HAL
open science

Interprétation de mesures de déformation en forage en terrain anisotrope : retour d'expérience de l'utilisation de cellules CSIRO dans l'argilite de Tournemire (Aveyron)

Abdelmonem Ben Ouanas

To cite this version:

Abdelmonem Ben Ouanas. Interprétation de mesures de déformation en forage en terrain anisotrope : retour d'expérience de l'utilisation de cellules CSIRO dans l'argilite de Tournemire (Aveyron). Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010. Français. NNT : 2010INPL079N . tel-01748847

HAL Id: tel-01748847

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748847v1

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

NANCY UNIVERSITÉ – INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

École Nationale Supérieure des Mines de Nancy
Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages

ÉCOLE DOCTORALE : RP2E

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

Docteur de l'INPL
en Mécanique – Génie Civil

Par

Abdelmonem BEN OUANAS
Ingénieur en Génie Civil de l'ENIG - Tunisie
Master en Mécanique et Génie Civil de l'ENPC - France

Interprétation de mesures de déformation en forage en terrain anisotrope : retour d'expérience de l'utilisation de cellules CSIRO dans l'argilite de Tournemire (Aveyron)

Thèse dirigée par Jack-Pierre PIGUET

Co-directeur Yann GUNZBURGER

Soutenue publiquement le 26 novembre 2010

Devant le **Jury** composé de :

Denis FABRE	Professeur (CNAM, Paris)	[Rapporteur]
Frédéric PELLET	Professeur (INSA, Lyon)	[Rapporteur]
Jack-Pierre PIGUET	Professeur (Nancy-Université)	[Examinateur]
Yann GUNZBURGER	Maître de Conférences (Nancy-Université)	[Examinateur]
Franz LAHAIE	Ingénieur (INERIS)	[Membre invité]
Jean-Dominique BARNICHON	Ingénieur (IRSN)	[Membre invité]

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur Jack-Pierre Piguet, Professeur au sein du LAEGO et Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy, mon directeur de thèse, de m'avoir fait profiter de son savoir, de son expérience et de son expertise dans le domaine de la géomécanique. Je remercie également Monsieur Yann Gunzburger, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy attaché au LAEGO, mon co-directeur de thèse, de m'avoir communiqué son goût pour la mécanique des roches et fait partager son savoir, ainsi que pour l'aide presque au quotidien qu'il m'a apporté tout au long de ces trois années. Je remerci pareillement Monsieur Franz Lahaie, Ingénieur et responsable de recherche à l'INERIS, mon encadrant de thèse, pour sa précieuse contribution au déroulement scientifique de mes expériences ainsi que sa participation hebdomadaire pour veiller à la bonne orientation de mes travaux dans le cadre de cette thèse. J'ai particulièrement apprécié de travailler avec ces trois remarquables scientifiques.

Je remerci Monsieur Jean-Dominique Barnichon, Ingénieur à l'IRSN, qui a également contribué au déroulement de ces travaux. Je le remercie sincèrement pour son aide précieuse et son obligeance.

Je voudrais témoigner ma reconaissance à l'équipe INERIS : Monsieur Benoît Beaufils et Monsieur Régis Pacot, dont les investissements sur le site expérimental de Tournemire ont pemis le bon déroulement des expérimentations.

Je voudrais pareillement remercier Monsieur Abdessalam Dahoun, Professeur à l'Institut Jean Lamour, pour sa précieuse contribution à la recherche scientifique d'explications aux différents phénomènes qui sont à l'origine de cette thèse.

Je voudrais également remercier Monsieur Denis Fabre Professeur au CNAM de Paris et Monsieur Frédéric Pellet Prefesseur à l'INSA de Lyon qui ont accepté d'être rapporteurs de ce travail de thèse. Je les remercie particulièrement pour le temps qu'ils ont consacré à examiner et juger ce mémoire et pour leurs remarques ayant contribué à son amélioration.

Il me faut d'ailleur préciser que ce projet de thèse a bénéficié d'un finacement en collaboration entre l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) et l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS). Le travail scientifique s'est déroulé en majeur partie dans les locaux du Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages (LAEGO) à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy accompagné de quelques séjours à la station expérimentale de Tournemire (Aveyron).

Je remercie à la fin l'ensemble des enseignants-chercheurs, chercheurs, doctorants du LAEGO, et ingénieurs de l'INERIS se trouvant à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy et le personnel du laboratoire LR2S de l'IRSN.

Résumé

En géomécanique, la caractérisation de l'état de contrainte et de la rhéologie d'un massif rocheux peut être obtenue en mesurant la réponse en déformation du terrain sous l'effet d'une sollicitation connue. Une méthode parmi d'autres consiste à recourir pour cela à une cellule de mesure intégrée (comportant des capteurs de déformation orientés selon différentes directions) installée dans un forage et rendue solidaire du massif par l'intermédiaire d'une colle époxy. Ce principe de mesure est utilisé, notamment, pour déterminer l'état de contraintes *in situ* par la méthode dite de « surcarottage » et les caractéristiques élastiques de la roche à partir de l'essai « biaxial ».

Entre novembre 2005 et janvier 2006, une campagne d'essais géomécaniques de ce type a été menée dans l'argilite de Tournemire (Aveyron, France), à l'aide des cellules CSIRO. Les mesures de déformation obtenues ont révélé des phénomènes inhabituels qui ont rendu délicate la détermination des caractéristiques élastiques anisotropes de la roche et impossible l'accès aux contraintes du site.

La présente thèse a pour objectif de contribuer, par la recherche d'explications à l'origine de ces phénomènes, d'une part, à l'amélioration de la connaissance du comportement de l'argilite de Tournemire et, d'autre part, à l'amélioration du protocole de mesure et d'interprétation de déformations obtenues par cellules CSIRO.

Notre démarche consiste, dans un premier temps, à émettre un certain nombre d'hypothèses explicatives des phénomènes observés par la recherche bibliographique. Dans un deuxième temps, nous testons ces hypothèses à travers la modélisation analytique et numérique des essais de surcarottage et biaxiaux, puis à travers la réalisation de nouvelles expérimentations *in situ* et en laboratoire sur l'argilite, mais aussi sur des matériaux-tests (ciment, échantillon de colle).

Nous concluons que les phénomènes inhabituels observés résultent, pour l'essentiel, des conditions de mise en œuvre *in situ* des cellules CSIRO. En particulier, nous mettons l'accent sur les artéfacts induits par le comportement visco-plastique de la colle époxy lorsqu'elle n'est pas parfaitement polymérisée. Le rôle de l'endommagement de la roche généré par les opérations de forage est également discuté. Nous en tirons des recommandations pratiques pour la réalisation de nouveaux essais dans des conditions similaires.

Mots clefs : mesures de déformation, caractéristiques élastiques anisotropes, état de contrainte, argilite de Tournemire, modélisation, colle époxy, endommagement.

Abstract

In Geomechanics, determining the state of stress and the rheology of rock massive can be obtained by measuring the strain response of the ground under the effect of a known stress. A method among others is to use a cell integrated (with strain gauges oriented in different directions) installed in a borehole and secured to the mass through an epoxy glue. This measurement is used, notably, to determine the stress state *in situ* by the « overcoring » method and the elastic parameters of the rock from the « biaxial » test.

Between November 2005 and January 2006, a geomechanical testing campaign was conducted in the argillaceous formation of the Tournemire experimental site (Aveyron, France) using CSIRO Hi cells. The strain measurements obtained during overcoring and biaxial tests, have shown unusual phenomena, which have made difficult the determination of anisotropic elastic parameters of the rock and the access to the site stress.

Therefore, through researches for explanations of the origin of these phenomena, this thesis aims to improve and to contribute to the understanding of argillite Tournemire's behaviour and to upgrade the measurement protocol as well as the interpretation of cells CSIRO's strain.

Our approach is, firstly, to issue a number of hypotheses to explain certain, phenomena observed in literature. In a second step, we test these hypotheses through analytical and numerical modelling of the biaxial and overcoring tests then through the realization of new experiments *in situ* within laboratory on argillite, and also on materials tests (cement, sample of glue).

We conclude that the unusual phenomena observed are essentially the result of the conditions for implementing *in situ* CSIRO's cell. In particular, we focus on the artefacts induced by the visco-plastic behaviour of the epoxy glue when it is incompletely polymerised. The role of damage on the rock generated by drilling operations is also discussed. We draw some practical recommendations for implementing new tests under similar conditions.

Keywords: strain measurement, anisotropic elastic parameters, state of stress, Tournemire argillite, modelling, epoxy glue, damage.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 16
1.1 Contexte/problématique 16
1.2 Objectif de la thèse 17
1.3 Démarche 17
1.4 Plan du mémoire 17
2. LA MESURE DE DEFORMATION PAR LA CELLULE CSIRO 19
2.1 Définition d'une cellule de déformation 19
2.2 La cellule CSIRO 20
2.3 Utilisation des cellules CSIRO lors d'essais de surcarottage 22
2.3.1 Historique 22
2.3.2 Principe de l'essai 23
2.3.3 Protocole 23
2.3.4 Mesures obtenues dans le cas idéal 25
2.3.5 Principe d'interprétation 26
2.4 Utilisation des cellules CSIRO lors des essais biaxiaux sur cylindres creux27
2.4.1 Présentation de la cellule biaxiale 27
2.4.2 Principe de l'essai 28
2.4.3 Protocole 29
2.4.4 Mesures obtenues dans le cas idéal 29
2.4.5 Principe d'interprétation 31
3. PHENOMENES ATYPIQUES OBSERVES LORS DE LA MISE EN ŒUVRE DE MESURES PAR CELLULES DE DEFORMATION : EXEMPLE DE LA CAMPAGNE DE MESURE DE CONTRAINTES REALISEE A TOURNEMIRE EN 2005-2006 33
3.1 Présentation préalable du site de Tournemire 33
3.1.1 Généralités 33
3.1.1.1 Introduction générale 33
3.1.1.2 Contexte géologique 33
3.1.2 Caractérisation en laboratoire de l'argilite de Tournemire 35
3.1.2.1 Caractéristiques physiques 35
3.1.2.2 Comportement élastoplastique et visqueux 36

