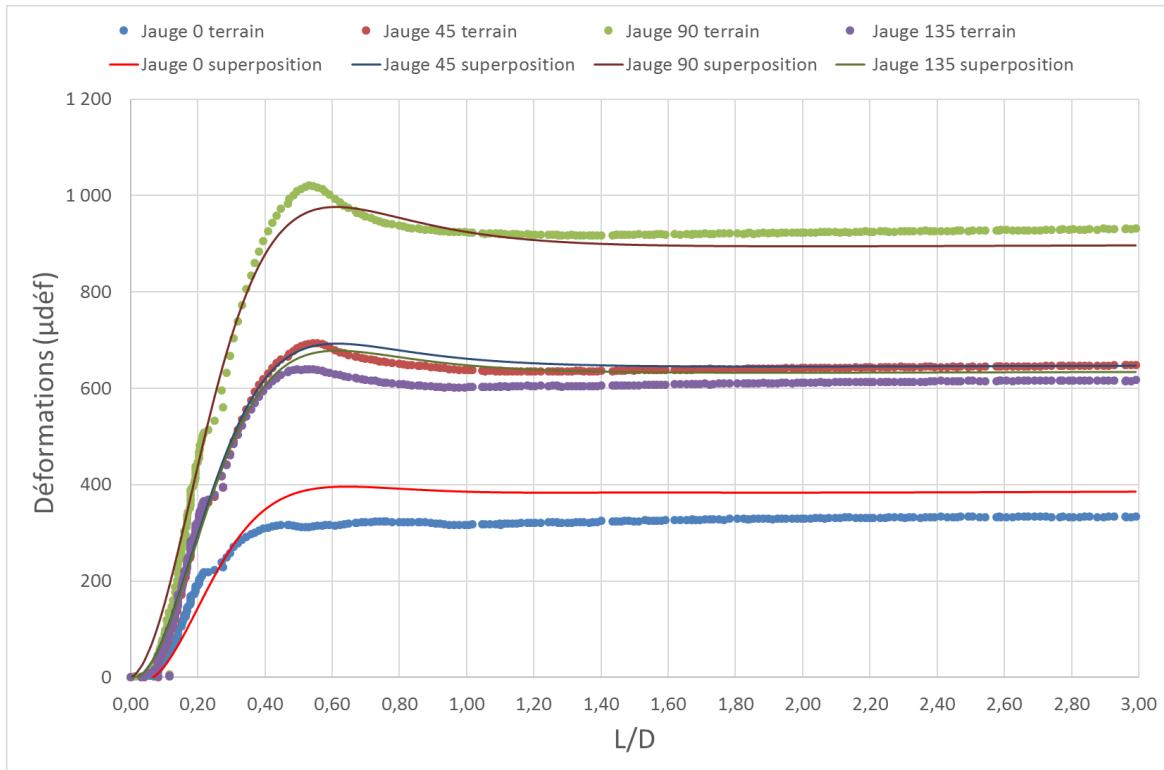


Figure 4.103 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.70 : Mesure T3-M1 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	9,64
$S_{YY}$ (MPa)	5,81
$S_{ZZ}$ (MPa)	-31,10
$S_{XY}$ (MPa)	-4,89
$\Sigma e^2/N$	4769

### Mesure T3-M1 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

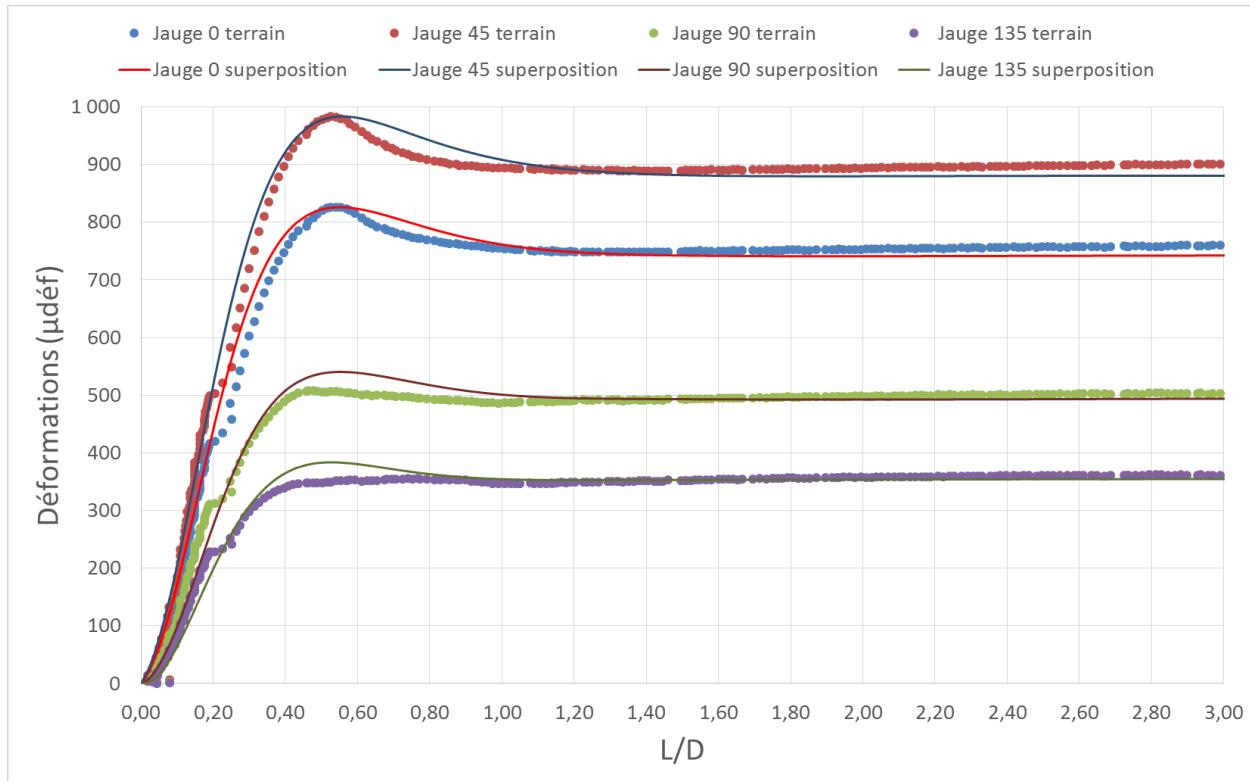


Figure 4.104 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de  $L/D$

Tableau 4.71 : Mesure T3-M1 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction linéaire de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	12,78
$S_{YY}$ (MPa)	8,79
$S_{ZZ}$ (MPa)	-19,12
$S_{XY}$ (MPa)	-5,59
$\Sigma \epsilon^2/N$	1660
a	-0,04
b	1,10

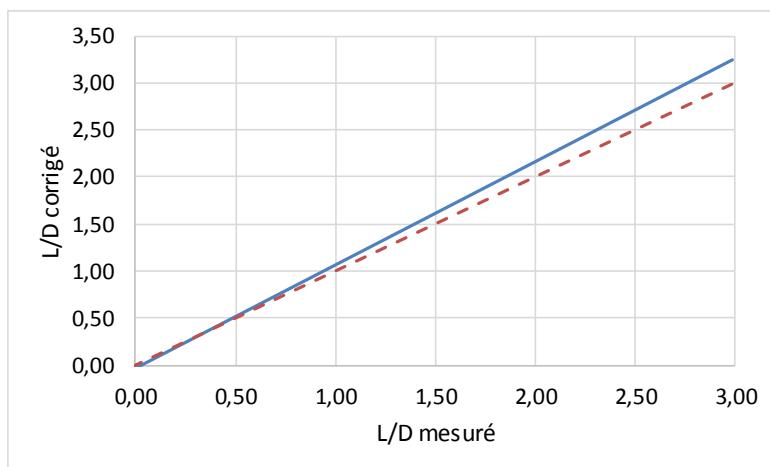


Figure 4.105 : Mesure T3-M1 – Correction linéaire effectuée sur  $L/D$

### Mesure T3-M1 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

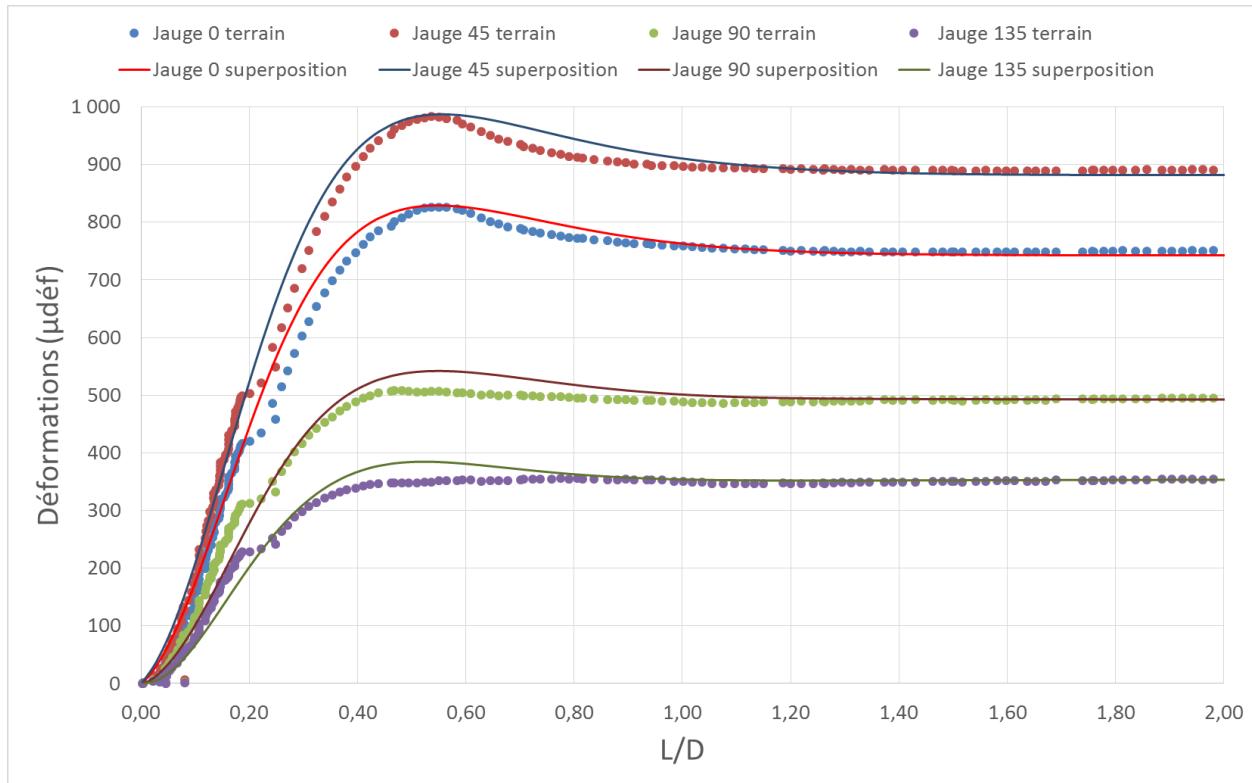


Figure 4.106 : Mesure T3-M1 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.72 : Mesure T3-M1 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction polynomiale de  $L/D$

$S_{xx}$ (MPa)	13,00
$S_{yy}$ (MPa)	9,00
$S_{zz}$ (MPa)	-18,50
$S_{xy}$ (MPa)	-5,61
$\Sigma e^2/N$	1626
a	-0,03
b	1,00
c	0,18
d	0,00

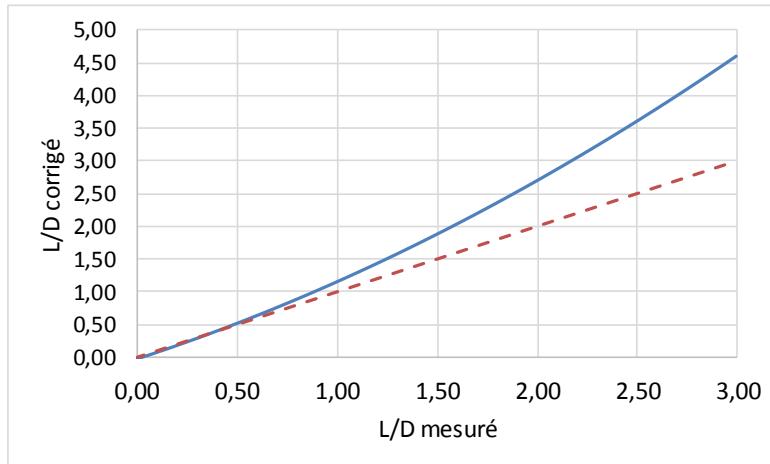


Figure 4.107 : Mesure T3-M1 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

### Mesure T3-M2 : méthode RPR

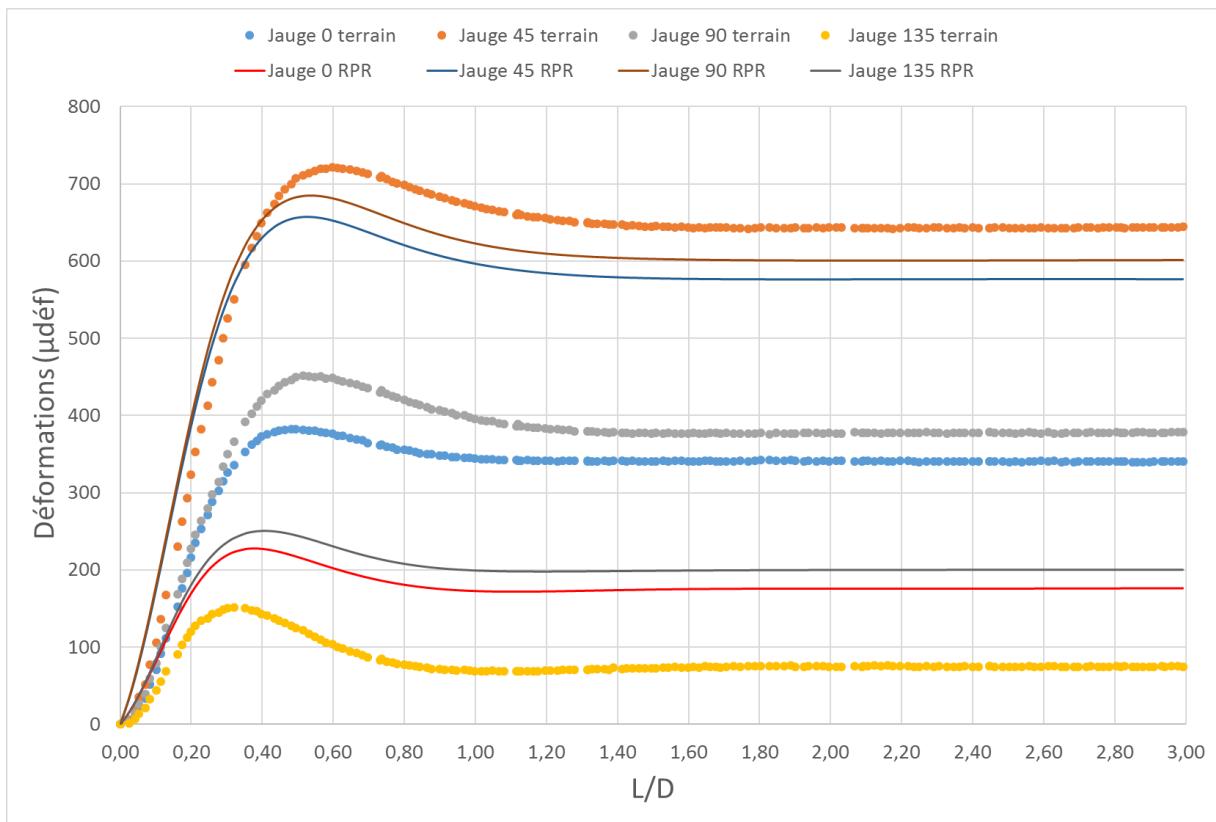


Figure 4.108 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.73 : Mesure T3-M2 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

$S_{XX}$ (MPa)	8,68
$S_{YY}$ (MPa)	19,86
$S_{ZZ}$ (MPa)	-3,10
$S_{XY}$ (MPa)	-3,52
$\Sigma e^2/N$	61 278

### Mesure T3-M2 : méthode inverse conventionnelle

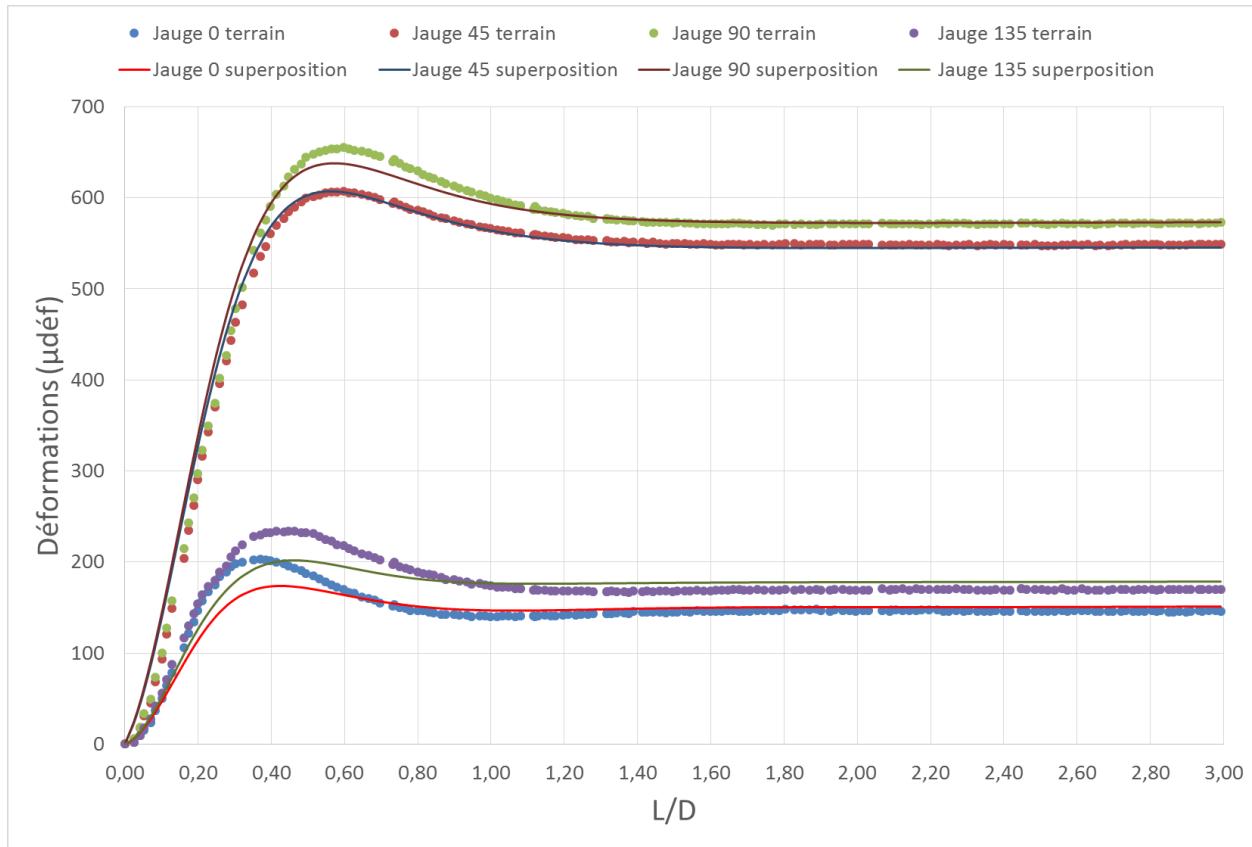


Figure 4.109 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.74 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	3,74
$S_{YY}$ (MPa)	15,48
$S_{ZZ}$ (MPa)	-12,63
$S_{XY}$ (MPa)	4,07
$\Sigma e^2/N$	768

### Mesure T3-M2 : méthode des courbes partielles

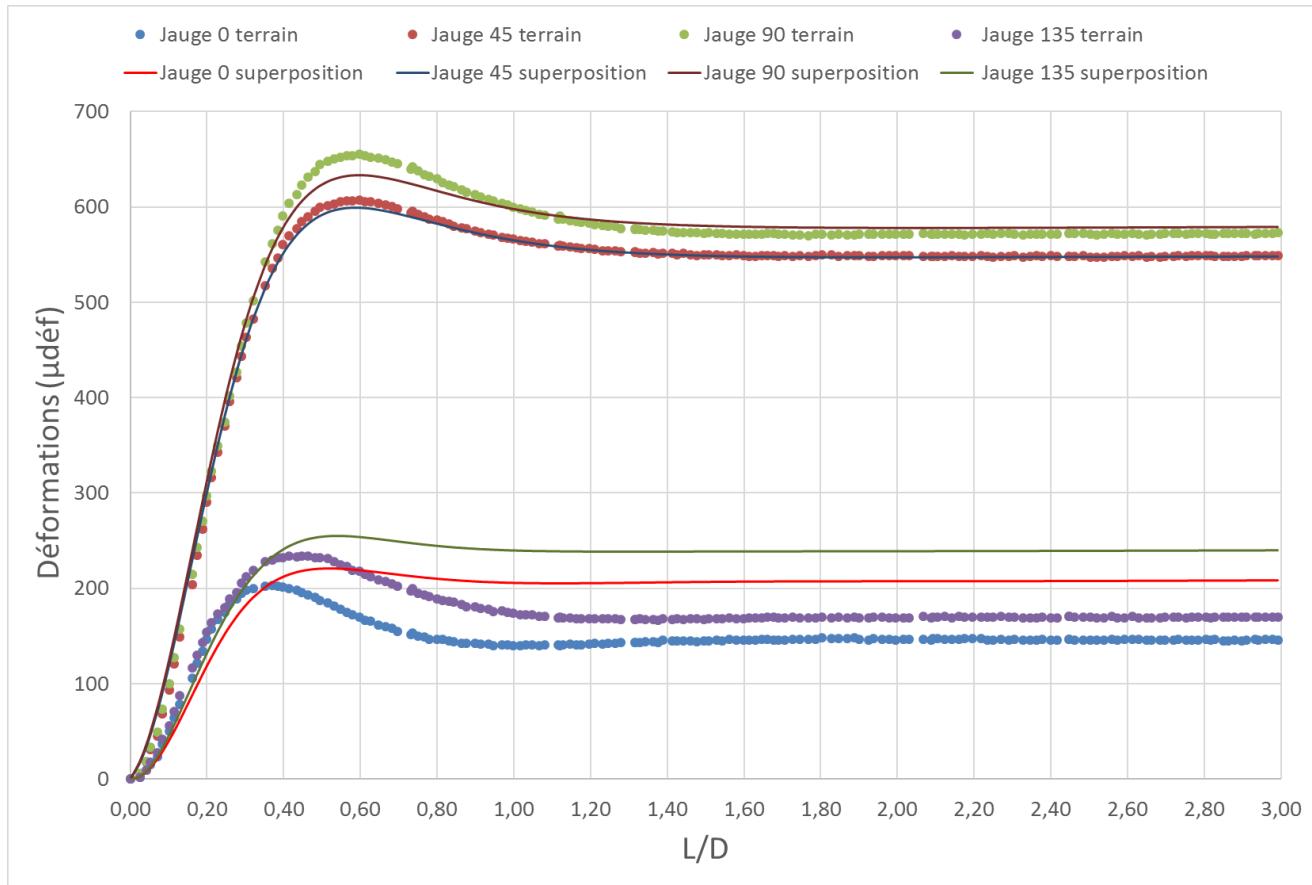


Figure 4.110 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.75 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	1,54
$S_{YY}$ (MPa)	12,74
$S_{ZZ}$ (MPa)	-20,43
$S_{XY}$ (MPa)	-1,30
$\Sigma e^2/N$	1023

### Mesure T3-M2 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

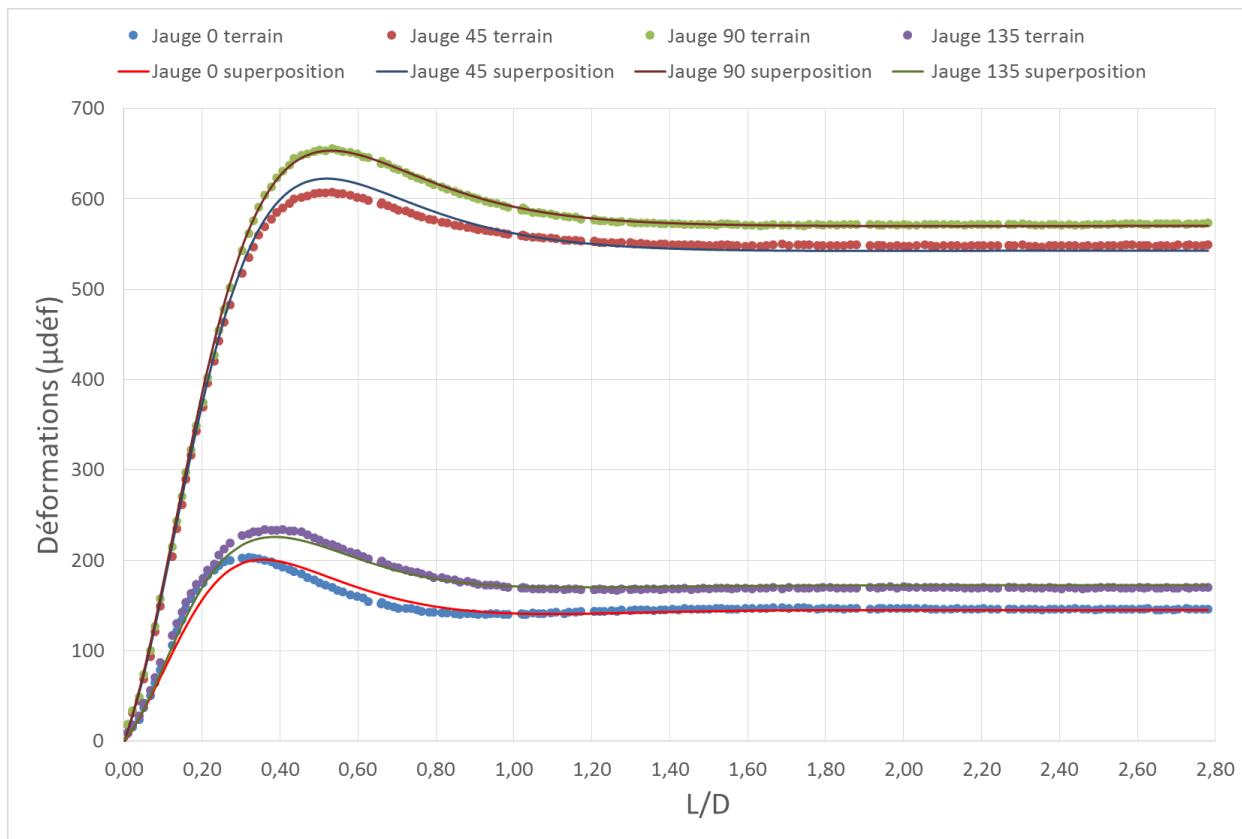


Figure 4.112 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D

Tableau 4.76 : Mesure T3-M2 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction linéaire de L/D

$S_{xx}$ (MPa)	15,62
$S_{yy}$ (MPa)	12,76
$S_{zz}$ (MPa)	-0,31
$S_{xy}$ (MPa)	-6,40
$\Sigma e^2/N$	137
a	-0,03
b	0,94

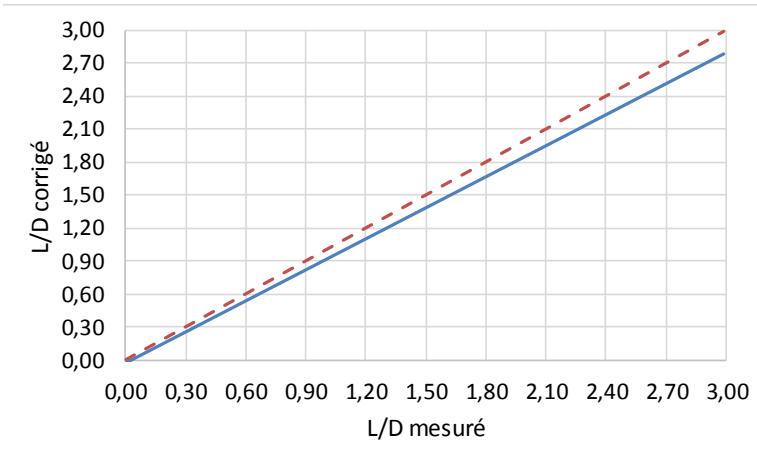


Figure 4.111 : Mesure T3-M2 – Correction linéaire effectuée  
sur L/D

### Mesure T3-M2 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

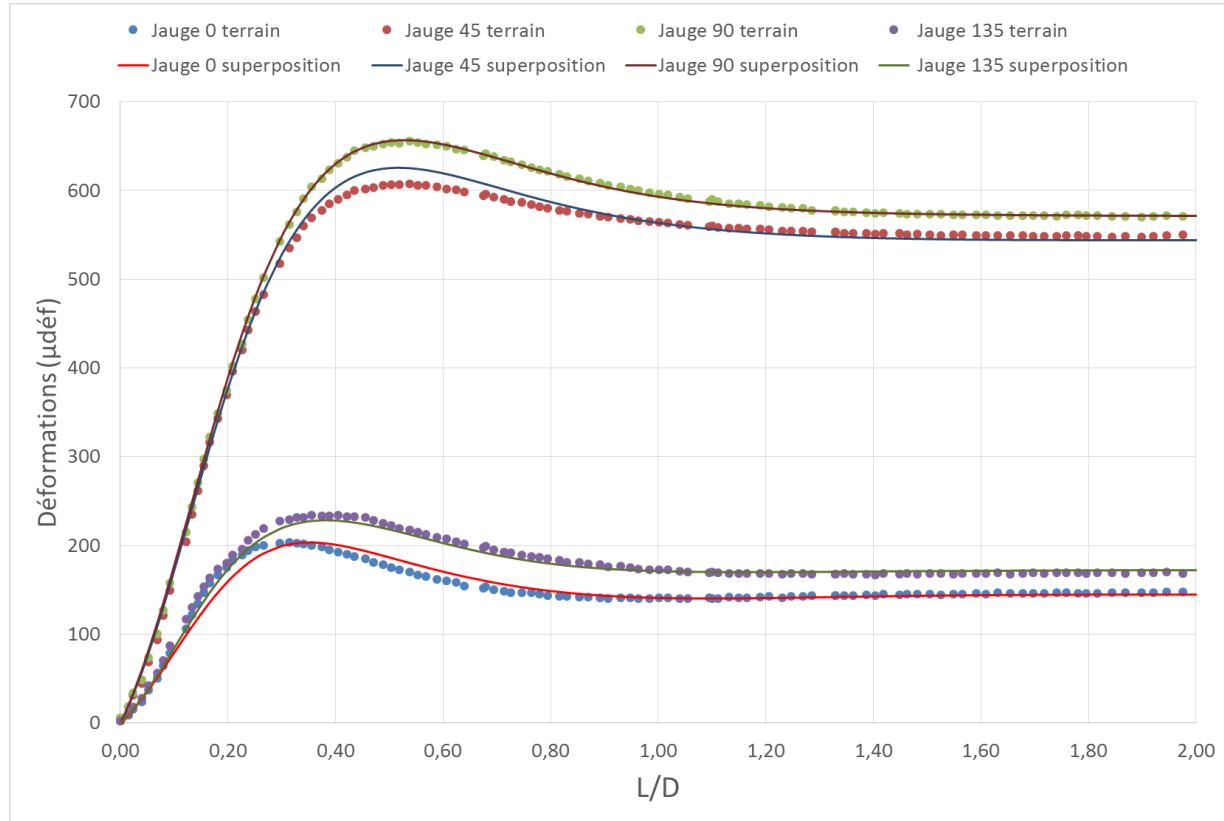


Figure 4.114 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.77 : Mesure T3-M2 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction polynomiale de  $L/D$

$S_{xx}$ (MPa)	8,10
$S_{yy}$ (MPa)	21,06
$S_{zz}$ (MPa)	0,55
$S_{xy}$ (MPa)	-1,14
$\Sigma \epsilon^2 / N$	123
a	-0,02
b	0,86
c	0,13
d	0,00