3.1.2.3 Anisotropie du comportement 37
3.1.3 Etat des contraintes naturelles dans le site de Tournemire 38
3.1.3.1 Campagne d'essais d'ANTEA 38
3.1.3.2 Campagne d'essais de GEOSTRESS 38
3.1.3.3 Interprétation 40
3.1.4 Endommagement autour des ouvrages 41
3.1.4.1 Résultats d'observations et d'investigations expérimentales de l'EDZ41
3.1.4.2 Résultats de modélisation de l'EDZ 44
3.2 Présentation des phénomènes observés 45
3.2.1 « Saut initial des mesures » 48
3.2.2 « Pic au surcarottage » 48
3.2.3 « Dérive thermique des mesures » 49
3.2.4 « Pic à l'essai biaxial » 52
3.3 Recherche d'hypothèses explicatives a priori pour le phénomène de pic au surcarottage 54
3.4 Modélisation numérique du « pic au surcarottage » en élasticité linéaire ... 55
3.4.1 Introduction 55
3.4.2 Objectif et démarche 55
3.4.3 Présentation du modèle 57
3.4.4 Résultats 59
3.4.4.1 Cas de référence : comportement élastique linéaire isotrope et contraintes initiales isotropes 59
3.4.4.2 Impact de l'anisotropie des propriétés élastiques de la roche 62
3.4.4.2.1 Axe du trou Ex parallèle à la stratification 63
3.4.4.2.2 Axe du trou Ex perpendiculaire à la stratigraphie 64
3.4.4.3 Impact de l'anisotropie des contraintes initiales 65
3.4.4.3.1 Cas où $\sigma_x > \sigma_y = \sigma_z$ 65
3.4.4.3.2 Cas où $\sigma_x < \sigma_y = \sigma_z$ 65
3.4.4.4 Scénario maximaliste 67
3.4.5 Conclusion 68
4. EXPLICATION DES PHENOMENES OBSERVES 69
4.1 Apports de la nouvelle campagne d'essais géomécaniques *in situ* 69
4.1.1 Objectif et démarche 69
4.1.2 Effet du temps de séchage de la colle sur les phénomènes observés 71
4.1.2.1 Impact du temps de séchage sur le « Pic au surcarottage » 71
4.1.2.2 Impact du temps de séchage sur le « Pic à l'essai biaxial » 73

4.1.2.3 Impact du temps de séchage sur le « saut initial des déformations » 76
4.1.2.4 Analyse des courbes de séchage 79
4.1.3 Impact des autres paramètres expérimentaux 81
4.1.3.1 Impact de la vitesse de rotation du carottier 81
4.1.3.2 Impact du fluide de foration 82
4.2 Essais complémentaires en laboratoire sur la colle époxy 83
4.2.1 Etude du temps de polymérisation de la colle par calorimétrie différentielle 83
4.2.1.1 Objectif 83
4.2.1.2 Démarche 84
4.2.1.3 Protocole et interprétation de l'essai 84
4.2.1.4 Déroulement des essais et résultats 86
4.2.2 Etude du comportement mécanique de la colle en fonction du temps de séchage par essais « shore A » 87
4.2.2.1 Objectif 87
4.2.2.2 Protocole et interprétation de l'essai 88
4.2.2.3 Résultats 90
4.2.3 Essais biaxiaux sur carottes creuses en ciment 92
4.2.3.1 Objectif 92
4.2.3.2 Protocole 92
4.2.3.3 Interprétation des essais 95
4.3 Synthèse 97

5. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DE L'ARGILITE DE TOURNEMIRE DETERMINEES PAR ESSAI BIAXIAL 100

5.1 Etat des connaissances sur les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire 100
5.1.1 Introduction 100
5.1.2 Valeurs fournies par les essais mécaniques sur échantillons 100
5.1.2.1 Méthodes d'interprétation de la courbe contrainte-déformation pour la détermination des modules de Young 100
5.1.2.2 Résultats obtenus par Cuxac (1991) 101
5.1.2.3 Résultats obtenus par Niandou (1994) 102
5.1.2.4 Résultats obtenus par rejeb *et al.* [1999] 103
5.1.2.4.1 Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire proposées par Rejeb *et al.* [1999] 103
5.1.2.4.2 Présentation des essais réalisés lors de cette campagne 103
5.1.2.4.3 Interprétation des résultats et conclusion 106

5.1.3 Valeurs fournies par les mesures de vitesses sur échantillons 107
5.1.4 Valeurs fournies par les mesures de vitesses *in situ*..... 108
5.1.5 Valeurs fournies par les mesures de convergence en galerie..... 109
5.1.6 Synthèse 111
5.2 Valeurs déduites des essais biaxiaux de 2005-2006 et 2008 en utilisant des formulations analytiques 112
5.2.1 Présentation des courbes typiques des essais biaxiaux 112
5.2.2 Méthode empirique reposant sur l'utilisation « jauge par jauge » de la formulation isotrope de Worotnicki [1993] 114
5.2.2.1 Cas d'un matériau isotrope [Worotnicki, 1993] 114
5.2.2.2 Tentative de généralisation au cas d'un matériau anisotrope lorsque l'axe de la carotte creuse se trouve dans le plan d'anisotropie : Méthode jauge par jauge 115
5.2.3 Méthode d'inversion analytique-itérative proposée par Souley [2008] dans le cas isotrope transverse 117
5.3 Valeurs déduites des essais biaxiaux de 2005-2006 et 2008 en utilisant une modélisation numérique prenant en compte l'anisotropie de la carotte 119
5.3.1 Principe de la méthode..... 119
5.3.2 Présentation du modèle numérique 120
5.3.3 Utilisation du modèle pour déterminer les caractéristiques élastiques isotropes transverses à l'aide d'abaques 122
5.3.3.1 Initialisation des paramètres élastiques 124
5.3.3.2 Estimation des modules de Young E_2 et E_1 par ajustement des déformations orthoradiales 125
5.3.3.3 Estimation des coefficients de Poisson ν_{12} et ν_{23} par ajustement des déformations axiales 126
5.3.3.4 Ajustement final à l'aide du module de cisaillement..... 127
5.3.4 Résultats 127
5.4 Hypothèses explicatives possibles des écarts observés 128
5.4.1 Recherche d'hypothèses explicatives 128
5.4.2 Mise en évidence *in situ* de l'impact du temps de séchage de la colle sur la valeur des caractéristiques élastiques déterminées par essai biaxial 129
5.4.3 Apports de la campagne d'essais en laboratoire sur carottes en ciment 131
5.4.3.1 Objectif..... 131
5.4.3.2 Démarche 131
5.4.3.3 Protocole..... 131
5.4.3.4 Résultats des essais sur éprouvettes de ciment en laboratoire 132
5.4.3.5 Résultats des essais biaxiaux sur carottes creuses en ciment 133

5.4.3.6 Conclusion 134
5.5 Synthèse 135
6. CONCLUSION 138
7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 142

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : LES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES DE DEFORMATION 149

ANNEXE B : SCHEMA DE LA CELLULE CSIRO A 12 JAUGES ; SCHEMA DU CAROTTIER ET DU SENS DE CIRCULATION DE L'AIR COFOR – DEPARTEMENT COREIS 155

ANNEXE C : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET HYPOTHESES SIMPLIFICATRICE UTILISEES PAR LES DIFFERENTS AUTEURS AYANT TRAITE LE PROBLEME DU TROU CYLINDRIQUE DANS UN MILIEU CONTINUE 159

ANNEXE D : LOCALISATION DES ESSAIS DE LA CAMPAGNE DE SURCAROTTAGE DE 2005-2008 161

ANNEXE E : RECAPITULATIF DES ESSAIS DE SURCAROTTAGE ET DES ESSAIS BIAXIAUX – CAMPAGNE 2005-2006 164

ANNEXE F : INTENSITE DU PIC A L'ESSAI DE SURCAROTTAGE (APS) ET INTENSITE DU PIC A L'ESSAI BIAXIAL (APB) MESURES AU NIVEAU DES JAUGES ORTHORADIALES – CAMPAGNE 2005-2006 167

ANNEXE G : RECAPITULATIF DES PHENOMENES ATYPIQUES OBSERVES LORS DE L'ESSAI DE SURCAROTTAGE SE TROUVANT DANS LA LITTERATURE 170

ANNEXE H-1 : TECHNIQUE DE MODELISATION 2D ET 3D DE L'ESSAI DE SURCAROTTAGE 173

ANNEXE H-2 : TECHNIQUE D'OPTIMISATION DU MAILLAGE 3D ET VERIFICATION/VALIDATION DES DIFFERENTES PHASES DU MODELE DE SURCAROTTAGE 180

ANNEXE I : DISTRIBUTION DES CONTRAINTES AU COURS DU SORCAROTTAGE DETERMINEE A PARTIR DU MODELE 3D 185

ANNEXE J : COURBES $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{PLATEAU}$ EN FONCTION DE L'AVANCEMENT DU CAROTTIER 189

ANNEXE K : COURBES DE DEFORMATIONS OBTENUES LORS DES ESSAIS DE SURCAROTTAGES DE LA CAMPAGNE DE 2008 195

ANNEXE L : COURBES D'ESSAIS BIAXIAUX REALISES LORS DE LA CAMPAGNE DE 2008 202

ANNEXE M : COURBE DE SECHAGE OBTENU LORS DE LA CAMPAGNE DE 2008 209

ANNEXE N : ESSAIS DE CALORIMETRIE DIFFERENTIELLE « DSC » REALISES SUR LA COLLE 10-8° – ESSAIS DE REFERENCE « SCAN », CAMPAGNES DE 2010 216

ANNEXE O : ESSAIS DE CALORIMETRIE DIFFERENTIELLE « DSC » REALISES SUR LA COLLE 10-8° – ESSAIS ISOTHERMES « ISO », CAMPAGNES DE 2010 222