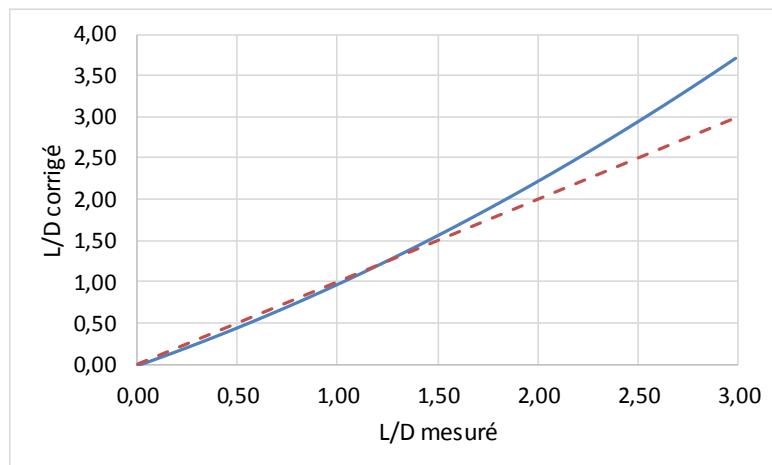


Figure 4.113 : Mesure T3-M2 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

### Mesure T3-M3 : méthode RPR

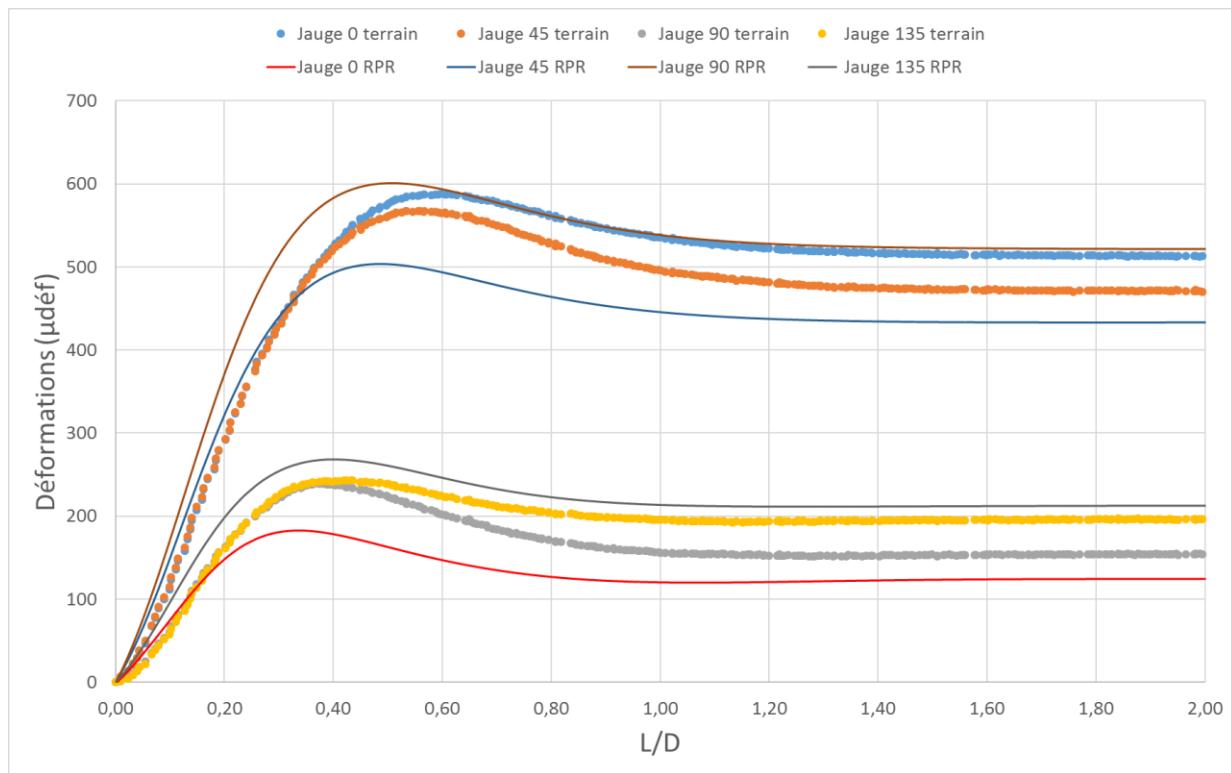


Figure 4.115 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec le tenseur partiel calculé avec la méthode RPR

Tableau 4.78 : Mesure T3-M3 - Contraintes calculées avec la méthode RPR

S <sub>XX</sub> (MPa)	12,94
S <sub>YY</sub> (MPa)	27,30
S <sub>ZZ</sub> (MPa)	-4,50
S <sub>XY</sub> (MPa)	0,30
$\Sigma e^2/N$	395 277

### Mesure T3-M3 : méthode inverse conventionnelle

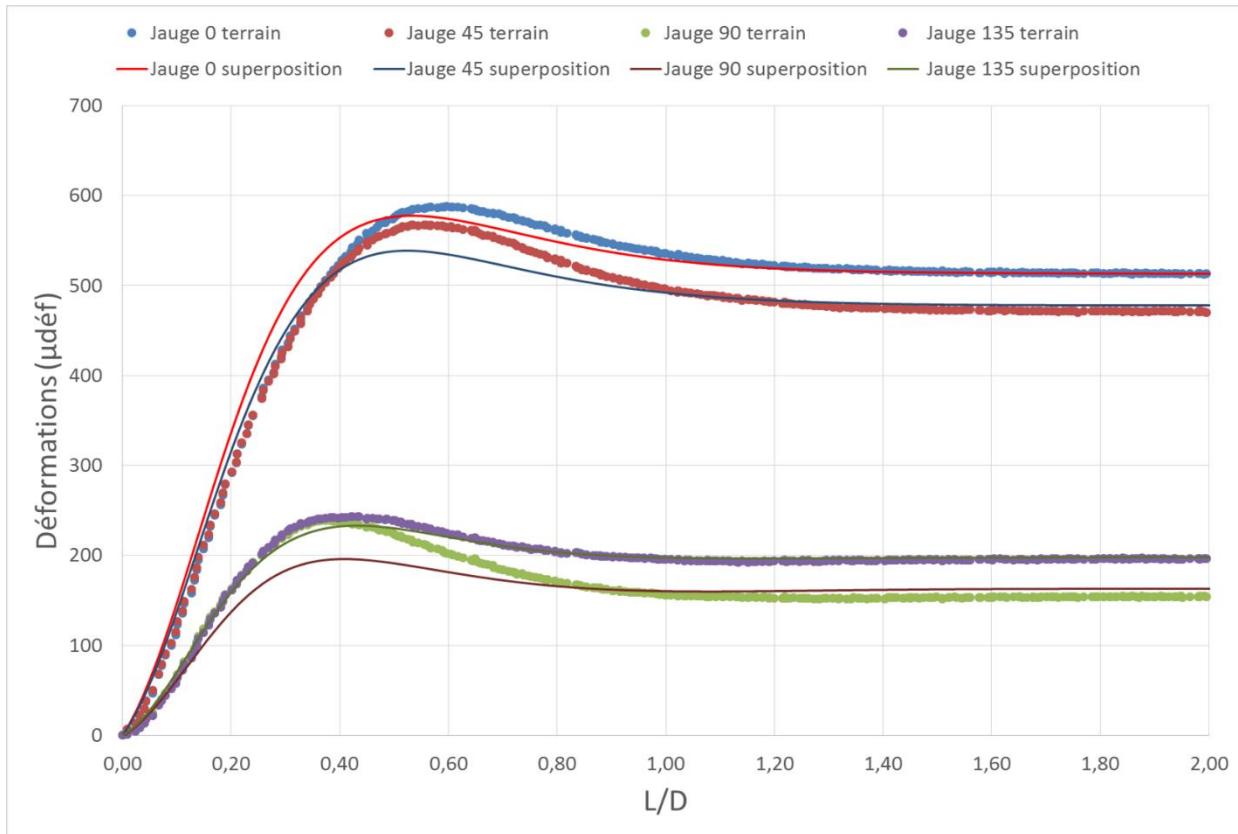


Figure 4.116 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode inverse conventionnelle

Tableau 4.79 : Mesure T3-M3 - Contraintes estimées avec la méthode inverse conventionnelle

$S_{XX}$ (MPa)	14,10
$S_{YY}$ (MPa)	5,62
$S_{ZZ}$ (MPa)	-6,41
$S_{XY}$ (MPa)	3,04
$\Sigma e^2/N$	610

### Mesure T3-M3 : méthode des courbes partielles

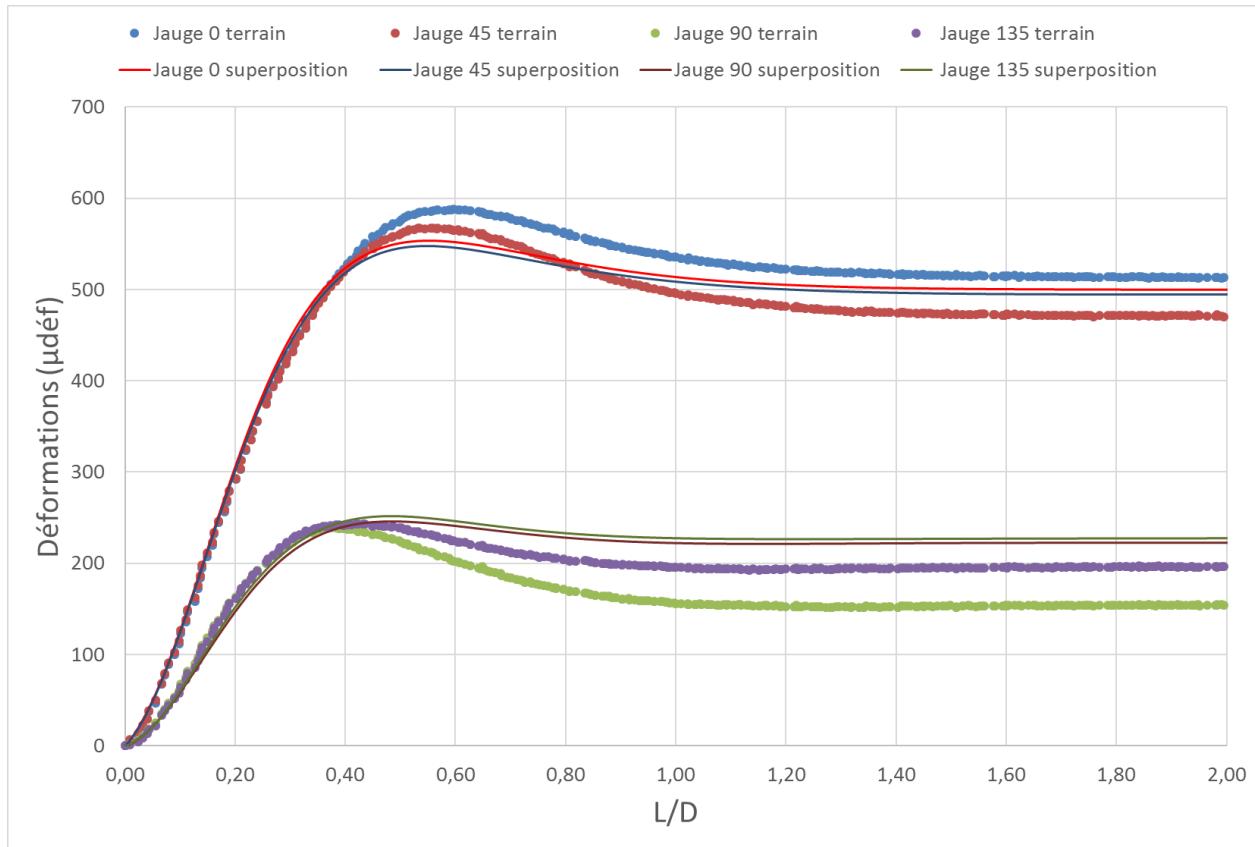


Figure 4.117 : Mesure T3-M2 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues avec la méthode des courbes partielles

Tableau 4.80 : Mesure T3-M2 - Contraintes estimées avec la méthode des courbes partielles

$S_{XX}$ (MPa)	11,42
$S_{YY}$ (MPa)	4,66
$S_{ZZ}$ (MPa)	-12,41
$S_{XY}$ (MPa)	2,93
$\Sigma e^2/N$	456

### Mesure T3-M3 : méthode inverse avec correction linéaire de l'avancement

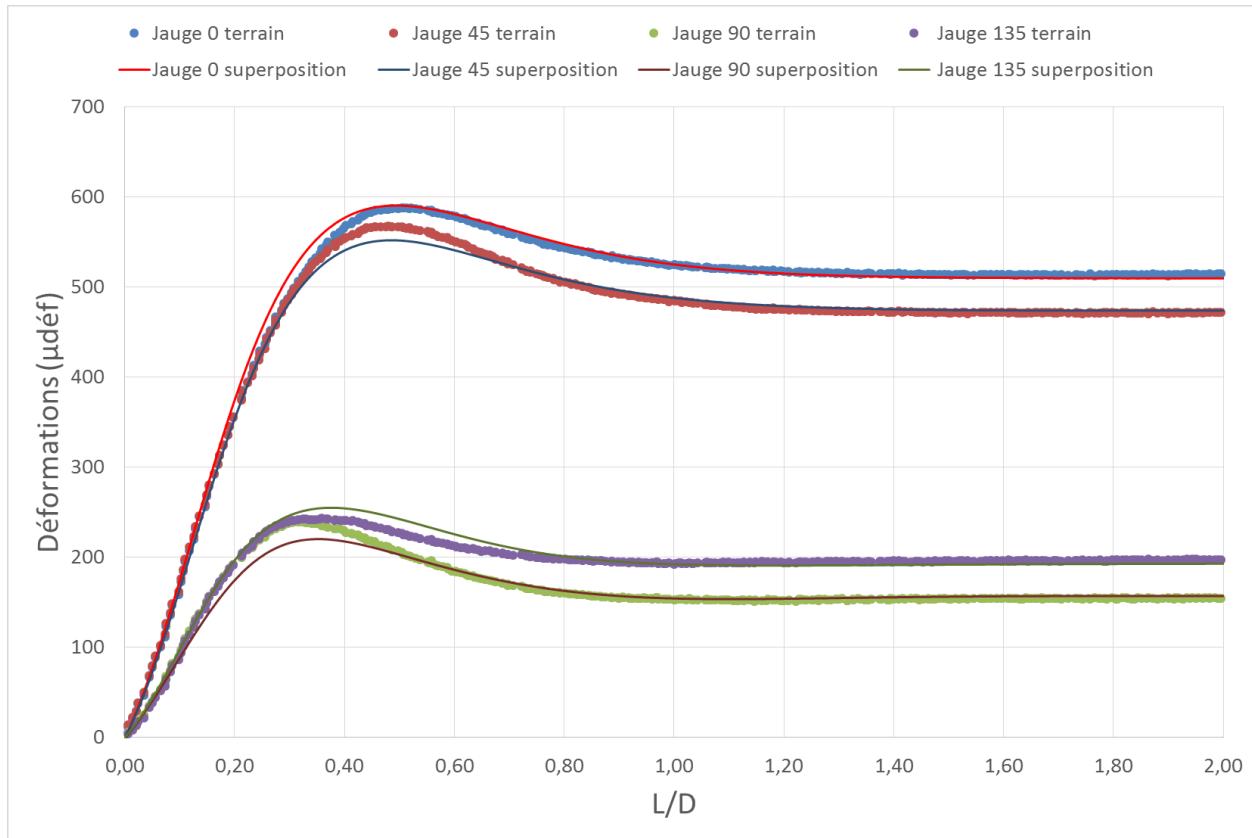


Figure 4.118 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction linéaire de L/D

Tableau 4.81 : Mesure T3-M3 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction linéaire de L/D

$S_{xx}$ (MPa)	17,85
$S_{yy}$ (MPa)	9,26
$S_{zz}$ (MPa)	2,28
$S_{xy}$ (MPa)	3,05
$\Sigma e^2/N$	163
a	-0,01
b	0,88

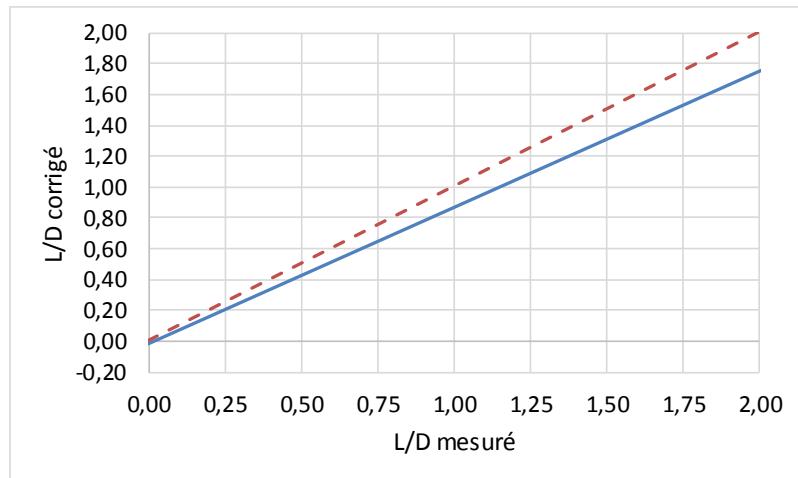


Figure 4.119 : Mesure T3-M3 – Correction linéaire effectuée sur L/D

### Mesure T3-M3 : méthode inverse avec correction polynomiale de l'avancement

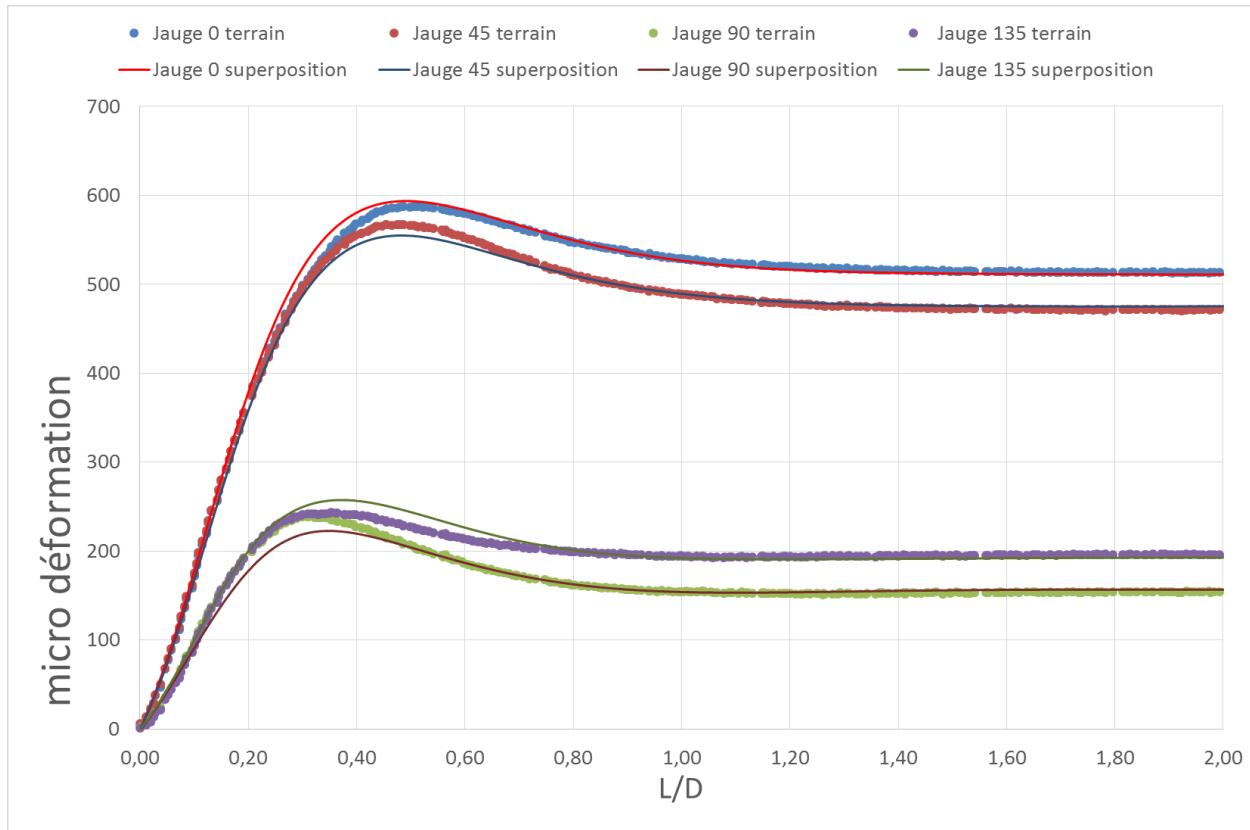


Figure 4.121 : Mesure T3-M3 – Superposition des courbes de terrain et des courbes obtenues de la méthode inverse avec une correction polynomiale de  $L/D$

Tableau 4.82 : Mesure T3-M3 -  
Contraintes estimées de la  
méthode inverse avec une  
correction polynomiale de  $L/D$

$S_{XX}$ (MPa)	18,21
$S_{YY}$ (MPa)	9,57
$S_{ZZ}$ (MPa)	2,97
$S_{XY}$ (MPa)	3,06
$\Sigma e^2/N$	149
a	-0,01
b	0,80
c	0,13
d	0,00

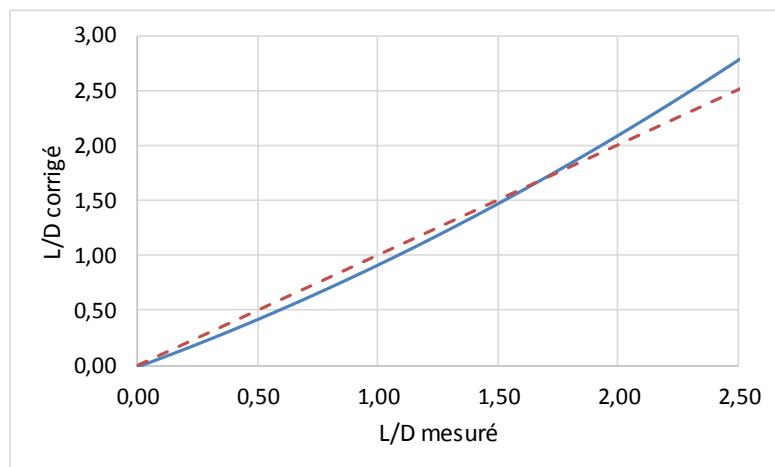


Figure 4.120 : Mesure T3-M3 – Correction polynomiale effectuée sur  $L/D$

Puisque les vraies valeurs des composantes sont inconnues, les différentes composantes trouvées selon les méthodes appliquées sont présentées sur les figures 4.122 à 4.125 afin de faciliter la comparaison. La première composante de chaque mesure est la contrainte trouvée avec la méthode RPR. Ces figures permettent aussi de vérifier si les contraintes trouvées avec une méthode sont semblables par forage. Les tableau E.1 à E.4 contiennent les valeurs présentes dans ces figures.

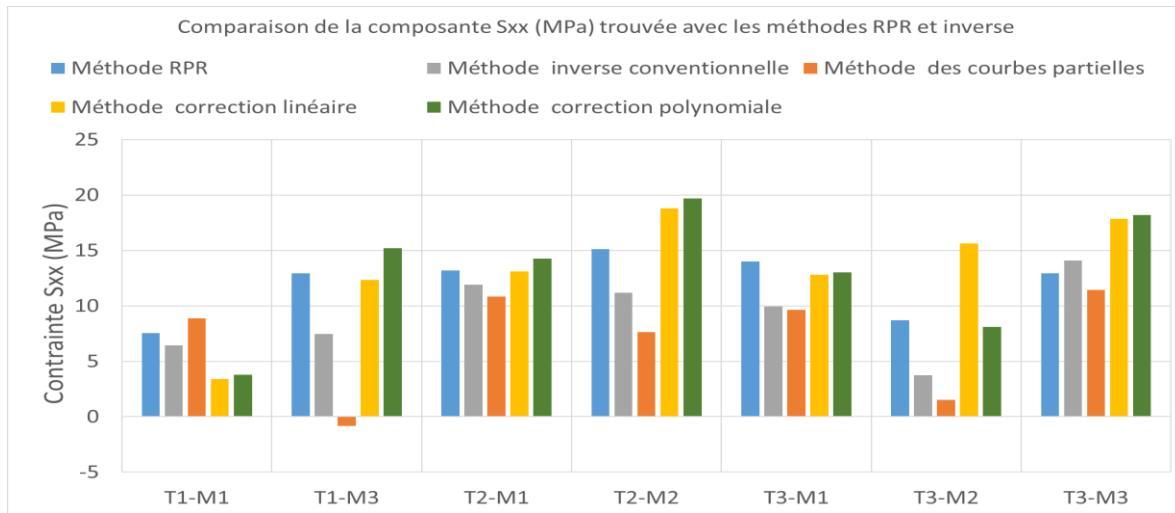


Figure 4.122 : Comparaison de la composante Sxx trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Beta

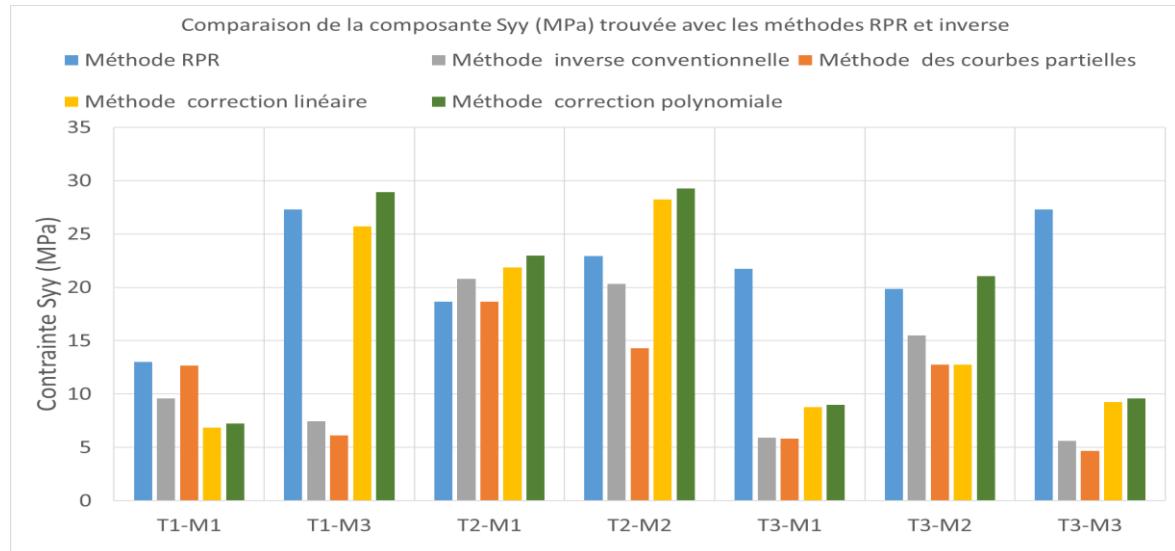


Figure 4.123 : Comparaison de la composante Syy trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Beta

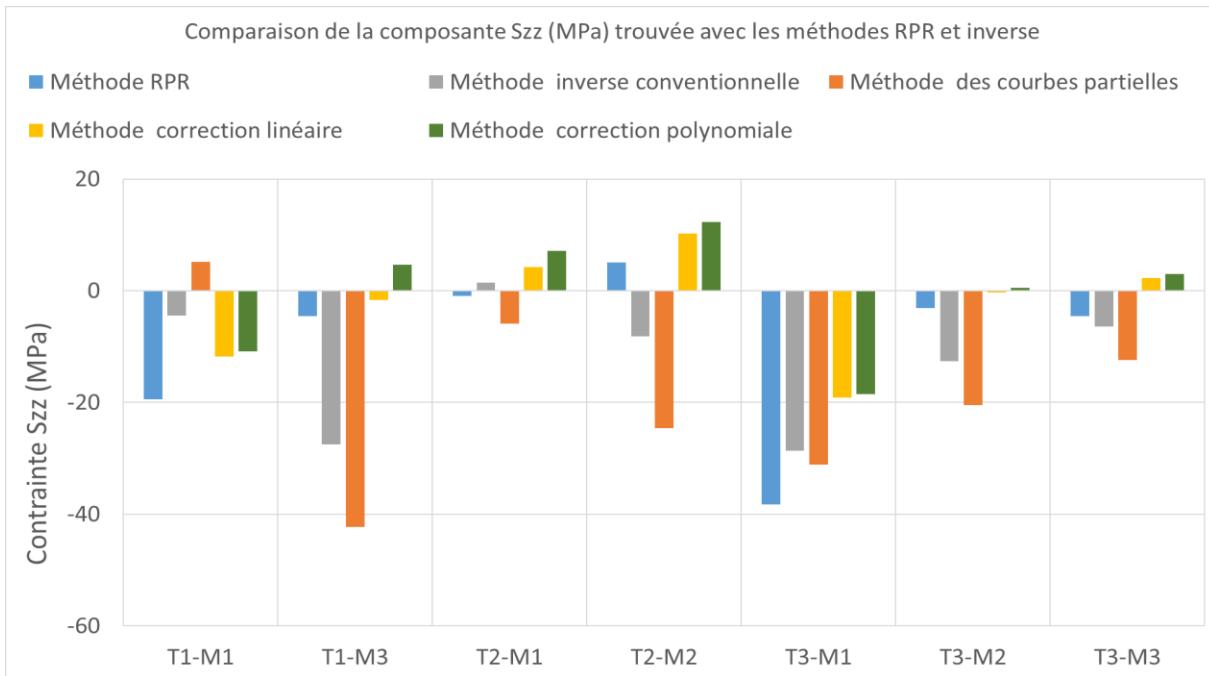


Figure 4.124 : Comparaison de la composante Szz trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Beta

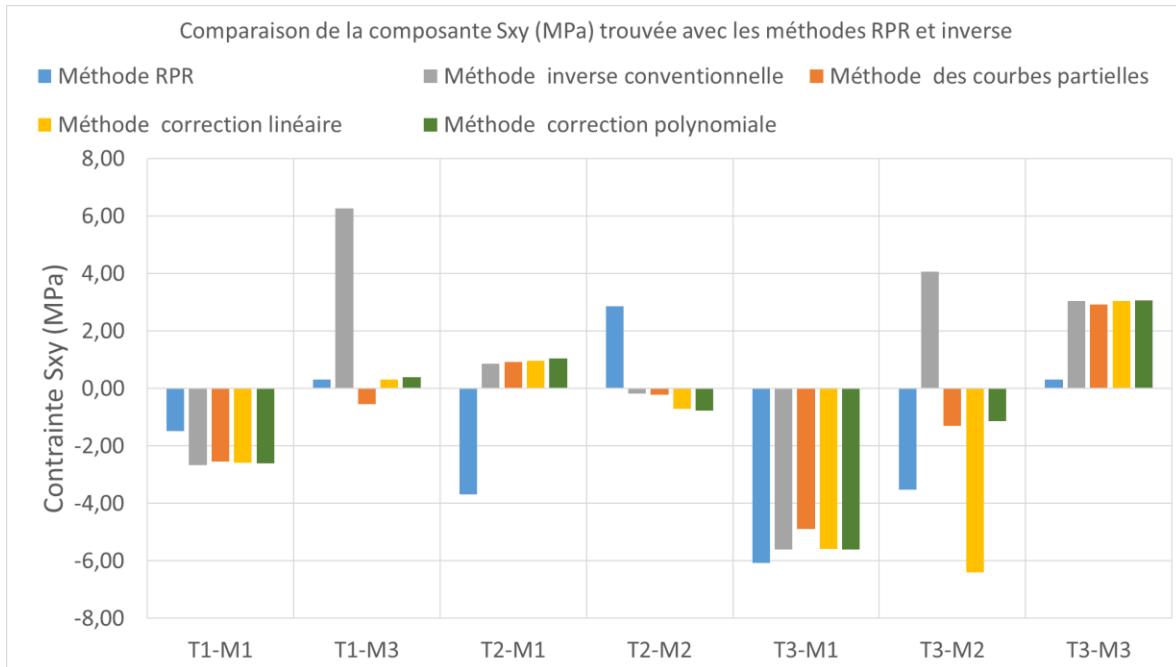


Figure 4.125 : Comparaison de la composante Sxy trouvée avec la méthode RPR et la méthode inverse, mine Beta

La figure 4.126 illustre le résidu normalisé par méthode d'interprétation pour chaque mesure. Puisque la méthode RPR donne des erreurs très élevées, celles-ci sont enlevées et la figure 4.127 est créée afin de présenter les erreurs des autres méthodes d'interprétation pour évaluer la juxtaposition des courbes de déformations. Les différentes valeurs de résidus normalisés par mesures et méthodes d'interprétation sont montrées dans le tableau E.5.