ANNEXE P : RESULTATS DES ESSAIS BIAXIAUX SUR CAROTTES EN CIMENT CAMPAGNE DE 2010 229

ANNEXE Q : VARIATION DES PARAMETRES ELASTIQUES DE L'ARGILITE DE TOURNEMIRE EN FONCTION DE LA PRESSION DE CONFINEMENT SELON NIANDOU [1994] 237

ANNEXE R : EXEMPLES DE COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION OBTENUES LORS D'ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE REALISES PAR REJEB *ET AL.*, [1999] SUR DES CAROTTES PROVENANT DU TUNNEL ET DE LA GALERIE EST DU SITE EXPERIMENTAL DE TOURNEMIRE 239

ANNEXE S : MODULES DE YOUNG E_1 ET E_2 DETERMINES A PARTIR DES ESSAIS SUR LES EPROUVETTES EN PROVENANCE DE LA GALERIE EST ET DU TUNNEL LORS DE LA CAMPAGNE MENEE PAR REJEB *ET AL.*, [1999] 245

ANNEXE T : FORMULES ANALYTIQUES PROPRES A UNE ROCHE ELASTIQUE ISOTROPE SELON HOMAND *ET AL.*, (1993) UTILISES PAR CONTRUCCI, [2006] POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES ELASTIQUES ISOTROPES TRANSVERSES DE L'ARGILITE DE TOURNEMIRE A PARTIR DE MESURE DE VITESSES PAR ULTRASON. 248

ANNEXE U-1 : TECHNIQUES UTILISEES POUR GENERER LE MAILLAGE 3D DE L'ESSAI BIAXIAL 250

ANNEXE U-2 : VERIFICATION DU MODELE BIAXIAL 3D 254

ANNEXE V : VALEURS DE DEFORMATIONS OBTENUES A PARTIR DU MODELE NUMERIQUE EN UTILISANT CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DETERMINES A PARTIR DES ESSAIS EN LABORATOIRE (§ 5.1.6) 265

ANNEXE W : DEFORMATIONS OBTENUES A PARTIR DES MODELES BIAXIAUX SANS EPOXY ET AVEC EPOXY POUR L'ESSAI TC35 ET TC36 EN UTILISANT LES CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DETERMINEES A PARTIR DE LA METHODE NUMERIQUE (TABLEAU 19) 267

ANNEXE X : PARAMETRES ELASTIQUES DETERMINES PAR DES ESSAIS BIAXIAUX (DANS LES CONDITIONS DU SITE) ET UNIAXIAUX-TRIAXIAUX (EN LABORATOIRE) DETERMINES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'ESSAIS GEOMECANIQUES (ESSAIS DE

SURCAROTTAGES ET BIAXIAUX) MENEES PAR L'INERIS ET D'AUTRES INSTITUTS A TRAVERS LE MONDE, EXISTANTES DANS LA LITTERATURE. 269

ANNEXE Y : ESSAIS UNIAXIAUX ET TRIAXIAUX REALISE EN LABORATOIRE SUR EPROUVETTES EN CIMENT – CAMPAGNE 2010 272

ANNEXE Z-1 : CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DU CIMENT DETERMINES POUR CHAQUE ESSAI UNIAXIAL ET TRIAXIAL REALISE EN LABORATOIRE SUR EPROUVETTES – CAMPAGNE DE 2010..... 279

ANNEXE Z-2 : RESEAU D'ENDOMMAGEMENT POUVANT ETRE REPERES SUR LA PAROI INTERNE DE CAROTTE CREUSE UTILISEE LORS DE L'ESSAI BIAXIAL..... 281

NOTATIONS

Symbole	Signification	Unité
E	Module de Young ou module d'élasticité pour un matériau isotrope	MPa
ν	Coefficient de Poisson pour un matériau isotrope	
G	Module de cisaillement pour un matériau isotrope	MPa
(123)	Repère lié à un matériau isotrope transverse : La direction 1 : direction perpendiculaire au plan d'anisotropie Le plan (23) : plan parallèle au plan d'anisotropie	
E_1	Module de Young ou module d'élasticité dans la direction $\perp$ au plan d'anisotropie : direction 1, noté aussi « $E_\perp$ »	MPa
E_2	Module de Young ou module d'élasticité dans la direction // au plan d'anisotropie : plan (23), noté aussi « $E_{//}$ »	MPa
ν_{12}	Coefficient de Poisson caractérisé par une déformation dans une direction // au plan d'anisotropie (direction 2) due à une sollicitation dans la direction $\perp$ à cette dernière (direction 1), noté aussi « $\nu_\perp$ »	
ν_{23}	Coefficient de Poisson caractérisé par une déformation dans une direction // au plan d'anisotropie (direction 3) due à une sollicitation dans une direction // au plan d'anisotropie (direction 2), noté aussi « $\nu_{//}$ »	
G_{12}	Module de cisaillement dans le plan $\perp$ au plan d'anisotropie : plan (12)	MPa
A_E	Rapport d'anisotropie des modules d'élasticité: $\boldsymbol{A_E} = \boldsymbol{E}_2 / \boldsymbol{E}_1$	
$[\varepsilon]_{123}$	Tenseur de déformations dans le repère (123) : $\left[\varepsilon_{11}\ \varepsilon_{22}\ \varepsilon_{33}\ \gamma_{23}\ \gamma_{13}\ \gamma_{12}\right]^T$	
$\left[\varepsilon_i\right]_{i=1...12}$	Déformations mesurées sur chaque jauge de la cellule CSIRO $\left[\varepsilon_1 \varepsilon_2 ... \varepsilon_{12}\right]$, noté aussi $\left[\varepsilon_i^{mesure}\right]_{i=1...12}$	
$\left[\varepsilon_i^*\right]_{i=1...12}$	Déformations calculées analytiquement sur chaque jauge de la cellule CSIRO $\left[\varepsilon_1^* \varepsilon_2^* ... \varepsilon_{12}^*\right]$	
$\left[\varepsilon_i^{\mathrm{mod}\,el}\right]_{i=1...12}$	Déformations numériques sur chaque jauge de la cellule CSIRO obtenue à partir de la modélisation $\left[\varepsilon_1^{\mathrm{mod}\,el}\ \varepsilon_2^{\mathrm{mod}\,el} ... \varepsilon_{12}^{\mathrm{mod}\,el}\right]$	
(rθz)	Repère cylindrique (utilisé pour l'essai de surcarottage et l'essai biaxial)	

$[\varepsilon]_{r\theta z}$	Tenseur de déformation dans le repère cylindrique (rθz) : $\left[\varepsilon_{rr}\ \varepsilon_{\theta\theta}\ \varepsilon_{zz}\ \gamma_{\theta z}\ \gamma_{rz}\ \gamma_{r\theta}\right]^T$	
$\varepsilon_{\theta\theta}$	Déformation enregistrée sur une jauge orthoradiale de la cellule CSIRO	
ε_{zz}	Déformation enregistrée sur une jauge axiale de la cellule CSIRO	
$\varepsilon_{\pm 45°}$	Déformation enregistrée sur une jauge inclinée (± 45°) de la cellule CSIRO	
$\varepsilon_{\theta\theta}^{\perp}$	Déformation enregistrée sur la jauge orthoradiale (de la cellule CSIRO) perpendiculaire au plan d'anisotropie dans le cas particulier d'un forage dans le plan d'anisotropie	
$\varepsilon_{\theta\theta}^{//}$	Déformation enregistrée sur la jauge orthoradiale (de la cellule CSIRO) parallèle au plan d'anisotropie dans le cas particulier d'un forage dans le plan d'anisotropie	
$\varepsilon_{\max}^{surc}$	Valeur de la déformation orthoradiale maximal atteinte lors du pic au surcarottage	
$\varepsilon_{\min}^{surc}$	Valeur de la déformation orthoradiale minimale atteinte tout de suite après le pic au surcarottage	
$\varepsilon_{\max}^{biax}$	Valeur de la déformation orthoradiale atteinte lors du pic à l'essai biaxial	
$\varepsilon_{\min}^{biax}$	Valeur de la déformation orthoradiale lors de l'application de la pression maximale à la fin du cycle de chargement lors de l'essai biaxial	
$\varepsilon_{\max}^{\mathrm{mod}\,el}$	Valeur maximale de la déformation orthoradiale atteinte par le rebond lors de la modélisation du surcarottage	
$\varepsilon_{plateau}^{\mathrm{mod}\,el}$	Valeur de la déformation orthoradiale plateau (stabilisation de la déformation) obtenue par le modèle à la fin du surcarottage.	
ξ	Indice d'écart : $\xi = \max_{i=1\ldots12}\left\lvert\frac{\varepsilon_i^{\mathrm{model}} - \varepsilon_i^{\mathrm{mesure}}}{\varepsilon_i^{\mathrm{mesure}}}\right\rvert$	%
APS	Amplitude du Pic au Surcarottage : $\boldsymbol{APS} = (\varepsilon_{\max}^{surc} / \varepsilon_{\min}^{surc}) - 1$	%
APB	Amplitude du Pic lors de l'essai Biaxial : $\boldsymbol{APB} = -\varepsilon_{\max}^{biax} / \varepsilon_{\min}^{biax}$	%
ARS	Amplitude du Rebond au Surcarottage : $\boldsymbol{ARS} = (\varepsilon_{\max}^{\mathrm{mod}\,el} / \varepsilon_{plateau}^{\mathrm{mod}\,el}) - 1$	%
$[\sigma^0]$	Tenseur de contraintes en champ lointain dans un massif rocheux.	MPa
σ_V	Contrainte principale verticale	MPa
σ_H	Contrainte principale horizontale majeure	MPa
σ_h	Contrainte principale horizontale mineure	MPa

$[\sigma]_{123}$	Tenseur des contraintes dans le repère (123) : $[\sigma_{11}\ \sigma_{22}\ \sigma_{33}\ \tau_{23}\ \tau_{13}\ \tau_{12}]^T$	MPa
(XYZ)	Repère lié au logiciel de modélisation CESAR-LCPC : l'axe X correspond à l'axe du forage (modèle de l'essai de surcarottage ou de l'essai biaxial) et l'axe Y correspond à la verticale	
$[\sigma]_{XYZ}$	Tenseur des contraintes dans le repère (XYZ) : $[\sigma_{XX}\ \sigma_{YY}\ \sigma_{ZZ}\ \tau_{YZ}\ \tau_{XZ}\ \tau_{XY}]^T$	MPa
A_σ	Rapport d'anisotropie des contraintes : $A_\sigma = \sigma_X / \sigma_Y$; $\sigma_Y = \sigma_Z$ σ_X; σ_Y; σ_Z : contraintes principales dans le repère (XYZ)	
P	Pression radiale uniforme appliquée sur la surface externe de la carotte creuse lors de l'essai biaxial	MPa
V_p	Vitesse de propagation d'ondes de compression ou ondes P	m/s
V_s	Vitesse de propagation d'ondes de cisaillement ou ondes S	m/s
A_V	Rapport d'anisotropie de vitesse de son = Vitesse du son dans la direction // d'anisotropie / Vitesse du son dans la direction ⊥ d'anisotropie	
R_{ext}	Rayon externe de la carotte de roche	mm
R_{sep}	Position radiale de l'interface roche-inclusion	mm
R_{jge}	Position radiale des jauges	mm
R_{int}	Rayon intérieur de l'inclusion	mm
$R_{int,cc}$	Position radiale de l'interface colle-corps de la cellule	mm
R_{cc}	Rayon intérieur de la couche d'époxy	mm
ϕ_1	Diamètre du trou pilote (trou Ex) ou diamètre interne du modèle biaxial	mm
ϕ_2	Diamètre interne de la saignée de surcarottage ou diamètre externe de l'essai biaxial	mm
ϕ_3	Diamètre externe de la saignée de surcarottage	mm
H	Côté de la section du modèle de surcarottage	mm
L_{surc}	Longueur du modèle de surcarottage (longueur du trou Ex)	mm
L_{biax}	Longueur du modèle biaxial (longueur du trou Ex)	mm
ϕ_{int}	Diamètre intérieur de la carotte creuse en ciment	mm
ϕ_{ext}	Diamètre extérieur de la carotte creuse en ciment	mm
l	Longueur de la carotte creuse en ciment	mm
ϕ	Diamètre de l'éprouvette en ciment	mm

H	Hauteur de l'éprouvette en ciment	mm
K	Coefficient correcteur qui tient compte de la présence de l'époxy dans le cas d'une roche isotrope	
K_1, K_2, K_3 et K_4	Coefficients correcteurs qui tiennent compte de la présence de l'époxy dans le cas d'une roche isotrope transverse	
t_s	Temps de séchage de la colle	h
T	Température	° C
T_{iso}	Température constante lors d'un essai DSC isotherme	° C
ΔH_R	Enthalpie massique de référence ΔH_R	J/g
ΔH_T	Enthalpie massique isotherme	J/g
$[\boldsymbol{T}]_{XYZ-123}$	Matrice de passage du repère (XYZ) au repère (123)	
$[\boldsymbol{T}]_{123-r\theta z}$	Matrice de passage du repère (123) au repère cylindrique (rθz)	
${}^{t}(\boldsymbol{V})_{r\theta z-li}$	Vecteur de passage du repère cylindrique (rθz) au vecteur rapporté à chaque jauge de la cellule CSIRO	
θ	Orientation du repère (123) lié à l'anisotropie dans le repère (XYZ) : Angle entre le plan (23) et (XY), l'axe X et l'axe 2 sont dans la même direction, θ est positif dans le sens de Y vers 3	°
$\theta_{(anisotropie)}$	Position angulaire de la jauge de la cellule CSIRO dans le repère lié à l'anisotropie (123) dans le cas particulier d'un forage dans le plan d'anisotropie : $\theta_{(anisotropie)}$ est positif dans le sens de 1 vers 2 suivant l'axe 3	°
α	Angle de rotation (α) de la cellule CSIRO dans le forage d'essai : angle de rotation de la jauge orthoradiale B90 (J6) par rapport à la verticale descendante, positif dans le sens horaire lorsque l'on regarde vers le fond du forage	°

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE/PROBLEMATIQUE

Le creusement d'un ouvrage souterrain dans un massif rocheux provoque une modification de l'état de contraintes ainsi que des pressions interstitielles. Ces modifications engendrent l'apparition d'une zone endommagée au voisinage de l'ouvrage (EDZ, Excavated Damaged Zone), dont l'extension et l'intensité peuvent compromettre la stabilité et la sûreté de ce dernier. L'étude de la zone endommagée autour de l'ouvrage souterrain nécessite une bonne connaissance :

- des lois et des paramètres qui régissent le comportement mécanique du massif ;
- des conditions aux limites qui s'exercent autour de l'ouvrage, en particulier l'état de contraintes.

Un des principes utilisés en géomécanique pour accéder aux lois de comportement d'un massif ou aux contraintes qui s'exercent sur celui-ci consiste à mesurer sa réponse en déformation sous l'effet d'une sollicitation connue (creusement d'un ouvrage, variations de température, chargement hydraulique, etc.). L'inversion de ces déformations, moyennant certaines hypothèses, permet d'obtenir des informations sur le comportement ou sur les conditions aux limites de l'objet étudié. La mesure des déformations et l'amélioration constante des méthodes et des techniques permettant d'accéder à cette mesure sont donc des aspects fondamentaux de la géomécanique.

Parmi les méthodes de mesure de déformation, certaines consistent à installer une cellule de mesure intégrée (comportant un ensemble de jauges de déformation ou de déplacement) dans un forage de petit diamètre (entre 30 et 60 mm de diamètre) et à la fixer aux parois du forage soit de manière mécanique (déploiement de « palpeurs » venant s'appuyer sur les parois du trou) ou chimique (utilisation d'une colle époxy). La mesure de déformation est, dans ce cas, celle de la paroi du forage : celle-ci peut être bidimensionnelle (radiale et orthoradiale) ou tridimensionnelle (si l'on ajoute la déformation axiale). Ce principe de mesure est utilisé, notamment, pour déterminer l'état de contraintes *in situ* par la méthode de surcarottage. Parmi les cellules les plus connues, on peut citer la cellule CSIRO, la cellule USBM ou la cellule CSIR.

Entre novembre 2005 et janvier 2006, dans le cadre d'une collaboration entre l'IRSN[1] et l'INERIS[2], une importante campagne de mesure de contraintes par surcarottage a été menée dans la station expérimentale de Tournemire (Aveyron) à l'aide de cellules CSIRO. Malgré le succès apparent des essais et l'excellente tenue mécanique des carottes récupérées, les mesures de déformation enregistrées au cours de ces essais ont révélé des phénomènes inhabituels qui ont rendu impossible, en pratique, la détermination des contraintes *in situ*. La volonté de comprendre l'origine de ces phénomènes, afin de pouvoir mieux les

[1] Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

[2] Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

maîtriser et les corriger dans les futures études, a constitué le point de départ de la présente thèse.

1.2 OBJECTIF DE LA THESE

L'objectif de cette thèse était en premier lieu d'analyser et de comprendre l'origine des phénomènes qui ont affecté les mesures des cellules CSIRO obtenues dans la station expérimentale de Tournemire en 2005-2006. Il s'agissait notamment de déterminer si ces anomalies étaient liées au comportement de l'argilite dans laquelle les mesures ont été réalisées ou si elles avaient une origine purement instrumentale. En fonction de la nature identifiée de ces phénomènes, cette thèse avait pour objectif de contribuer soit à améliorer la connaissance du comportement de l'argilite de Tournemire, soit à améliorer le protocole de mesure des déformations par cellules CSIRO. Dans ce deuxième cas, une généralisation éventuelle des résultats à d'autres types de cellules de mesure de déformation devait être étudiée.

1.3 DEMARCHE

Notre démarche a consisté, dans un premier temps, à émettre un certain nombre d'hypothèses explicatives des phénomènes observés. Pour cela, nous avons d'abord effectué une revue de la littérature existante (afin de déterminer si ces phénomènes n'avaient pas déjà été observés ou expliqués), puis nous avons réexaminé (dans ce même objectif) certains rapports de campagnes de surcarottage réalisées auparavant par l'INERIS.

Dans un deuxième temps, nous avons cherché à tester ces hypothèses, à travers différentes approches :

- la modélisation (numérique et analytique) de l'essai de surcarottage et de l'essai de caractérisation mécanique associé, appelé « essai biaxial » ;

- la mesure *in situ* : une nouvelle campagne d'essais de surcarottage, destinée à tester certaines des hypothèses invoquées, a été réalisée dans la station expérimentale de Tournemire du 3 au 18 novembre 2008 ;

- l'expérimentation en laboratoire : des essais en laboratoire, sur des échantillons de roche (éprouvettes d'argilite) mais aussi sur des matériaux-tests (carottes en ciment, échantillons de colle) ont été réalisés afin de lever certaines interrogations sur l'origine des phénomènes observés.

1.4 PLAN DU MEMOIRE

Le présent mémoire est composé de 4 chapitres. Le premier d'entre eux, intitulé « La mesure de déformation par cellule CSIRO » présente dans un premier temps la technique de mesure de déformations en forage avec cellule CSIRO et se concentre ensuite sur l'utilisation de cette cellule dans différents essais géomécaniques. Le deuxième chapitre, intitulé « Phénomènes atypiques observés lors de la mise en œuvre de mesures par cellules de déformation : exemple de la campagne de mesure de contraintes réalisée à Tournemire en 2005-2006 », met en exergue les phénomènes atypiques observés lors de la campagne de 2005-2006 et propose une première recherche d'explications, par la consultation de la littérature et la modélisation de l'essai de surcarottage. Le troisième chapitre,

« Explication des phénomènes observés », détaille les explications apportées aux différents phénomènes atypiques observés lors de la campagne d'essais géomécaniques de 2005-2006. Ces explications ont été obtenues à travers la réalisation en 2008 d'une nouvelle campagne d'essais *in situ*, complétée par des travaux en laboratoire. Le quatrième chapitre, « Analyse des caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire déterminées par essai biaxial », traite le problème de l'écart entre le rapport d'anisotropie déterminé par des essais en laboratoire et celui déterminé par des essais *in situ*. Il propose une nouvelle méthode, basée sur la modélisation numérique, pour la détermination des caractéristiques élastiques d'une roche isotrope transverse. On conclura ensuite le mémoire par une synthèse générale des résultats les plus importants des travaux réalisés durant cette thèse.