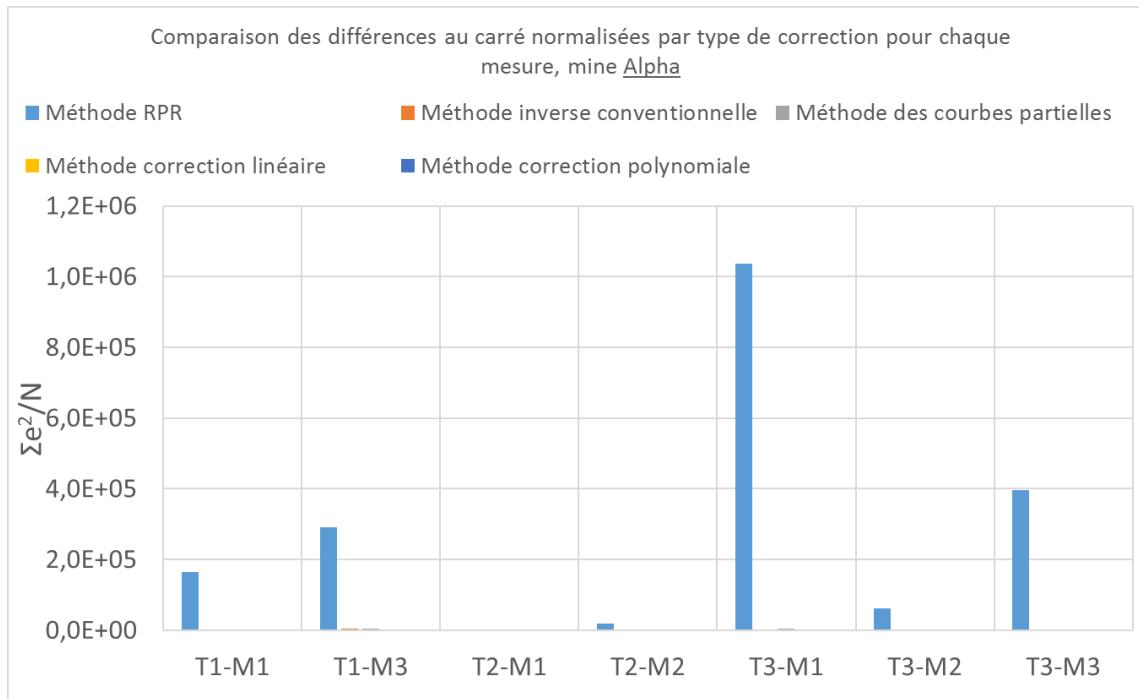


Figure 4.126 : Résidus normalisées par type de correction pour chaque mesure, mine Beta

Étant donné la valeur élevée des différents RPR, supérieur à 0,84, une méthode hybride qui combine les tenseurs bidimensionnels partiels trouvés avec la méthode conventionnelle et les tenseurs tridimensionnels trouvés avec la méthode RPR est utilisée pour trouver le tenseur 3D à six composantes. Pour ce faire, les tenseurs bidimensionnels des mesures T1-M1, T1-M3, T3-M1 et T3-M2 sont utilisés avec les tenseurs tridimensionnels trouvés avec la méthode RPR pour les mesures T2-M1, T2-M2 et T3-M3. Toutefois, le tenseur 3D trouvé avec la méthode RPR appliquée avec toutes les mesures est présenté. Les différentes composantes des tenseurs tridimensionnels trouvées par méthode d'interprétation sont montrées sur la figure 4.128. Cette figure est créée à partir du tableau F.6, situé dans l'annexe F.

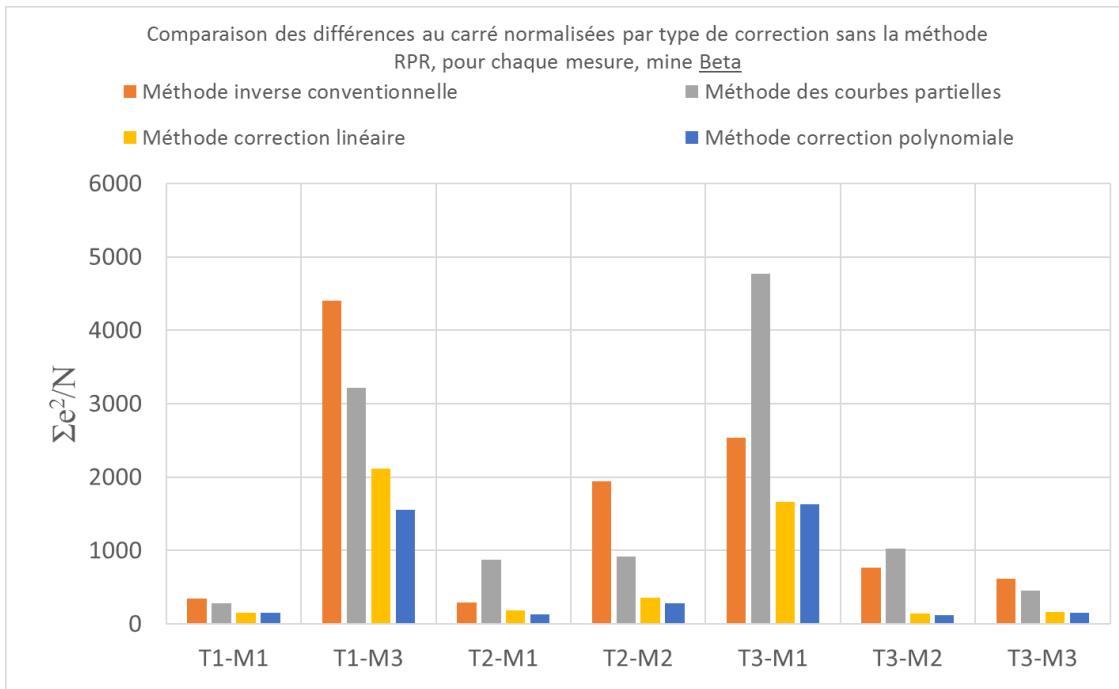


Figure 4.127 : Comparaison des différences au carré normalisées par type de correction sans la méthode RPR, pour chaque mesure, mine Beta

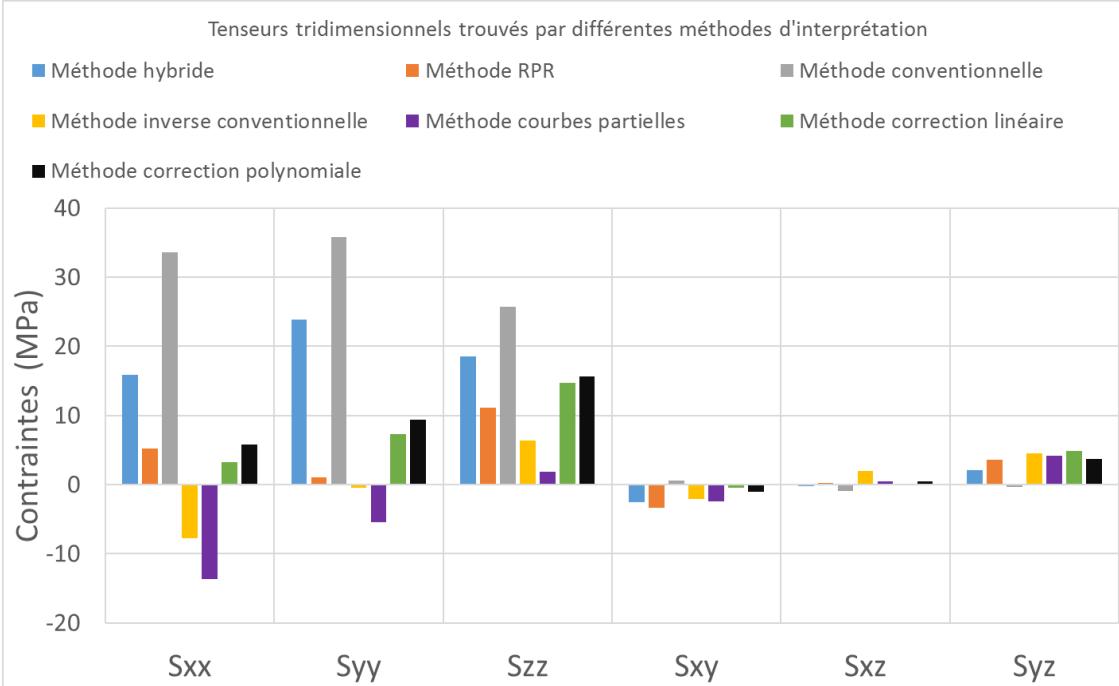


Figure 4.128 : Comparaison des différents tenseurs tridimensionnels trouvés par méthode d'interprétation, mine Beta

### 4.3 Synthèse des résultats

À la lumière des résultats présentés dans ce chapitre, la correction de L/D diminue le résidu normalisé. Comme les courbes de récupération de terrain peuvent comporter des biais inconnus, le tenseur de contraintes qui minimise les résidus normalisés  $\Sigma e^2/N$  n'est pas nécessairement celui qui est le plus près du tenseur réel, mais à défaut de le connaître, le résidu minimal est un bon indicateur de qualité du tenseur. Pour la mine Alpha, les tenseurs tridimensionnels trouvés avec les méthodes RPR et inverse avec correction polynomiale sont comparables. Pour la mine Beta, la différence relative entre les tenseurs 3D reste élevée entre la méthode hybride et la méthode inverse avec correction. Le signe des contraintes *in situ* trouvées avec la méthode inverse est toujours le même que ceux obtenus avec la méthode RPR. L'enlèvement de la mesure T2-M2, pour la mine Alpha, n'a pas eu un impact important sur le tenseur tridimensionnel. Malgré cela, il est mieux d'avoir plusieurs mesures pour déterminer le tenseur 3D que d'avoir seulement les deux mesures minimales demandées pour la méthode RPR afin de donner un tenseur le plus représentatif. Il est important de souligner qu'une différence relative faible entre le tenseur 3D trouvé avec les méthodes RPR et inverse n'est pas une preuve que le tenseur trouvé représente le tenseur présent sur le terrain. La différence relative entre la méthode RPR et la méthode inverse a augmenté avec les corrections de L/D. Cependant, puisque les courbes superposées sont plus proches des courbes de terrain, le tenseur 3D doit représenter davantage le tenseur en place que celui obtenu avec la méthode RPR tel que démontré dans la section 3.2.6.

Des différences entre les valeurs mesurées et les valeurs réelles de L/D sont possibles tel qu'expliqué dans la méthodologie (Corthésy & Leite, 2016). La correction apportée sur L/D a permis aux courbes synthétiques d'épouser davantage les courbes de terrain. La contrainte  $S_{zz}$  est sous-évaluée de manière générale avec la méthode inverse conventionnelle. Les coefficients de Poisson des échantillons variant entre 0.01 et 0.24, l'étude de sensibilité sur L/D effectuée par Vézina (2014) est vérifiée ainsi que les conclusions de Hakala, Hudson et Christiansson (2003) sur la grande sensibilité de la méthode inverse vis-à-vis le lien entre les déformations et les avancements. Ces derniers auteurs ont aussi évoqué l'hétérogénéité de la roche et les variations de température comme étant néfastes pour les méthodes d'interprétation. Ces deux paramètres sont partiellement pris en compte par la méthodologie proposée par Corthésy (1982) et Gill et al. (1987).

## CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

### 5.1 Discussion des résultats

Puisque le tenseur tridimensionnel réel présent sur le terrain est inconnu, il est impossible d'affirmer que la méthode inverse donne de bons ou mauvais résultats. Il est seulement possible de dire que les tenseur trouvés donnent des valeurs plausibles une fois que la correction de l'avancement est effectuée en comparant ceux-ci avec les tenseurs obtenus avec différentes méthodes d'interprétation existantes. Pour des mesures prises individuellement, le seul indicateur disponible est l'ajustement des données de terrain aux données générées par la méthode inverse lorsque les courbes de terrain ne présentent pas d'anomalies. Selon les travaux de Vézina (2014), les courbes de déformations générées avec la méthode inverse se juxtaposent parfaitement avec les courbes synthétiques lorsque le tenseur estimé est le même que le tenseur utilisé pour créer lesdites courbes. Lorsque des déformations de terrain sont utilisées avec la méthode inverse pour déterminer le tenseur et que les courbes estimées ne se juxtaposent pas correctement aux courbes de terrain, il est normal de se questionner sur l'exactitude du tenseur estimé. En excluant les erreurs expérimentales, plusieurs phénomènes ayant un effet sur les courbes de récupération ne sont pas pris en compte par la méthode inverse développée par Vézina (2014). Le fait d'utiliser un angle  $\delta$  nul au lieu de l'angle réel a déjà été énoncé tout comme la possibilité d'avoir une mauvaise mesure de l'avancement du forage. Les hypothèses à la base des méthodes d'interprétation de la cellule doorstopper modifiée sont que les déformations mesurées sont ponctuelles, que le tenseur présent dans le massif est constant, que la roche impliquée dans le relâchement des contraintes suit un comportement élastique linéaire et qu'elle soit homogène. Lorsque l'une de ces hypothèses n'est pas vérifiée, il est normal que les méthodes d'interprétation ne donnent pas le tenseur réel et que par le fait même, les courbes estimées ne se juxtaposent pas parfaitement aux courbes de terrain. L'endommagement de la roche pendant la saignée pourrait jouer un rôle important sur les tenseurs estimés de la mine Beta, toutefois les recharges des carottes récupérées montrent un comportement élastique et la roche ne semble pas endommagée. Le fait de considérer le matériau homogène lorsque celui-ci est en fait de nature hétérogène est une source d'erreur envisageable, bien que la méthodologie utilisée tende à corriger une partie de ce phénomène avec l'utilisation d'un matériau anisotrope équivalent. L'utilisation d'un modèle anisotrope équivalent est efficace pour établir correctement les relations contraintes-déformations sous les jauge mais ne permet pas de tenir compte des effets de l'hétérogénéité sur l'ensemble de la courbe de récupération.

La proposition faite par Ouellet (2012) sur l'amélioration de l'équation permettant de calculer le coefficient de Poisson ayant été suivie, il serait préférable d'entrer dans le modèle deux valeurs différentes de coefficient de Poisson afin de représenter le matériau composant la carotte le plus proche possible d'un matériau orthotrope. Pour ce faire, des modifications aux essais en laboratoire permettraient de déterminer ce second coefficient. De plus, bien que la correction de l'avancement ait permis de diminuer la grandeur des résidus normalisés, le type d'équation utilisé pour cette correction pourrait être optimisé.

Pour les corrections qui transforment de 10% et moins l'avancement L/D, une erreur expérimentale est plausible selon les observations faites sur le terrain. (Corthésy & Leite, 2016) L'amplitude de certaines corrections de l'avancement présentées au chapitre précédent est peu justifiable. En effet, certaines corrections, telles que les mesures T2-M3 et T3-M1 de la mine Alpha, diminuent ou augmentent L/D de plus de 20%, selon le type de correction. Ces écarts importants sont en partie causés par le manque de flexibilité offert par les polynômes utilisés. Tel que démontré à la section 3.2, des phénomènes non pris en compte par le modèle 3D peuvent aussi être responsables de la mauvaise juxtaposition des courbes de déformations.

## 5.2 Phénomènes extérieurs

Les phénomènes étudiés dans ce travail pouvant avoir une influence sur le tenseur trouvé par la méthode inverse, sont : la température, la pression de l'eau ou de la foreuse, la considération que  $v_{xy}$  et  $v_{xz}$  ne soient pas égaux sur la face de mesure et l'effet de l'hétérogénéité. L'effet de chacun de ces éléments sur la méthode inverse est évalué séparément.