2. LA MESURE DE DEFORMATION PAR LA CELLULE CSIRO

2.1 DEFINITION D'UNE CELLULE DE DEFORMATION

Pour accéder aux lois de comportement d'un massif ou aux contraintes qui s'y exercent, un des principes utilisés en géomécanique consiste à mesurer sa réponse en déformation sous l'effet d'une sollicitation connue (creusement d'un ouvrage, variations de température, chargement hydraulique, etc.).

Une des techniques utilisées pour mesurer ces déformations consiste à utiliser des cellules de mesure en forage couplées au massif. Ces cellules se présentent sous la forme d'un équipement intégré de petite taille, comportant des jauges de déformation ou des capteurs de déplacement, qui s'installe dans un forage de petit diamètre (entre 30 et 60 mm de diamètre). La cellule est fixée soit en paroi (voir Figure 1), soit au fond du forage. Le couplage avec le terrain est assuré de manière mécanique (déploiement de palpeurs venant s'appuyer sur les parois du forage) ou chimique (utilisation d'une colle époxy, Figure 1). La déformation mesurée n'est donc pas dans ce cas celle du massif proprement dit, mais celle de la paroi d'un petit forage réalisé au sein du massif. Ces cellules sont principalement utilisées pour mesurer l'état de contraintes *in situ* (par la méthode de surcarottage) ou les variations de contraintes (si la cellule n'est pas surcarottée) [Amadei & Stephanson 1997].

Ces cellules sont le plus souvent exposées à des conditions agressives telles que l'humidité et la poussière. Elles peuvent êtres perturbées et endommagées par le processus de creusement ou d'excavation d'ouvrages souterrains. Pour s'affranchir de ces problèmes, plusieurs types de cellules ont été développés depuis des décennies à travers le monde. Amadei & Stephanson [1997] proposent une classification des cellules existantes en fonction de leurs utilisations et du procédé de fixation dans le forage. Nous donnons quelques éléments de cette classification dans l'ANNEXE A.

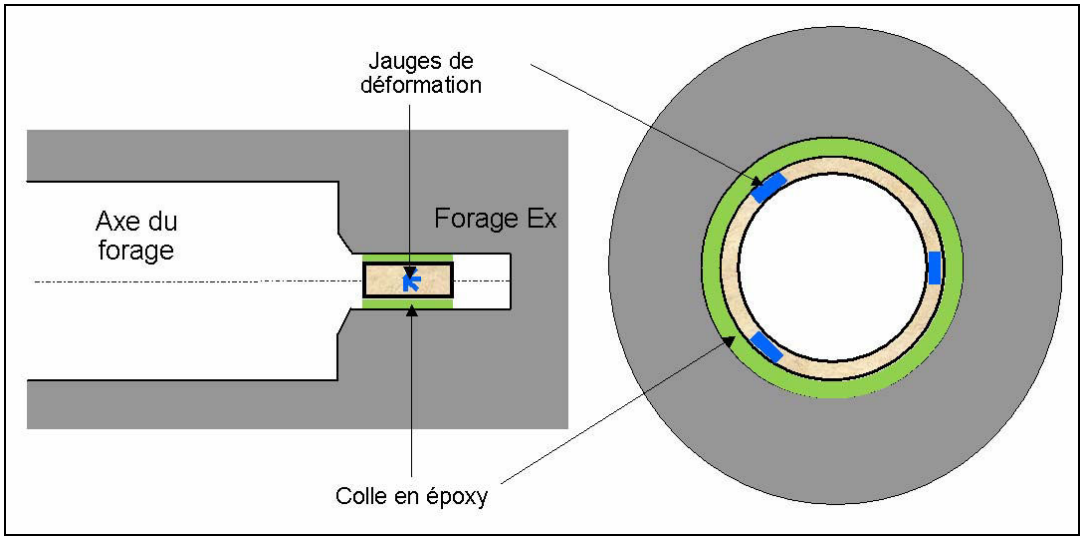


Figure 1 : Schéma simplifié d'une cellule collée en paroi d'un forage

2.2 LA CELLULE CSIRO

La cellule CSIRO fait partie de la famille des cellules de type inclusion (voir ANNEXE A). Ce type de cellule consiste en des jauges enrobées directement dans une inclusion solide ou creuse collée en fond ou en paroi d'un forage. La cellule CSIRO est composée d'un corps cylindrique creux en époxy (Figure 2 a) dont la paroi comporte 12 jauges de déformation (Figure 2 b) ainsi qu'un capteur de température (Figure 2 a). Son diamètre intérieur est de 32 mm et le diamètre extérieur de 36 mm. Le couplage entre la cellule et la paroi d'un forage de 38 mm de diamètre (appelé forage Ex) est assuré par l'extrusion d'une colle époxy (Figure 1) autour de la cellule, qui vient remplir l'espace annulaire entre la cellule et le terrain. La cellule CSIRO permet la mesure tridimensionnelle du tenseur de déformations. En effet les 12 jauges de déformations présentes dans la cellule sont orientées selon des directions différentes : 2 jauges axiales, 5 jauges orthoradiales et 5 jauges obliques (voir la Figure 3 pour l'orientation exacte des jauges). Deux types de colles en résine d'époxy peuvent être utilisés pour la cellule CSIRO :

- colle 4-10°C : appropriée pour des terrains dont la température varie entre 4°C et 10 °C ;
- colle 10-18°C : appropriée pour des terrains dont la température varie entre 10°C et 18 °C.

Le développement de cette cellule remonte à 1974. Elle a été présentée pour la première fois par Worotnicki & Walton [1976] en Australie, par la suite elle a connu différentes modifications et améliorations. La cellule CSIRO est la plus largement connue et a été utilisée dans une grande variété de roches au cours des 30 dernières années. Dans les conditions optimales (couplage parfait entre la cellule et la roche, connaissance exacte des caractéristiques élastiques de la roche), la cellule CSIRO présente l'avantage de permettre la détermination complète (3D) de l'état de contrainte au sein du milieu ausculté en un seul essai et au moyen d'un seul forage. Par contre, la cellule présente certains inconvénients : (i) elle n'est pas récupérable après utilisation, (ii) elle n'est pas utilisable dans des roches très souples à cause des contraintes de traction qui se développent dans ce cas au niveau de l'interface cellule-roche. Cependant, Cai & Blackwood [1991] ont présenté une méthode de récupération de la cellule après utilisation et Walton & Worotnicki [1986] ont développé une nouvelle version qui permet d'éviter les problèmes d'interface cellule-roche. Cette dernière version de la cellule CSIRO porte le nom de «thin-walled version of CSIRO HI cell » (cellule à paroi mince).

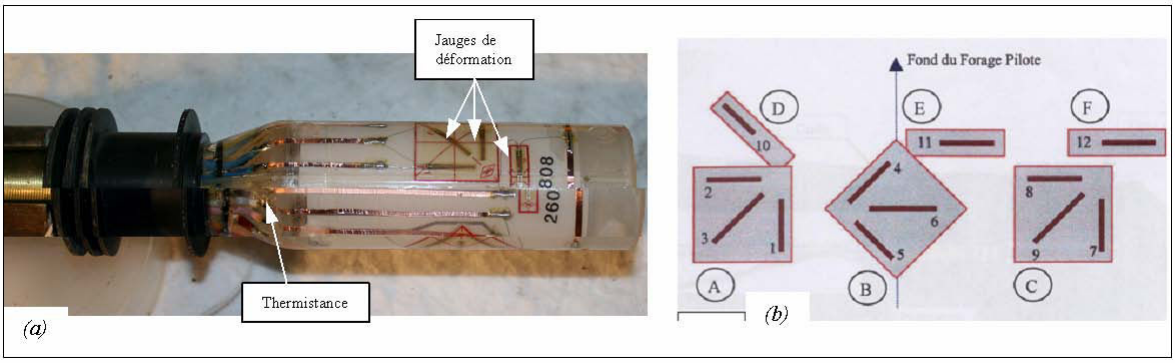
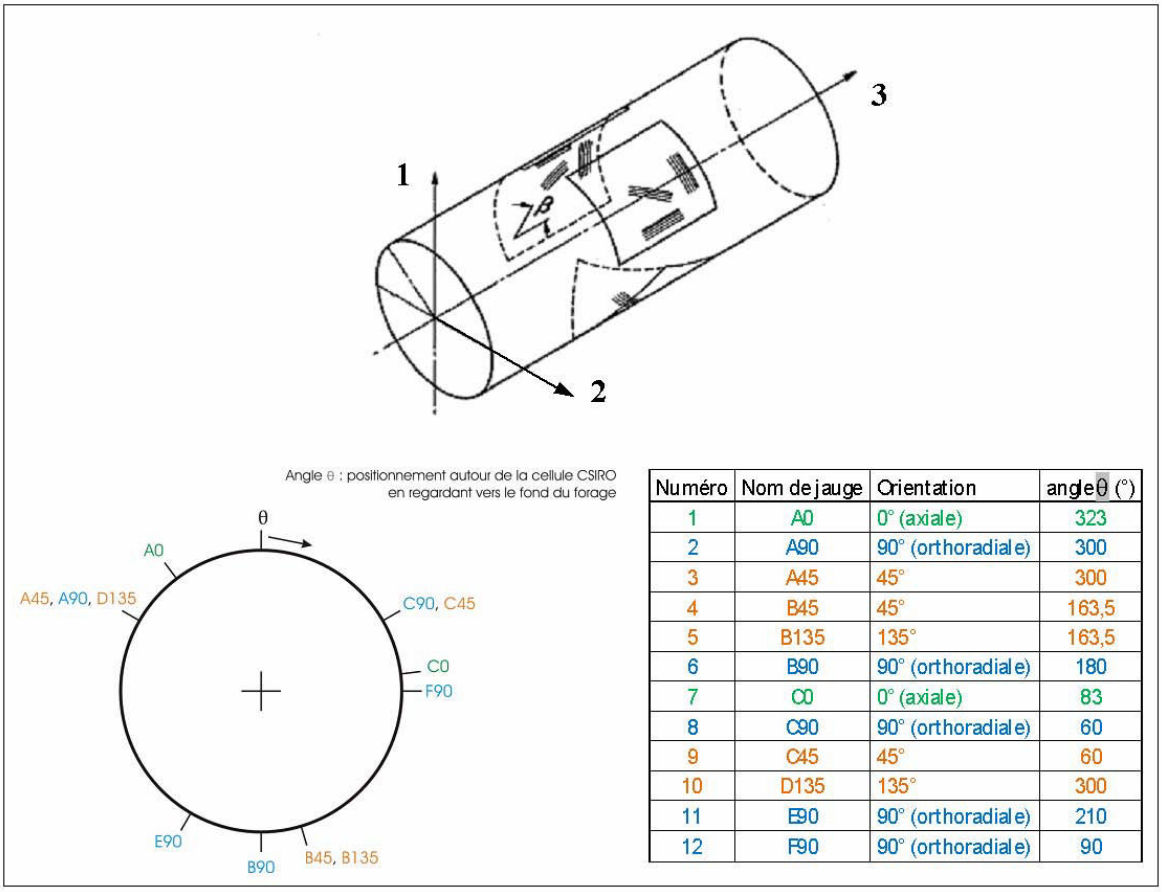


Figure 2 : (a) Détail du corps de la cellule CSIRO, (b) Position des jauges de déformation et des rosettes (groupes de jauges) sur le corps de la cellule (pour un schéma de la cellule, consulter la Figure 94 de l'ANNEXE B).



Numéro	Nom de jauge	Orientation	angle θ (°)
1	A0	0° (axiale)	323
2	A90	90° (orthoradiale)	300
3	A45	45°	300
4	B45	45°	163,5
5	B135	135°	163,5
6	B90	90° (orthoradiale)	180
7	C0	0° (axiale)	83
8	C90	90° (orthoradiale)	60
9	C45	45°	60
10	D135	135°	300
11	E90	90° (orthoradiale)	210
12	F90	90° (orthoradiale)	90

Figure 3 : Positionnement et orientation des jauges de déformation

Le concept de la cellule CSIRO à paroi mince lui permet de se déformer plus facilement avec la roche. En effet, le corps de la cellule est en fait composé de deux couches concentriques mécaniquement indépendantes : une couche extérieure de 0,5 mm d'épaisseur et une couche interne de 1,5 mm d'épaisseur (Figure 4). Les 12 jauges de la cellule sont attachées à la surface interne de la couche externe [Worotnicki, 1993]. C'est seulement la couche externe

(accompagnée des jauges de déformation) du corps de la cellule qui est couplée à la roche par l'intermédiaire de la couche de colle (voir Figure 4).

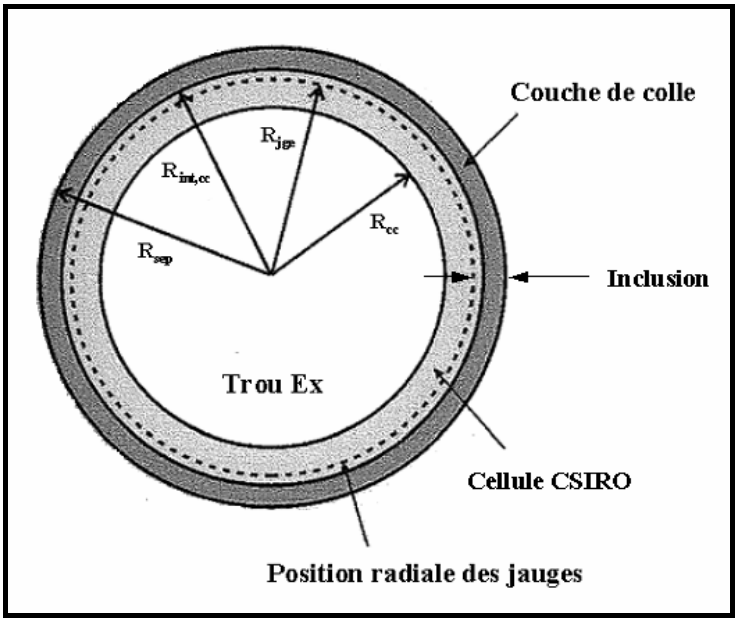


Figure 4 : Section de la cellule CSIRO à paroi mince. R_{sep} : position radiale de l'interface roche-inclusion, $R_{int,cc}$: position radiale de l'interface colle-corps de la cellule, R_{jge} : position radiale des jauges et R_{cc} : rayon intérieur de la couche d'époxy ;

Nous adopterons dans la suite de notre travail la terminologie suivante :

- « Corps de la cellule » : la couche externe de la cellule CSIRO composée d'époxy et portant les jauges de déformation ;
- « Colle » : résine époxy utilisée pour le couplage mécanique de la cellule et de la paroi du forage ;
- « Inclusion » : ensemble composé de la colle et du corps de la cellule.

2.3 UTILISATION DES CELLULES CSIRO LORS D'ESSAIS DE SURCAROTTAGE

2.3.1 HISTORIQUE

Hast [1958] fut le premier à avoir proposé le surcarottage d'un instrument placé à une profondeur importante (10-20 m) dans un forage de petit diamètre (26 mm). Le développement de l'instrument utilisé lors de cet essai a commencé dès le début des années 40 [Hast, 1943]. Il consiste en une cellule de nickel magnétostrictif qui mesure directement la contrainte dans la direction du forage à partir de la variation de la perméabilité magnétique du nickel.

La mesure de déformations lors d'essais de surcarottage à partir de jauges collées au fond de forage remonte aux expérimentations menées par Mohr [1956] en Allemagne, Slobodov [1958] en Russie et Leeman [1964] en Afrique du Sud. La technique de surcarottage a eu plus de succès lors d'apparition des cellules de

mesure de déformations notamment la cellule CSIR [Leeman & Hayes, 1966] et la cellule CSIRO [Worotnicki & Walton, 1976].

Nous exposerons dans ce chapitre d'une manière plus détaillée, l'utilisation de la cellule CSIRO lors de l'essai de surcarottage.

2.3.2 PRINCIPE DE L'ESSAI

La méthode de surcarottage est une méthode de détermination des contraintes *in situ* par relaxation des terrains. L'essai de surcarottage consiste à mesurer les déformations en paroi d'un petit forage engendrées par la réalisation, autour de ce forage, d'une saignée cylindrique concentrique destinée à relacher les contraintes du terrain. Le forage ainsi que la saignée de surcarottage sont réalisés à l'aide d'une foreuse dont un exemple est présenté sur la Figure 5. Les mesures se font à l'aide d'une cellule CSIRO Hi 12. Il est alors possible de déterminer l'état de contrainte régnant dans la zone d'essai par inversion des déformations mesurées à condition de connaître les caractéristiques élastiques de la roche. En général, cette inversion repose sur l'hypothèse que la roche est homogène et a un comportement élastique linéaire.

Figure 5 : Réalisation du « trou pilote dans la station expérimentale de Tournemire (pour le schéma du carottier, voir la Figure 95 de l'ANNEXE B)

L'essai de surcarottage permet de déterminer les contraintes à une profondeur suffisamment importante (10 à 20 m) pour s'affranchir des perturbations induites par la cavité à partir de laquelle le forage est réalisé.

2.3.3 PROTOCOLE

Le principe est illustré par la Figure 6 : un premier forage de 146 mm diamètre dit « forage principal » est creusé jusqu'à la zone dans laquelle on souhaite déterminer l'état de contraintes. Un second forage dit « trou pilote » (ou « trou

EX ») de 38 mm de diamètre, coaxial au premier, est ensuite creusé sur une longueur d'environ 60 centimètres dans le prolongement du premier forage.

Une cellule CSIRO est ensuite placée au sein de ce trou pilote. La cellule est couplée à la roche par l'intermédiaire d'une colle (Figure 93, ANNEXE A), qui vient remplir l'espace annulaire entre la cellule et le terrain.