La variation de température est un phénomène qui a une influence sur les contraintes estimées. Cependant, une correction liée à celle-ci est faite avant l'utilisation des déformations par les méthodes d'interprétation. Cette correction est effectuée comme proposé par Hakala, Hudson et Christiansson (2003) et auparavant par Gill et al. (1987). De plus, les variations de température telles que montrées sur le tableau 5.1 pour les deux mines sont plutôt faibles (à part T3M1 mine Alpha), ce qui permet d'éliminer les variations de température comme une source importante d'erreur sur les mesures.

Tableau 5.1 : Variations de températures maximales pendant toute la durée de la saignée

Variations de température maximales pendant la saignée (°C)			
Mine Alpha		Mine Beta	
T1-M3	1,38	T1-M1	4,85
T1-M6	1,31	T1-M3	1,98
T1-M7	1,57	T2-M1	0,88
T2-M1	1,09	T2-M2	1,2
T2-M3	1,79	T3-M1	1,25
T3-M1	11,26	T3-M2	0,93
T3-M2	1,82	T3-M3	1,91
T3-M3	0,96		

Pour vérifier l'influence de la pression d'eau sur la méthode inverse, une pression normale de 1.0 MPa est appliquée uniformément sur toutes les faces libres d'une carotte créée par surcarottage. Ceci représente un cas extrême. Afin de vérifier les conséquences sur le tenseur trouvé, les déformations liées à la pression d'eau sont ajoutées à des déformations synthétiques obtenues de Comsol pour un tenseur quelconque. La méthode inverse est ensuite utilisée pour trouver le tenseur appliqué dans le modèle. La figure 5.1 montre les déformations normalisées aux jauge occasionnées par la pression d'eau pour différents v sur des carottes isotropes ayant un module de Young de 20 GPa en l'absence de contraintes in situ. La normalisation est faite autant pour le module de Young que pour la grandeur de la pression d'eau. Ces déformations sont négatives étant donné la convention de signe des équations 3.1. Si la carotte était anisotrope, les déformations  $\varepsilon_0$  et  $\varepsilon_{90}$  seraient différentes.

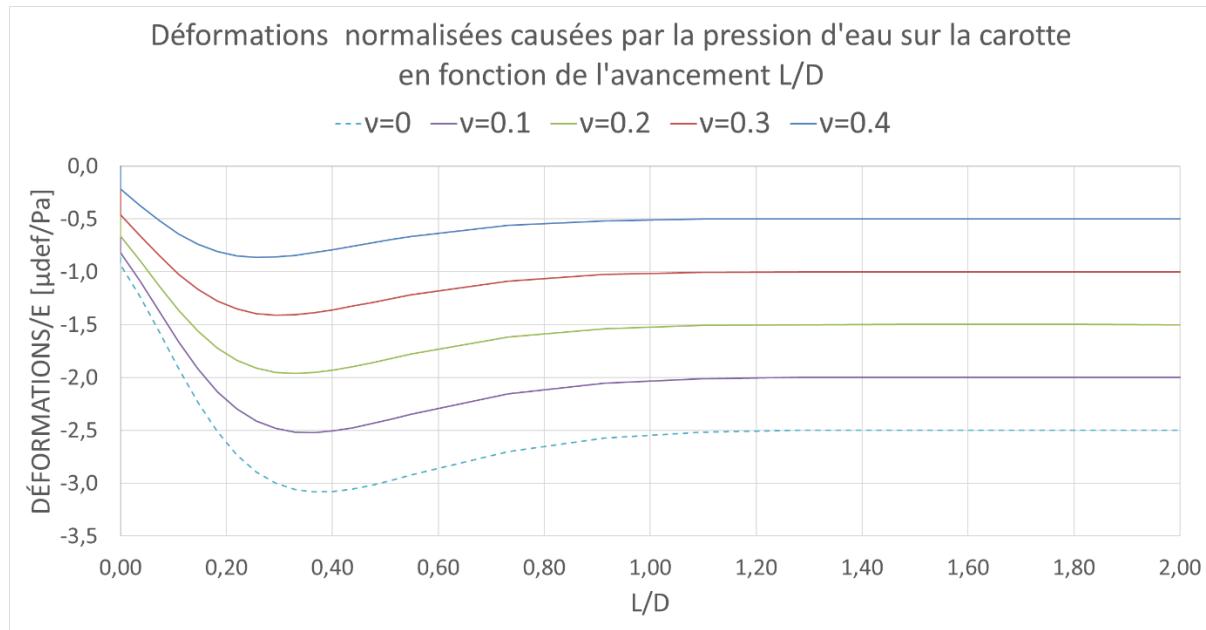


Figure 5.1 : Déformations normalisées causées par la pression d'eau

L'analyse des résultats pour des carottes isotropes et anisotropes a montré que les contraintes trouvées étaient toutes diminuées d'approximativement 1.0 MPa par rapport à leur valeur d'entrée dans le modèle. La pression d'eau n'explique donc pas les tenseurs trouvés avec la méthode inverse. De plus, il est peu probable que cette situation se produise sur le terrain étant donné que le forage est incliné de manière à évacuer l'eau, il n'y a donc pas de pression d'eau associée à la gravité et le débit injecté pendant la saignée est minimal. Ceci fait en sorte que, si la circulation d'eau n'est pas gênée par des obstructions dans les ouvertures du taillant, il est peu probable que la pression d'eau puisse atteindre des valeurs ayant un effet significatif sur les courbes de récupération. Finalement, à la fin de la saignée, l'injection d'eau est interrompue et on ne voit pas d'effet lié à cela sur les courbes de récupération.

L'effet de la poussée du taillant sur le tenseur trouvé avec la méthode inverse est le second phénomène étudié. La pression du taillant est simulée dans le modèle en appliquant une pression sur le fond de trou où le taillant s'appuie sur la roche pendant la saignée. Cette pression est orientée selon l'axe Z du modèle et est fixée à une valeur de 1.0 MPa pour vérifier son influence sur le tenseur calculé. La figure 5.2 présente les déformations normalisées par rapport au module de Young lues aux jauge pendant la saignée sur des carottes isotropes de différents coefficients de Poisson. Si la carotte était anisotrope, les déformations  $\varepsilon_0$  et  $\varepsilon_{90}$  seraient différentes.

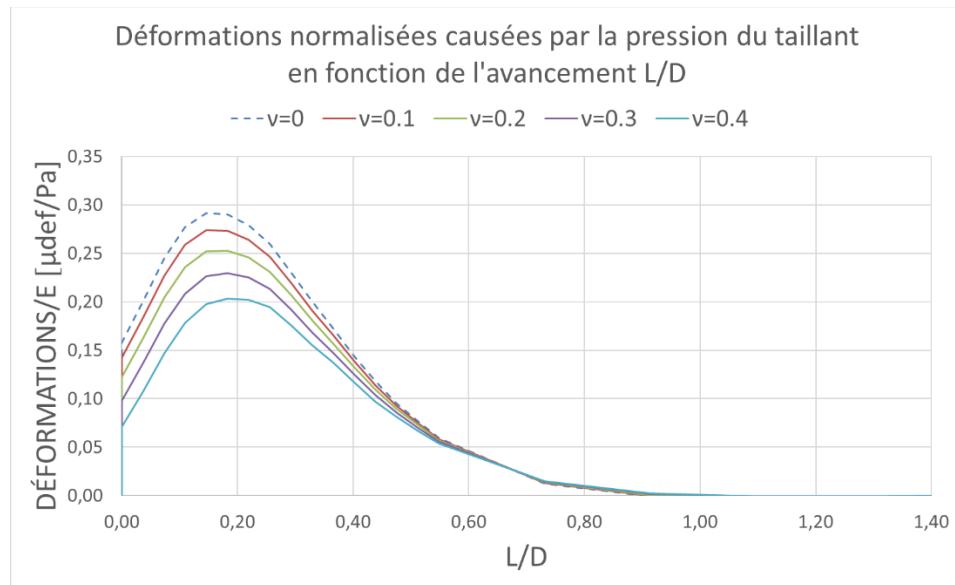


Figure 5.2 : Déformations normalisées liées à la poussée de la foreuse

Les déformations pendant la saignée sont positives et tendent vers zéro pour une valeur L/D d'environ 1.0. Des valeurs positives représentent un allongement des jauge donc une mise en tension du fond de trou si les contraintes in situ sont nulles. À contraintes et modules de Young égaux, les déformations générées par le taillant sont plus faibles que les déformations liées à la pression d'eau. Il s'ensuit qu'à pression égale, leur impact sur le tenseur trouvé avec la méthode inverse est plus faible que celui de l'eau. La différence entre les contraintes trouvées et les contraintes appliquées est inférieure à 0.5 MPa pour les matériaux isotropes et anisotropes. En réalité, la pression du taillant est contrôlée par le foreur, ceci fait en sorte que la pression appliquée n'est pas constante et lorsque celle-ci est élevée, les courbes de déformations récupérées montrent des signes de pression irrégulière comme pour la mesure T3-M1 de la mine Alpha. Il est donc possible pendant la vérification des courbes récupérées de voir si ce phénomène s'est produit.

L'effet de considérer que  $v_{xy}$  et  $v_{xz}$  ne soient pas égaux pour le calcul des contraintes avec la méthode inverse est ensuite étudié. Rappelons que la procédure de recharge des carottes en laboratoire ne permet pas pour le moment de déterminer individuellement ces deux paramètres.

Le modèle de Ouellet (2012) est modifié pour les cas de matériaux orthotropes présentés dans le tableau 5-2. Le degré d'anisotropie varie entre 1 et 2 et les coefficients de Poisson ont deux valeurs

possibles afin d'évaluer cet effet sur le tenseur partiel. Étant donné que  $E_1$  est plus élevé que  $E_2$ , par définition,  $v_{xy}$  est plus petit que  $v_{xz}$ .

Tableau 5.2 : Paramètres utilisés pour étudier l'impact de deux coefficients de Poisson différents sur la face de la carotte sur la méthode inverse

Cas	$E_1/E_2$	$v_{xz}$	$v_{xy}$
1	1,00	0,40	0,10
2	1,00	0,30	0,20
3	1,25	0,40	0,10
4	1,25	0,30	0,20
5	1,50	0,40	0,10
6	1,50	0,30	0,20
7	2,00	0,40	0,10
8	2,00	0,30	0,20

La carotte, ayant deux coefficients de Poisson différents sur la face de mesure, est utilisée pour déterminer les paramètres de déformabilité en ayant recours au modèle anisotrope équivalent. Ces paramètres sont ensuite utilisés afin d'obtenir les courbes de récupération des chargements unitaires. Le tableau 5.3 présente les paramètres de déformabilité calculés avec les modèles simulant les recharges en laboratoire.

Tableau 5.3 : Paramètres déterminés sur les carottes composées de deux  $v$  de différentes valeurs sur la face de mesure en recourant au modèle anisotrope équivalent

Cas	$E_1/E_2$	$v$
1	1,00	0,02
2	1,00	0,17
3	1,27	0,02
4	1,26	0,17
5	1,55	0,02
6	1,52	0,17
7	2,10	0,01
8	2,03	0,18

La méthode inverse est appliquée sur les déformations synthétiques obtenues d'un matériau composé de deux coefficients de Poisson différents pour un chargement quelconque. Les

contraintes relatives sont présentées dans la figure 5.3. Ceci signifie qu'une valeur inférieure à 1 équivaut à une sous-estimation et vice versa.

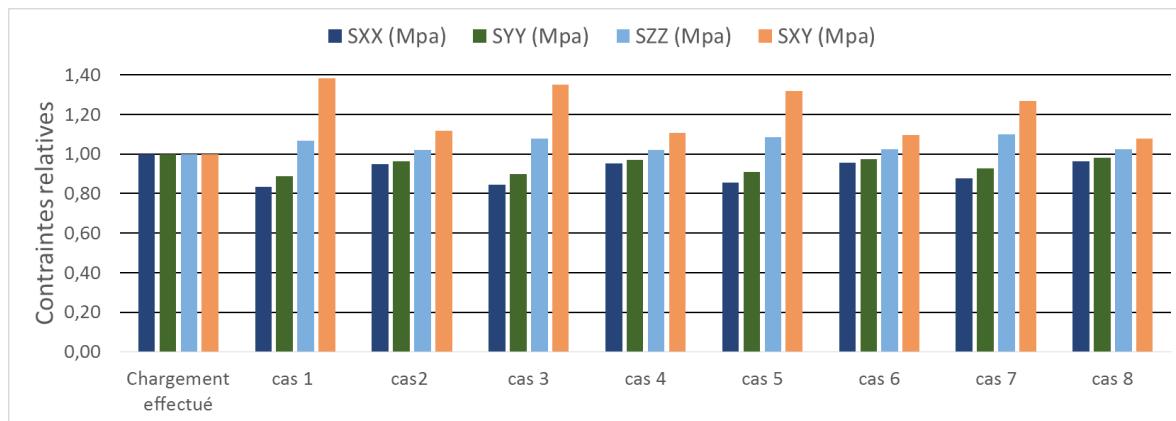


Figure 5.3 : Effet de la présence de deux coefficients de Poisson différents sur la face de la carotte

Les résultats montrent que les composantes  $S_{zz}$  et  $S_{xy}$  sont surestimées. Il est intéressant de noter que la présence de deux coefficients de Poisson distincts, mais non considérés, influence les contraintes de la même façon que l'angle  $\delta$ . En effet, dans son mémoire, Vézina (2014) établit que si l'angle  $\delta$  sur le terrain n'est pas nul, les contraintes  $S_{zz}$  et  $S_{xy}$  seront surestimées et les contraintes  $S_{xx}$  et  $S_{yy}$  sous-estimées.

Les analyses permettent aussi de remarquer que lorsque l'écart entre  $v_{xy}$  et  $v_{xz}$  est élevé, l'erreur relative sur la contrainte déterminée l'est aussi. Plus l'écart entre les deux coefficients est grand, plus le coefficient de Poisson déterminé par itération sera différent de celui utilisé dans le modèle.

En conclusion, l'effet de considérer que  $v_{xy}$  et  $v_{xz}$  ne soient pas égaux n'est pas la cause de la sous-estimation de la contrainte  $S_{zz}$  par la méthode inverse. Selon les cas analysés, sa présence sous-évalue de 15% les contraintes  $S_{xx}$  et  $S_{yy}$ , surévalue la contrainte dans l'axe du forage d'au maximum 10% ainsi que la contrainte en cisaillement de 21%.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 6.1 Conclusion

Pour conclure, la méthode inverse appliquée à des données de terrain a permis de constater l’importance de la mesure de l’avancement sur le tenseur estimé. L’utilisation de la totalité des déformations obtenues pendant la saignée a permis d’étudier certains phénomènes auparavant négligés pendant l’interprétation des déformations pour trouver les tenseurs partiels. Les méthodes d’interprétation peuvent donner de mauvais résultats si certains phénomènes se présentent sur le terrain et qu’ils ne sont pas pris en compte, peu importe la méthode. L’influence de la pression d’eau et du taillant sur la carotte est négligeable. Toutefois, la présence de deux coefficients de Poisson distincts et l’hétérogénéité de la roche ont un effet marqué. L’impact de l’hétérogénéité a été montré et les facteurs de correction moyens déterminés corrigent l’erreur sur les paramètres et les courbes de récupération, ce qui permet d’obtenir des tenseurs plus proches de ceux que l’on recherche.

### 6.2 Limitations

Les limitations de ce travail sont en grande partie liées aux hypothèses inhérentes aux méthodes d’interprétation utilisées. Le comportement transversalement isotrope est en soi une simplification du comportement anisotrope de la roche. L’utilisation du modèle anisotrope équivalent peut apporter une erreur sur les tenseurs déterminés car le nombre de paramètres de déformabilité passe de 5 à 3 pour représenter une roche transversalement isotrope, mais cette approche demeure préférable à celle voulant que l’anisotropie soit négligée.