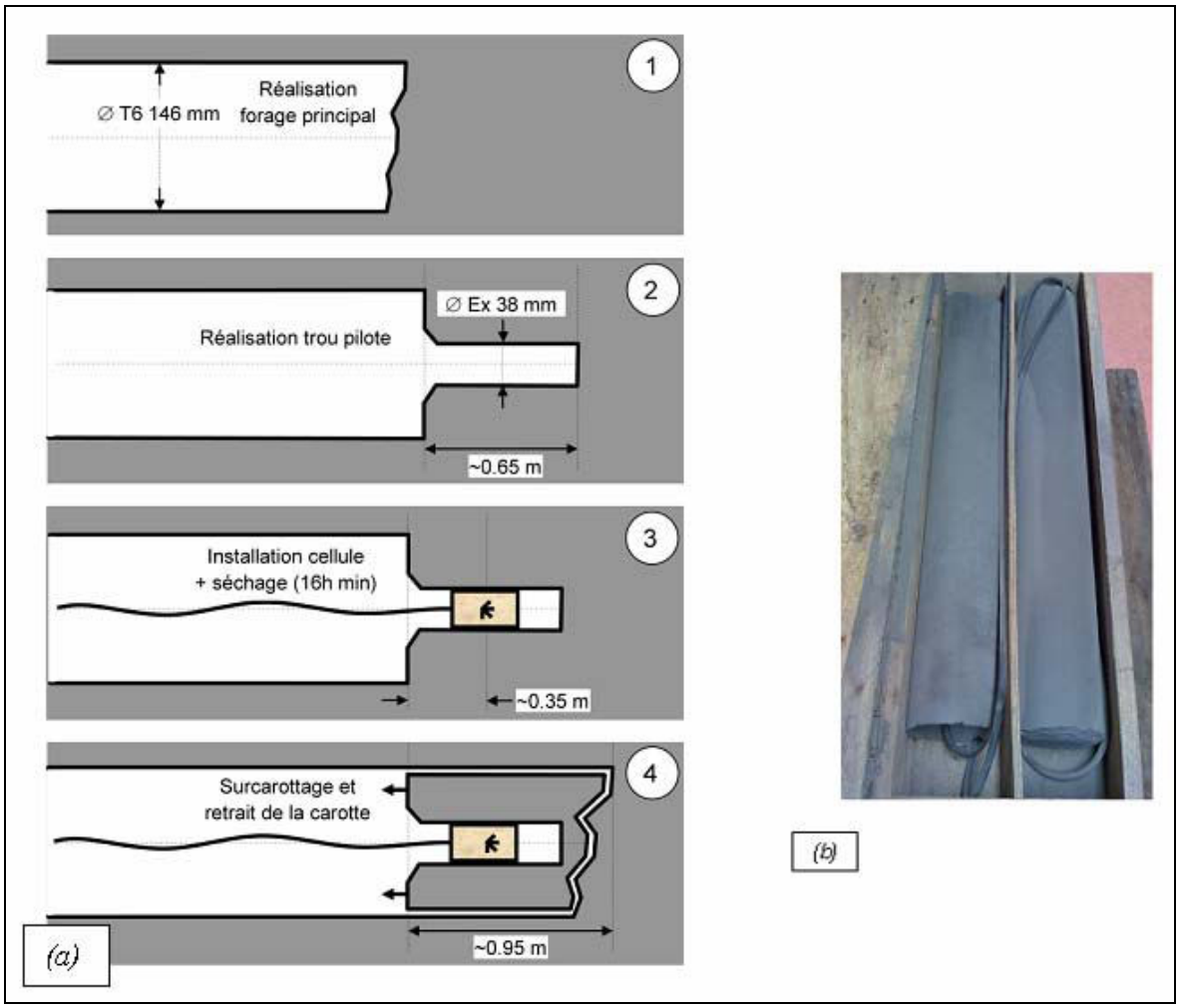


Figure 6 : (a) principe du surcarottage (b) carottes obtenues lors de surcarottage

La colle utilisée dans ce genre d'essai est une résine époxy préparée à partir du mélange entre une base et un durcisseur. Ce mélange ne peut être réalisé qu'après le forage du trou pilote (phase 2, Figure 6), il nécessite une durée de cinq minutes de malaxation. Le temps nécessaire pour le durcissement de la colle est appelé « temps de séchage ». Dans cette étude on définira le temps de séchage comme étant le temps entre la pose de la cellule (fil témoin de fin de pistonnage coupé) et le début du surcarottage. Dans le domaine de la chimie cette résine d'époxy est considéré comme un polymère, d'où l'appellation du « temps de polymérisation ».

Lorsque le séchage de la colle est obtenu, le surcarottage proprement dit est effectué. Celui-ci consiste à réaliser une saignée autour de la cellule en prolongeant le forage principal (Figure 6), de manière à isoler la cellule des

contraintes du massif. Au cours du surcarottage, la couche externe du corps de la cellule se détache de la couche interne (voir § 2.2) de sorte que l'épaisseur réelle de la portion du corps couplée avec la roche est de 0,5 mm (Figure 4).

Les déformations enregistrées par les jauges sous l'effet de ce relâchement des contraintes sont alors inversées afin de remonter à l'état de contraintes qui permet d'expliquer au mieux ces déformations.

2.3.4 MESURES OBTENUES DANS LE CAS IDEAL

Dans un cas idéal, les courbes de déformation des 12 jauges d'une cellule CSIRO obtenues au cours du surcarottage sont semblables à celles présentées sur la Figure 7. Elles se caractérisent par :

- une première phase durant laquelle les déformations sont quasiment nulles (correspondant au début de surcarottage),
- puis une phase de déformations transitoires comportant généralement un 1er pic (juste avant que le carottier ait atteint le plan de mesure) puis un 2ème pic de signe inverse (juste après que le carottier ait dépassé le plan de mesure, jauges axiales et quelques jauges orthoradiales Figure 7),
- et enfin une 3ème phase où les déformations se stabilisent sur une valeur plateau (correspondant au relâchement total des contraintes) [Worotnicki, 1993].

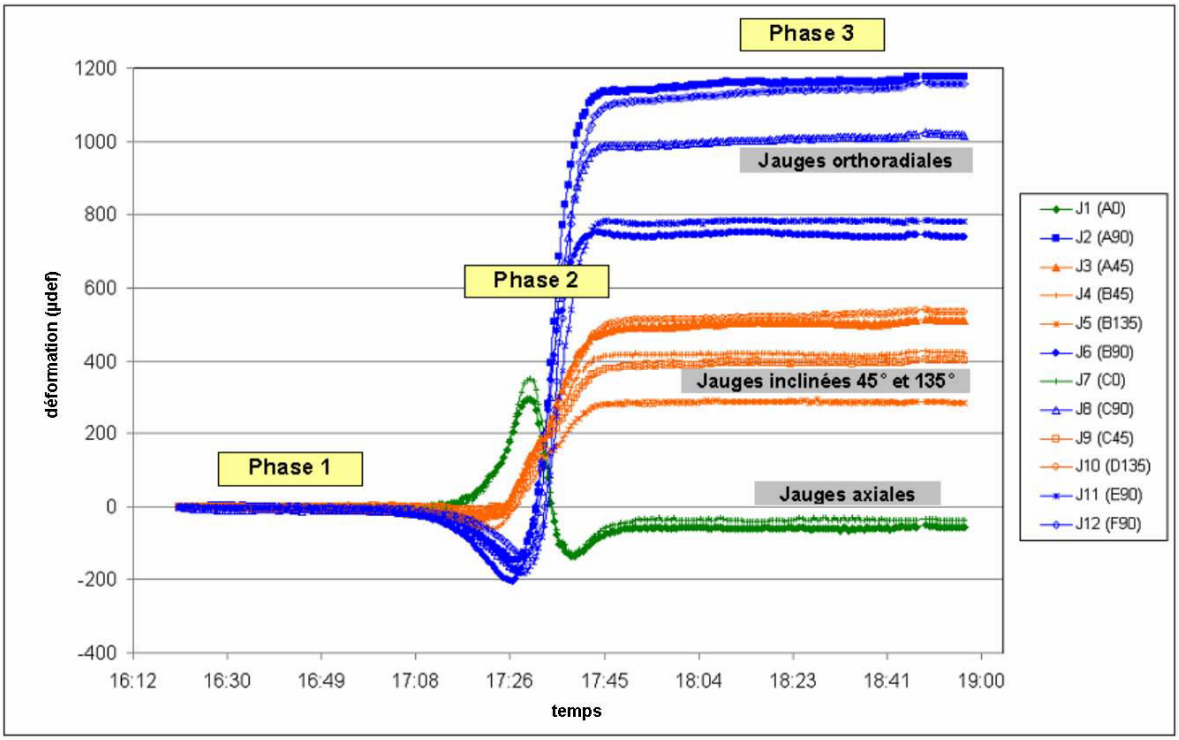


Figure 7 : Essai de surcarottage ; courbes types de déformations typiques obtenues dans l'argilite de Tournemire [rapport INERIS – DRS-10-97197-04334A ; Lahaie, 2010]

2.3.5 PRINCIPE D'INTERPRETATION

Le principe d'interprétation le plus courant consiste à inverser les déformations obtenues à la fin du surcarottage, dites « valeurs plateau », en utilisant des formulations analytiques basées sur la théorie du trou cylindrique en milieu élastique linéaire et adaptées à la configuration particulière de la cellule CSIRO (présence de l'inclusion entre les jauges et la paroi du trou). Ces formulations ont les hypothèses communes suivantes :

- trou circulaire de longueur infini (déformations planes) revêtu d'une inclusion représentant à la fois le corps extérieur de la cellule et la couche de la colle,
- roche continue homogène élastique linéaire (isotrope ou anisotrope selon les formulations),
- inclusion homogène élastique linéaire isotrope,
- caractéristiques élastiques identiques pour le corps de la cellule et la colle,
- couplage parfait entre l'inclusion et la roche,
- mesures de déformations considérées comme ponctuelles,

Dans le cas d'une roche isotrope, la formulation est donnée dans Duncan Fama & Pender [1980]. Dans le cas d'un milieu anisotrope, celle-ci est fournie dans Amadei [1983]. Un tableau fourni en ANNEXE C expose les différentes références disponibles dans la littérature ayant traité ces problèmes et renseignes sur les éléments suivants :

- les lois de comportements adoptées pour la roche et l'inclusion ;
- la géomèterie du modèle bicouche ;
- la nature du chargement ;
- les hypothèses de calcul ;
- les méthodes de résoultion (analytique, semi-analytique, numérique)

L'expression analytique des déformations ε_i^* attendues sur chaque jauge de la cellule CSIRO pour chaque composante σ^0_i du tenseur de contraintes en champ lointain (suffisamment loin pour qu'il ne soit pas influencé par le forage) permet alors d'écrire un système d'équations linéaires à 12 équations (le nombre de jauges) et 6 inconnues (les six composantes indépendantes du tenseur de contraintes :

$$\left[\varepsilon_i^*\right]_{i=1...12} = \left[\mathrm{M}_{ij}\right]_{i=1...12} \bullet \left[\sigma_j^0\right]_{j=1...6} \qquad (1)$$

La matrice rassemble des matrices de passage d'un repère à un autre et la matrice d'élasticité de la roche. Pour son expression se référer à l'ANNEXE U-2.