Par rapport à l’hétérogénéité, les résultats de ce travail comportent certaines limites car les facteurs de correction de l’hétérogénéité appliqués aux contraintes composant le tenseur partiel sont trouvés grâce aux différents modèles étudiés et ces modèles comportent une morphologie simplifiée de l’hétérogénéité que l’on peut retrouver dans les roches. Le facteur de correction est un facteur moyen et approximatif pour chaque rapport de déformations trouvé avec l’essai de compression biaxiale isotrope. Cette simplification fait en sorte que les facteurs de correction trouvés peuvent ne pas donner la vraie valeur des contraintes *in situ*, toutefois leur utilisation améliore les résultats obtenus avec les modèles d’hétérogénéité utilisés. De plus, l’essai de compression biaxiale isotrope ne permet pas, pour le moment, de déterminer de quel côté du pic sur la figure 3.15 se situe un échantillon.

La séparation  $L_h/D$  exacte entre les deux matériaux, l'utilisation d'un facteur de correction moyen, les bornes minimale et maximale du rapport de déformations et l'utilisation de deux matériaux isotropes pour simuler une carotte hétérogène sont des sources possibles d'erreur.

L'influence de la présence de deux coefficients de Poisson différents sur la méthode inverse est évaluée pour un nombre limité de cas, mais ils permettent de mettre en lumière certaines tendances énoncées précédemment.

### 6.3 Recommandation

Il serait intéressant de créer un modèle simulant les déformations occasionnées par un relâchement des contraintes dans un matériau se déformant de façon non-linéaire élastique pour vérifier l'influence d'un tel comportement sur la méthode inverse. La carotte extraite de ce modèle serait ensuite soumise aux essais virtuels pour déterminer ses paramètres de déformabilité et les courbes unitaires trouvées avec ceux-ci permettraient d'appliquer le principe de superposition en mettant de l'avant l'hypothèse que le matériau se comporte de façon linéaire, sans quoi la méthode inverse telle que proposée par Vézina (2014) ne serait pas applicable.

La correction de  $L/D$  pourrait être améliorée en utilisant d'autres fonctions plus complexes. (Corthésy & Leite, 2016)

Le directeur et la codirectrice de ce mémoire sont d'avis que des modifications aux essais de recharge des carottes permettraient de déterminer les deux coefficients de Poisson indépendants sur le plan de mesure et de déterminer la position  $L_h/D$  entre les deux matériaux. (Corthésy & Leite, 2016). La figure 3.15 montre que l'essai de compression biaxiale isotrope sur différentes longueurs permet de calculer des rapports de déformabilité ( $R_d$ ) variant entre 0.1 et 0.4. L'augmentation de ces bornes peut être faite car des rapports hors de ces limites sont possibles si le rapport d'anisotropie est pris en compte. Le second modèle anisotrope avec un  $L_h/D$  de 0.5 étudié en est un exemple.

### 6.4 Originalité du mémoire

Ce mémoire se distingue des autres travaux de recherche menés sur le sujet par l'utilisation de données de terrain réelles avec la méthode inverse, ce qui est une première et par l'étude de l'effet de certains éléments sur la méthode inverse. L'influence de l'hétérogénéité sur la méthode inverse

et sa correction sur le tenseur trouvé représente un apport intéressant à l'interprétation des mesures de contraintes à l'aide du doorstopper modifié.

## BIBLIOGRAPHIE

Amadei, B., & Stephansson, O. (1997). *Rock Stress and Its Measurement* (1ste éd.). London: U.K.: Chapman & Hall.

Batugin, S. A., & Nirenburg, R. K. (1972). Approximate relation between the elastic constants of anisotropic rocks and the anisotropy parameters. *Journal of Mining Science*, 5-9.

Cloix, R. (2010). *Influence de l'hétérogénéité du massif rocheux sur le calcul des contraintes in situ*. Montréal, Canada, Université de Montréal, École Polytechnique, Département des génies civil, géologique et des mines, 2010, 168 p. Maîtrise ès Sciences Appliquées.

Colin, A. (2014). *Modélisation et analyse des effets de la température sur les mesures de contraintes avec la technique du doorstopper modifié*. Montréal, Canada, Université de Montréal, École Polytechnique, Département des génies civil, géologique et des mines, 132 p. Maîtrise ès Sciences Appliquées.

COMSOL. (2013). *COMSOL Multiphysics, Structural Mechanics Module User's Guide*.

Corthésy, R. (1982). *Développement d'une méthode analytique d'interprétation des mesures de pressions de terrains par la technique du "doorstopper" pour des roches anisotropes et non linéaires*. Montréal, Canada, Université de Montréal, École Polytechnique, Département des génies civil, géologique et des mines, Maîtrise ès Sciences Appliquées.

Corthésy, R. (1993). Integrated approach to rock stress measurement in anisotropic non-linear elastic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(4), 395-411.

Corthésy, R., & Gill, D. (1990). The modified doorstopper cell stress measuring technique. *Proc. of the Conference on Stresses in underground structures: Determination, prediction and monitoring*, (pp. 23-32). Ottawa, Canada.

Corthésy, R., & Leite, M. H. (2008). A strain-softening numerical model of core discing and damage. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 329-350.

Corthésy, R., & Leite, M. H. (2013). *GML6002-Mécanique des roches II*.

Corthésy, R., & Leite, M. H. (2016). *Communication personnelle*. Montréal: In S. Delattre (Ed.).

- Corthésy, R., Gill, D. E., & Leite, M. H. (1993b). An integrated approach to rock stress measurement in anisotropic non-linear elastic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 395-411.
- Corthésy, R., Leite, M. H., & Gill, D. E. (2003). Stress measurements in soft rocks. *Engineering Geology*, 381-397.
- Corthésy, R., Leite, M. H., Gill, D. E., & Gaudin, B. (2003). Stress measurements in soft rocks. *Engineering Geology*, 381-397.
- Corthésy, R., Leite, M. H., He, G., & Gill, D. E. (1994). RPR method for the doorstopper technique: Four or six stress components from one or two boreholes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 507-516.
- Corthésy, R., Leite, M. H., Vézina, C., & Ouellet, A. C. (2016). Application of the inverse problem to stress measurement interpretation in anisotropic rock. *7th International Symposium on In-Situ Rock Stress* (pp. 309-319). Tampere, Finland: RS2016.
- Corthésy, R., Leite, M., He, G., & Gill, D. (1993a). *The RPR method for the doorstopper technique: Four or six stress components from one or two boreholes*. Montréal: École Polytechnique de Montréal.
- Fouial, K., Alheib, M., & Baroudi, H. (1998). Improvement in the interpretation of stress measurements by use of the overcoring method: development of a new approach. *Engineering Geology*, 239-252.
- Gill, D. E., Corthésy, R., Ouellet, J., Dubé, P., & Nguyen, D. (1987). Improvements to standard doorstopper and Leeman cell stress measuring techniques. *2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. 1, (pp. 75-83). Kobe: Balkema.
- Gonzaga, G., Leite, M. H., & Corthésy, R. (2008). Determination of anisotropic deformability parameters from a single standard rock specimen. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol 45, n.3, p.1420-1438.
- Hakala, M., Hudson, J., & Christiansson, R. (2003). Quality control of overcoring stress measurement data. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1141-1159.
- Jaeger, J. (2013). *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4th ed., Oxford, U.K., Blackwell Publishing, 475 p.

- Leeman, E. R. (1969). Doorstopper and triaxial rock stress measuring instruments developed by CSIR. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 305-339.
- Leite, M. H., Corthésy, R., & Gill, D. E. (1995). Determination of deformability parameters on overcores in heterogeneous non linear anisotropic rocks. *35th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, (pp. 775-781).
- Leite, M. H., Corthésy, R., Gill, D. E., St-Onge E, M., & Nguyen, D. (1996). The IAM : A Down-the-hole conditioner/data logger for the modified doorstopper technique. *Rock mechanics, tools and techniques : proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium, NARMS '96*, v. 1, 897-904.
- Ouellet, A. (2012). *Interprétation de mesures de contraintes réalisées avec une cellule Doorstopper modifiée en milieu anisotrope*. Montréal, Canada, Université de Montréal, École Polytechnique, Département des génies civil, géologique et des mines, 131 p. Maîtrise ès Sciences Appliquées.
- Ouziame, H. (2013). *Analyse numérique de la distribution des contraintes dans une éprouvette anisotrope en compression diamétrale*. Montréal, Canada, Université de Montréal, École Polytechnique, Département des génies civil, géologique et des mines, 148 p. Maîtrise en génie civil.
- Peres Rodrigues, F. (1966). Anisotropy of granites, modulus of elasticity and ultimate strength ellipsoids, joint systems, slope attitudes, and their correlations. In: *Proc 1st int cong ISRM*, (pp. 721-731). Lisbon.
- Rahn, W. (1984). Stress concentration factors for the interpretation of doorstopper stress measurements in anisotropic rocks. *International journal of rock mechanics*, 313-326.
- Renaud, J. (2015). *Vérification de l'application de la méthode inverse à des mesures de contraintes de terrain au doorstopper modifié*. Montréal, Canada, Université de Montréal, École Polytechnique, Département des génies civil, géologique et des mines, 127 p. Maîtrise en génie civil.
- Vézina, C. (2014). *Méthode Inverse appliquée à l'interprétation de mesures de contraintes au doorstopper modifié*. Montréal, Canada, Université de Montréal, École Polytechnique, Département des génies civil, géologique et des mines, 131 p. Maîtrise ès Sciences Appliquées.
- Wittke, W. (1990). *Rock mechanics : theory and applications with case histories*. New-York: Springer-Verlag.

Yaméogo, S. T., Corthésy, R., & Leite, M. H. (2013). Influence de l'hétérogénéité et de l'endommagement de la roche dans l'interprétation des mesures de contraintes in situ. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60(0), 288-300.

## ANNEXE A – VALIDATION DU MODÈLE

La validation du modèle est faite sur un matériel transversalement isotrope définie par les modules de Young et coefficient de Poisson suivant :  $E_1=40$  GPa,  $E_2=20$  GPa et  $\nu=0,20$ . Le chargement entré dans le modèle est le suivant :  $S_{XX}=10$  MPa,  $S_{YY}=20$  MPa,  $S_{ZZ}=30$  MPa et  $S_{XY}=S_{XZ}=S_{YZ}=0$  MPa. En utilisant les contraintes misent dans le modèle et les équations 2,3 et 2,12, les déformations en fond de trou que le modèle devrait donner sont de  $\varepsilon_{xx}=-220$   $\mu\text{def}$  et  $\varepsilon_{yy}=760$   $\mu\text{def}$ . Afin de vérifier l'efficacité du modèle, les déplacements aux jauge sont utilisés pour calculer les déformations avec les équations 2,2 et 3,1. Les déformations en fond de trou sont de  $\varepsilon_{xx}=-224$   $\mu\text{def}$  et  $\varepsilon_{yy}=766$   $\mu\text{def}$ . Les contraintes en fond de trou calculées à la main et celles données par le modèle sont  $\sigma_{xx}=6,1$  MPa et  $\sigma_{yy}=14,6$  MPa. La différence entre les déformations en fond trou calculées avec les déplacements au jauge extraite du logiciel et celle calculées à la main est inférieur à 1% ce qui permet de valider le modèle.

## ANNEXE B – DIFFÉRENTS CAS UTILISÉS POUR DÉTERMINER LES FACTEURS DE CORRECTION MOYENS

Tableau B.1 : Cas utilisés pour déterminer le facteur de correction à appliquer selon le rapport de déformations

Cas	Rapport de déformations	Rapport hétérogénéité $E_h/E_b$	Carotte hétérogène			Carotte homogène	
			$E_h$ (Gpa)	$E_b$ (Gpa)	$\nu$	$E$ (Gpa)	$\nu$
1	0,10	0,50	10,00	20,00	0,25	9,76	0,21
2	0,10	0,50	10,00	20,00	0,25	9,43	0,24
3	0,15	0,50	10,00	20,00	0,25	12,98	0,21
4	0,15	0,50	10,00	20,00	0,25	9,59	0,25
5	0,15	0,63	12,50	20,00	0,25	13,80	0,22
6	0,15	0,63	12,50	20,00	0,25	12,06	0,25
7	0,15	0,75	15,00	20,00	0,25	14,83	0,23
8	0,15	0,75	15,00	20,00	0,25	14,52	0,25
9	0,25	1,25	25,00	20,00	0,25	24,81	0,28
10	0,25	1,25	25,00	20,00	0,25	25,49	0,26
11	0,25	1,50	30,00	20,00	0,25	26,65	0,29
12	0,25	1,50	30,00	20,00	0,25	30,80	0,26
13	0,25	1,75	35,00	20,00	0,25	28,23	0,29
14	0,25	1,75	35,00	20,00	0,25	36,09	0,26
15	0,25	2,00	40,00	20,00	0,25	29,72	0,30
16	0,25	2,00	40,00	20,00	0,25	41,33	0,25
17	0,30	1,50	30,00	20,00	0,25	29,95	0,30
18	0,30	1,50	30,00	20,00	0,25	31,39	0,27
19	0,30	1,75	35,00	20,00	0,25	31,09	0,31
20	0,30	1,75	35,00	20,00	0,25	36,86	0,26
21	0,30	2,00	40,00	20,00	0,25	33,63	0,32
22	0,30	2,00	40,00	20,00	0,25	42,40	0,26
23	0,35	1,75	35,00	20,00	0,25	35,19	0,32
24	0,35	1,75	35,00	20,00	0,25	37,55	0,27
25	0,35	2,00	40,00	20,00	0,25	37,18	0,33
26	0,35	2,00	40,00	20,00	0,25	43,23	0,27
27	0,40	1,75	35,00	20,00	0,25	37,81	0,31
28	0,40	1,75	35,00	20,00	0,25	38,16	0,29
29	0,40	2,00	40,00	20,00	0,25	40,42	0,34
30	0,40	2,00	40,00	20,00	0,25	44,01	0,28

## ANNEXE C – CONTRAINTES CORRIGÉES ET NON CORRIGÉES POUR TOUS LES CAS ÉTUDIÉS

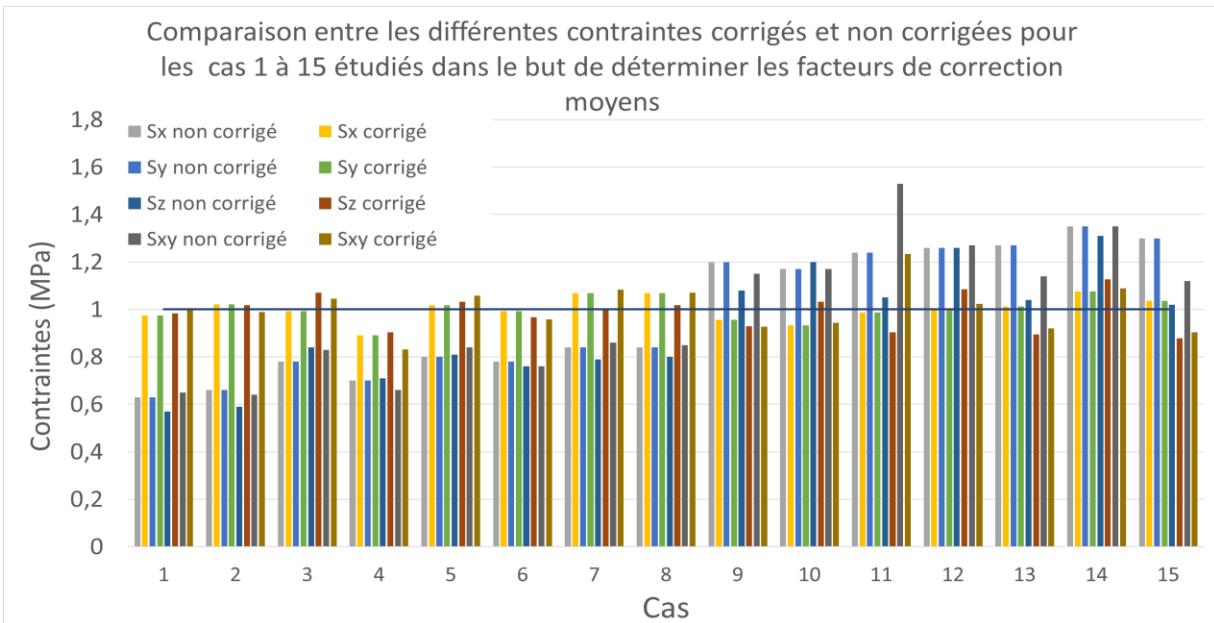


Figure C.1 : Comparaison entre les différentes contraintes corrigées et non corrigées pour les cas 1 à 15 étudiés dans le but de déterminer les facteurs de correction moyens

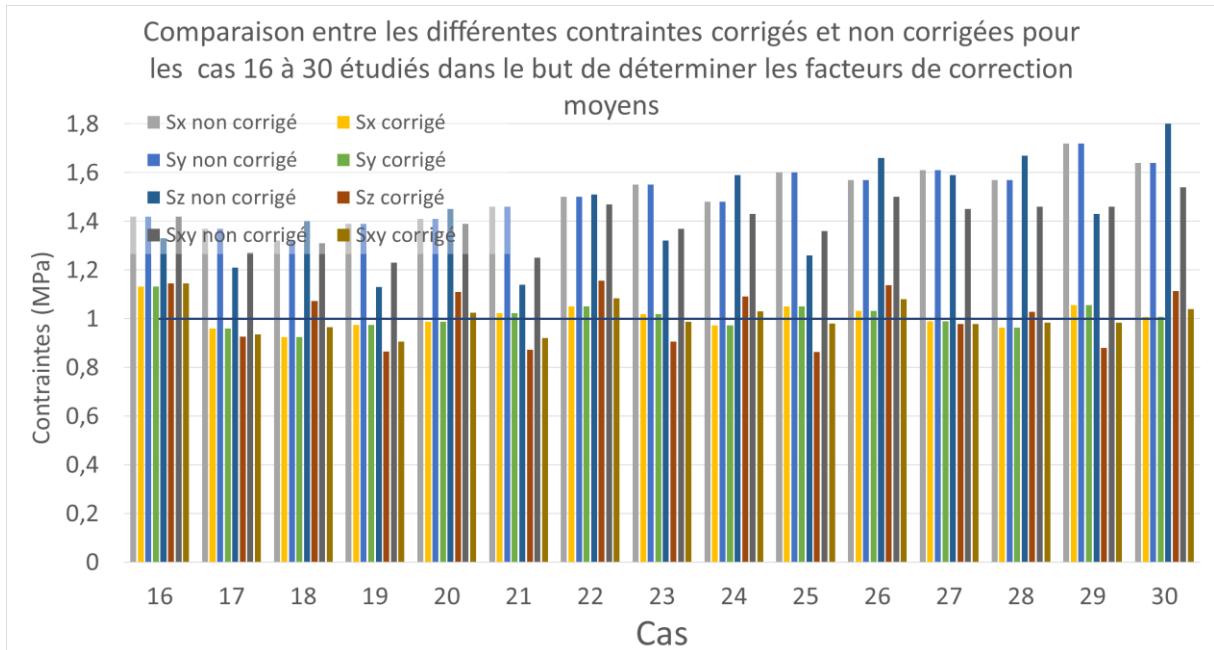


Figure C.2 : Comparaison entre les différentes contraintes corrigées et non corrigées pour les cas 16 à 30 étudiés dans le but de déterminer les facteurs de correction moyens

**ANNEXE D – RÉSULTATS OBTENUS SUR LA COMBINAISON DE CORRECTION  
SUR LES MATERIAUX HÉTÉROGÈNES COMPLEXES**

Tableau D.1 : Tenseurs calculés avec la correction sur l'avancement et l'hétérogénéité pour le modèle anisotrope 0.2

Anisotrope 0,2						
Contraintes	Méthode inverse conventionnelle	Correction L/D linéaire	Correction L/D polynomiale	Correction hétérogénéité	Correction L/D linéaire + hétérogénéité	Correction L/D polynomiale + hétérogénéité
S <sub>xx</sub>	25,19	21,37	21,51	16,36	13,88	13,71
S <sub>yy</sub>	39,74	36,67	36,83	25,80	23,81	23,95
S <sub>zz</sub>	41,98	32,74	32,97	27,98	21,83	21,51
S <sub>xy</sub>	7,90	7,74	7,77	5,65	5,53	5,65
Différence relative	181%	97%	100%	32%	10%	10%

Tableau D.2 : Tenseurs calculés avec la correction sur l'avancement et l'hétérogénéité pour le modèle anisotrope 0.5

Anisotrope 0,5						
Contraintes	Méthode inverse conventionnelle	Correction L/D linéaire	Correction L/D polynomiale	Correction hétérogénéité	Correction L/D linéaire + hétérogénéité	Correction L/D polynomiale + hétérogénéité
S <sub>xx</sub>	22,27	21,38	21,67	11,66	11,20	11,35
S <sub>yy</sub>	37,81	37,01	37,36	19,80	19,38	19,56
S <sub>zz</sub>	37,00	34,47	35,00	20,67	19,26	19,55
S <sub>xy</sub>	7,92	7,85	7,91	4,17	4,13	4,16
Différence relative	128%	107%	113%	5%	3%	3%

Tableau D.3 : Tenseurs calculés avec la correction sur l'avancement et l'hétérogénéité pour le modèle hétérogène graduel

Carotte hétérogène graduelle						
Contraintes	Méthode inverse conventionnelle	Correction L/D linéaire	Correction L/D polynomiale	Correction hétérogénéité	Correction L/D linéaire + hétérogénéité	Correction L/D polynomiale + hétérogénéité
S <sub>xx</sub>	6,33	6,65	6,66	8,67	9,11	9,15
S <sub>yy</sub>	13,61	14,00	14,02	18,65	19,18	19,21
S <sub>zz</sub>	9,24	10,09	10,13	13,39	14,62	14,68
S <sub>xy</sub>	3,42	3,45	3,45	4,63	4,67	4,66
Différence relative	12%	10%	10%	1%	0%	0%

**ANNEXE E – TABLEAUX COMPARATIFS DES RÉSULTATS OBTENUS DE  
CHAQUE MESURE SELON LA MÉTHODE UTILISÉE POUR LA MINE ALPHA**

Tableau E.1 : Comparaison de la composante Sxx selon la méthode d’interprétation utilisée, mine Alpha

Mesures	Méthode RPR	Sxx (MPa)			
		Méthode inverse			
		Courbes partielles	Conventionnelle	Correction linéaire	Correction polynomiale
T1-M3	22,13	8,38	13,59	15,41	16,92
T1-M6	-0,37	16,02	22,66	28,58	30,56
T1-M7	7,75	13,42	2,57	4,02	4,72
T2-M1	2,69	17,41	22,83	31,82	33,14
T2-M2	-1,07	105,24	54,76	45,26	43,40
T2-M3	63,84	21,62	18,44	6,10	8,28
T3-M1	-10,52	-5,07	-6,14	2,97	3,86
T3-M2	-8,12	10,53	15,45	14,94	14,80
T3-M3	13,86	3,93	9,54	11,75	11,96

Tableau E.2 : Comparaison de la composante Syy selon la méthode d’interprétation utilisée, mine Alpha

Mesures	Syy (MPa)				
	Méthode RPR	Méthode inverse			
		Courbes partielles	Conventionnelle	Correction linéaire	Correction polynomiale
T1-M3	9,98	20,63	26,57	28,44	30,39
T1-M6	26,56	9,37	14,65	20,21	21,91
T1-M7	12,95	23,03	27,27	29,66	31,19
T2-M1	24,41	-3,65	-1,98	4,43	4,98
T2-M2	18,22	53,74	30,21	23,14	21,85
T2-M3	-16,64	89,10	56,74	44,42	44,22
T3-M1	22,60	-0,60	5,81	16,33	17,62
T3-M2	0,43	2,80	4,81	4,46	4,34
T3-M3	-6,76	13,13	20,94	23,62	24,04

Tableau E.3 : Comparaison de la composante Szz selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Alpha

Mesures	Szz (MPa)				
	Méthode RPR	Méthode inverse			
		Courbes partielles	Conventionnelle	Correction linéaire	Correction polynomiale
T1-M3	24,80	-13,55	8,71	13,79	17,43
T1-M6	22,30	-28,94	-1,56	16,98	20,71
T1-M7	29,31	-4,51	7,66	15,02	17,57
T2-M1	0,41	-36,59	-23,42	-1,21	0,15
T2-M2	43,03	430,08	83,17	51,20	47,30
T2-M3	-1,64	226,89	64,18	18,01	25,07
T3-M1	12,13	-27,41	-16,43	11,90	14,47
T3-M2	45,86	15,19	33,96	32,80	32,34
T3-M3	29,50	-6,22	26,13	33,36	33,70

Tableau E.4 : Comparaison de la composante Sxy selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Alpha

Mesures	Sxy (MPa)				
	Méthode RPR	Méthode inverse			
		Courbes partielles	Conventionnelle	Correction linéaire	Correction polynomiale
T1-M3	-12,82	-12,48	-13,65	-13,89	-14,30
T1-M6	-4,25	12,64	16,75	17,93	18,59
T1-M7	10,06	1,91	2,34	2,45	2,54
T2-M1	2,72	1,90	4,13	4,77	4,91
T2-M2	-3,94	42,62	18,57	16,84	16,44
T2-M3	4,53	14,22	7,81	7,11	6,85
T3-M1	-4,04	-1,81	-5,02	-5,10	-5,22
T3-M2	-0,12	0,62	2,45	2,40	2,39
T3-M3	-1,87	-3,40	-5,66	-5,89	-6,00

Tableau E.5 : Comparaison de  $\Sigma e^2/N$  selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Alpha

$\Sigma e^2/N$	Méthode RPR	Alpha			
		Méthode inverse			
		Conventionnelle	Courbes partielles	Correction linéaire	Correction polynomiale
T1-M3	1 007 072	3256	5298	1361	257
T1-M6	2 444 455	9799	5409	2252	875
T1-M7	924 538	3007	2482	1203	182
T2-M1	5 080 308	19121	16667	2637	964
T2-M2	3 252 077	102022	31010	11097	5437
T2-M3	17 186 588	157046	66890	10927	4940
T3-M1	759 651	27495	11597	1674	885
T3-M2	2 970 411	4431	968	4304	4284
T3-M3	3 156 942	9238	4301	1915	1479

Tableau E.6 : Tenseurs tridimensionnels, mine Alpha

Alpha						
Tenseur 3D (MPa)	Méthode RPR	Méthode conventionnelle	Méthode inverse conventionnelle	Méthode courbes partielles	Méthode inverse Correction linéaire	Méthode inverse Correction polynomiale
Sxx	17,87	-11,59	17,10	63,22	17,15	19,06
Syy	22,73	13,8	29,36	39,89	31,46	32,60
Szz	18,65	<b>9,55</b>	<b>25,88</b>	<b>48,67</b>	<b>26,77</b>	<b>28,31</b>
Sxy	-4,13	7,26	0,84	-27,63	2,69	2,26
Sxz	0,18	-3,45	-4,99	-7,75	-5,22	-5,25
Syz	0,63	10,35	0,11	-3,16	0,84	1,06

Tableau E.7 : Tenseurs tridimensionnels sans T2-M2, mine Alpha

Alpha						
Tenseur 3D (MPa)	Méthode RPR	Méthode conventionnelle	Méthode inverse conventionnelle	Méthode courbes partielles	Méthode inverse Correction linéaire	Méthode inverse Correction polynomiale
Sxx	14,99	-16,94	8,49	15,28	12,70	15,41
Syy	21,5	13,09	26,57	24,15	30,98	32,52
Szz	18,82	<b>7,73</b>	<b>17,83</b>	<b>18,46</b>	<b>21,71</b>	<b>23,88</b>
Sxy	-2,74	10,7	5,15	-2,66	5,57	4,83
Sxz	-0,16	-1,36	-2,93	-2,39	-3,43	-3,52
Syz	0,23	10,82	1,19	-1,48	1,89	2,09

**ANNEXE F – TABLEAUX COMPARATIFS DES RÉSULTATS OBTENUES DE  
CHAQUE MESURE SELON LA MÉTHODE UTILISÉE POUR LA MINE BETA**

Tableau F.1 : Comparaison de la composante Sxx selon la méthode d’interprétation utilisée, mine Beta

Mesures	Méthode RPR	Sxx (Mpa)			
		Méthode inverse			
		des courbes partielles	inverse conventionnelle	correction linéaire	correction polynomiale
T1-M1	7,54	8,89	6,45	3,38	3,76
T1-M3	12,94	-0,82	7,45	12,32	15,22
T2-M1	13,17	10,82	11,93	13,09	14,28
T2-M2	15,12	7,64	11,20	18,77	19,70
T3-M1	13,98	9,64	9,95	12,78	13,00
T3-M2	8,68	1,54	3,74	15,62	8,10
T3-M3	12,94	11,42	14,10	17,85	18,21

Tableau F.2 : Comparaison de la composante Syy selon la méthode d’interprétation utilisée, mine Beta

Mesures	Méthode RPR	Syy (Mpa)			
		Méthode inverse			
		des courbes partielles	inverse conventionnelle	correction linéaire	correction polynomiale
T1-M1	13,01	12,69	9,59	6,84	7,22
T1-M3	27,30	6,12	7,47	25,71	28,93
T2-M1	18,65	18,67	20,78	21,87	23,00
T2-M2	22,95	14,30	20,33	28,23	29,24
T3-M1	21,72	5,81	5,92	8,79	9,00
T3-M2	19,86	12,74	15,48	12,76	21,06
T3-M3	27,30	4,66	5,62	9,26	9,57

Tableau F.3 : Comparaison de la composante Szz selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Beta

Mesures	Méthode RPR	Szz (Mpa)			
		Méthode inverse			
		des courbes partielles	inverse conventionnelle	correction linéaire	correction polynomiale
T1-M1	-19,42	5,21	-4,46	-11,74	-10,85
T1-M3	-4,50	-42,31	-27,48	-1,69	4,61
T2-M1	-0,93	-5,84	1,48	4,29	7,12
T2-M2	5,11	-24,58	-8,16	10,21	12,31
T3-M1	-38,24	-31,10	-28,61	-19,12	-18,50
T3-M2	-3,10	-20,43	-12,63	-0,31	0,55
T3-M3	-4,50	-12,41	-6,41	2,28	2,97

Tableau F.4 : Comparaison de la composante Sxy selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Beta

Mesures	Méthode RPR	Sxy (Mpa)			
		Méthode inverse			
		des courbes partielles	inverse conventionnelle	correction linéaire	correction polynomiale
T1-M1	-1,49	-2,54	-2,66	-2,59	-2,61
T1-M3	0,30	-0,54	6,26	0,31	0,39
T2-M1	-3,68	0,93	0,86	0,95	1,04
T2-M2	2,85	-0,21	-0,17	-0,71	-0,77
T3-M1	-6,07	-4,89	-5,60	-5,59	-5,61
T3-M2	-3,52	-1,30	4,07	-6,40	-1,14
T3-M3	0,30	2,93	3,04	3,05	3,06

Tableau F.5 : Comparaison de  $\Sigma e^2/N$  selon la méthode d'interprétation utilisée, mine Beta

$\Sigma e^2/N$	Méthode RPR	Beta			
		Méthode inverse			
		Conventionnelle	Courbes partielles	Correction linéaire	Correction Polynomiale
T1-M1	163 537	345	279	156	149
T1-M3	291 311	4407	3212	2112	1550
T2-M1	1 329	296	878	188	130
T2-M2	18 567	1939	917	354	283
T3-M1	1 035 540	2533	4769	1660	1626
T3-M2	61 278	768	1023	137	123
T3-M3	395 277	610	456	163	149

Tableau F.6 : Tenseurs tridimensionnels, mine Beta

Beta							
Tenseur 3D (MPa)	Méthode Hybride	Méthode RPR	Méthode conventionnelle	Méthode inverse conventionnelle	Méthode courbes partielles	Méthode inverse Correction linéaire	Méthode inverse Correction polynomiale
S <sub>xx</sub>	15,91	5,27	33,56	-7,76	-13,62	3,22	5,78
S <sub>yy</sub>	23,89	1,09	35,76	-0,47	-5,46	7,30	9,38
S <sub>zz</sub>	<b>18,57</b>	<b>11,12</b>	<b>25,71</b>	<b>6,37</b>	<b>1,84</b>	<b>14,76</b>	<b>15,69</b>
S <sub>xy</sub>	-2,55	-3,41	0,56	-2,09	-2,38	-0,45	-1,04
S <sub>xz</sub>	-0,21	0,29	-0,95	1,97	0,50	0,18	0,51
S <sub>yz</sub>	2,05	3,61	-0,39	4,47	4,23	4,85	3,77