L'estimation du tenseur de contraintes $[\sigma^0]$ au point de mesure à partir des déformations mesurées au surcarottage revient alors à un problème d'inversion, consistant à résoudre le système :

$$\left[\varepsilon_i\right]_{i=1...12} = \left[\mathrm{M}_{ij}\right]_{i=1...12} \bullet \left[\sigma_j^0\right]_{j=1...6} \qquad (2)$$

Ce problème, qui comporte plus de données que d'inconnues (problème surdéterminé), est typiquement résolu par la méthode des moindres carrés.

On obtient ainsi une estimation du tenseur de contraintes le plus vraisemblable, c'est-à-dire celui qui permet de minimiser l'écart entre les déformations attendues ε_i^* et mesurées ε_i, ainsi qu'un indicateur de cet écart. Un exemple d'indicateur qui sera régulièrement utilisé par la suite est le COV (Coefficient of Variation) [Kaiser *et al.*, 1990] :

$$\boldsymbol{CoV} = \left[\frac{\sum_i \left(\varepsilon_i - \varepsilon_i^*\right)^2}{\sum_i \left(\varepsilon_i^*\right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

Si la valeur de cet indicateur est jugée trop élevée à l'issue de la 1ère itération d'inversion, c'est-à-dire si la solution proposée pour $[\sigma^0]$ n'est pas jugée satisfaisante, il peut être décidé de retirer du système une ou plusieurs données (c'est-à-dire une ou plusieurs jauges). Toutefois, il est indispensable de bien s'assurer, avant de retirer une jauge, de la légitimité de cette opération, que ce soit par des observations de terrain qui portent à croire que la jauge est défaillante, ou bien par le comportement suspect de la courbe de déformation correspondante au cours du surcarottage. Un cas typique d'évolution suspecte d'une courbe de déformation est celui où une des jauges (ou un ensemble de jauges appelé « rosette », Figure 2 b) se décolle de la paroi du trou sous l'effet de la détente du terrain au cours du surcarottage. Il se produit alors une variation brutale de la déformation sur cette jauge, qui peut être facilement identifiée sur l'enregistrement des courbes de surcarottage.

Des méthodes d'inversion plus sophistiquées, utilisant par exemple les valeurs transitoires de déformation au cours du surcarottage (inversion « étape par étape ») [Fouial, 1997 et Hakala, 2006] ou bien des hypothèses de comportement non-élastique de la roche [Nechnech, 1998 et Giot, 2004], ont également été développées ces dernières années. Ces approches nécessitent de faire appel à la modélisation numérique de l'essai de surcarottage.

2.4 UTILISATION DES CELLULES CSIRO LORS DES ESSAIS BIAXIAUX SUR CYLINDRES CREUX

2.4.1 PRESENTATION DE LA CELLULE BIAXIALE

Comme nous l'avons déjà mentionné, la détermination des contraintes *in situ* par la méthode de surcarottage implique la connaissance des caractéristiques élastiques de l'annulaire de la roche sollicité au cours de l'essai. Cette détermination peut être effectuée par la réalisation d'un essai appelé « essai biaxial ».

La détermination des caractéristiques élastiques d'une roche par cellule biaxiale a été proposée pour la première fois par Fitzpatrick [1962] au sein du US Bureau of Mines. La « cellule de Hoek-Franklin », dite cellule biaxiale (voir Figure 8), est utilisée pour vérifier la réponse de la roche à des cycles de chargement et de déchargement ainsi pour déterminer si le comportement de la roche peut être considéré comme élastique linéaire dans la gamme de contraintes du site [Amadei

& Stephanson, 1997]. Elle peut aussi être utilisée pour évaluer l'anisotropie ou l'hétérogénéité de la roche, ou encore l'excentricité d'un forage. Elle est constituée essentiellement d'une chambre cylindrique en acier, d'une membrane interne étanche en caoutchouc et d'une pompe de pression hydraulique (voir Figure 9).

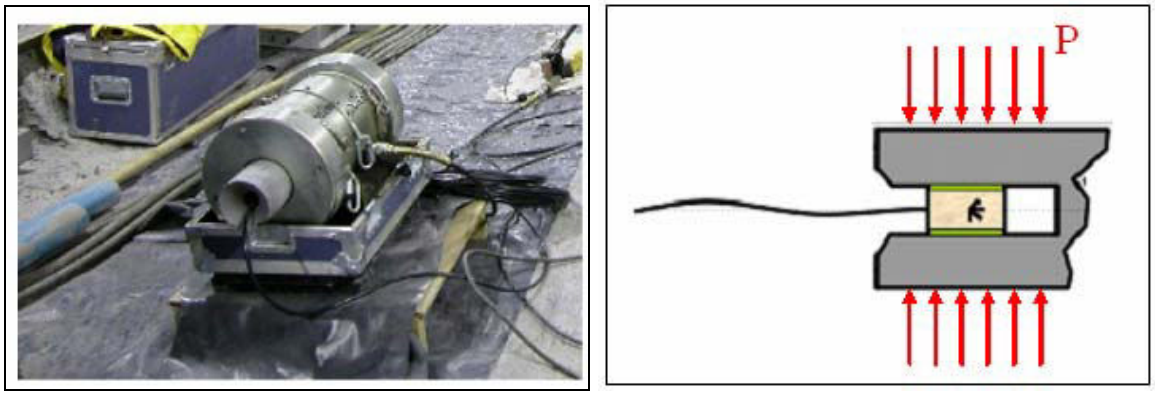


Figure 8 : Essai biaxial, cellule de Hoek-Franklin [Worotnicki, 1993]

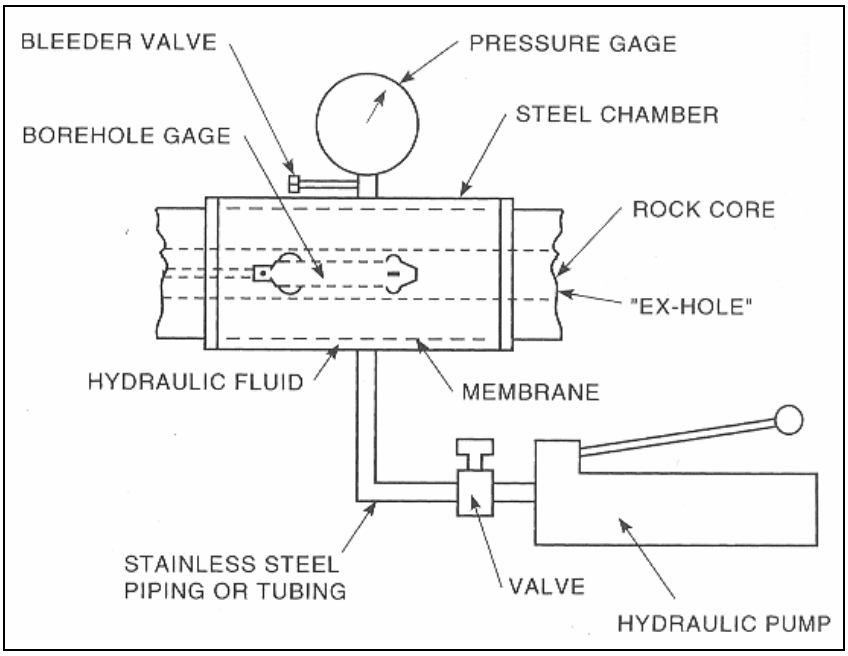


Figure 9 : Schéma de la cellule de Hoek-Franklin [Amadei & Stephanson 1997]

2.4.2 PRINCIPE DE L'ESSAI

Le principe de cet essai est de soumettre la carotte récupérée après le surcarottage encore instrumentée, à un chargement radial uniforme afin d'en déterminer les caractéristiques élastiques, particulièrement durant la phase de décharge [Amadei & Stephanson, 1997].

L'avantage majeur de cet essai est qu'il est réalisé juste après le surcarottage, i.e. dans les conditions les plus proches des conditions *in situ*, sur le même échantillon

de roche et avec le même dispositif instrumental que celui utilisé au cours du surcarottage. Un autre avantage très apprécié sur ce type d'essai en utilisant la cellule CSIRO, est la possibilité de déterminer les caractéristiques élastiques de la roche (isotrope ou isotrope transverse) à partir d'un seul essai biaxial. Cependant, le processus de détermination des caractéristiques élastiques à partir des courbes contrainte-déformation biaxiale est délicat, en raison de (i) l'éventuelle anisotropie du comportement élastique de la roche ainsi que (ii) la présence d'une inclusion creuse qui séparent les jauges de la roche.

Dans le cas d'une roche isotrope, des solutions analytiques [Worotnicki, 1993] sont disponibles et peuvent être appliquées pour tenir compte de la présence de l'inclusion. Dans le cas d'une roche isotrope transverse, plusieurs solutions analytiques ou semi-analytiques [Worotnicki, 1993 ; Amadei 1983 …] ont été proposées dans la littérature. Toutefois, elles ne sont pas pleinement satisfaisantes car elles reposent sur différentes hypothèses (parfois critiquables) concernant la répartition des contraintes dans l'annulaire de roche et l'inclusion, l'orientation de l'anisotropie de roche, l'absence d'inclusion, etc.

2.4.3 PROTOCOLE

Le principe est illustré par la Figure 10 : le cylindre creux de roche, instrumenté par la cellule CSIRO, est installé à l'intérieur de la membrane dans la cellule biaxiale. Nous appliquons par la suite sur la roche un ou plusieurs cycles successifs de charge-décharge par l'intermédiaire de la pompe hydraulique. Lors de la phase de chargement, nous appliquons des paliers de pression durant lesquels nous mesurons la réponse en déformation sur chacune des jauges de la cellule. Le travail est repris lors de la phase de déchargement pour mesurer les déformations au cours du relâchement du cylindre de roche.

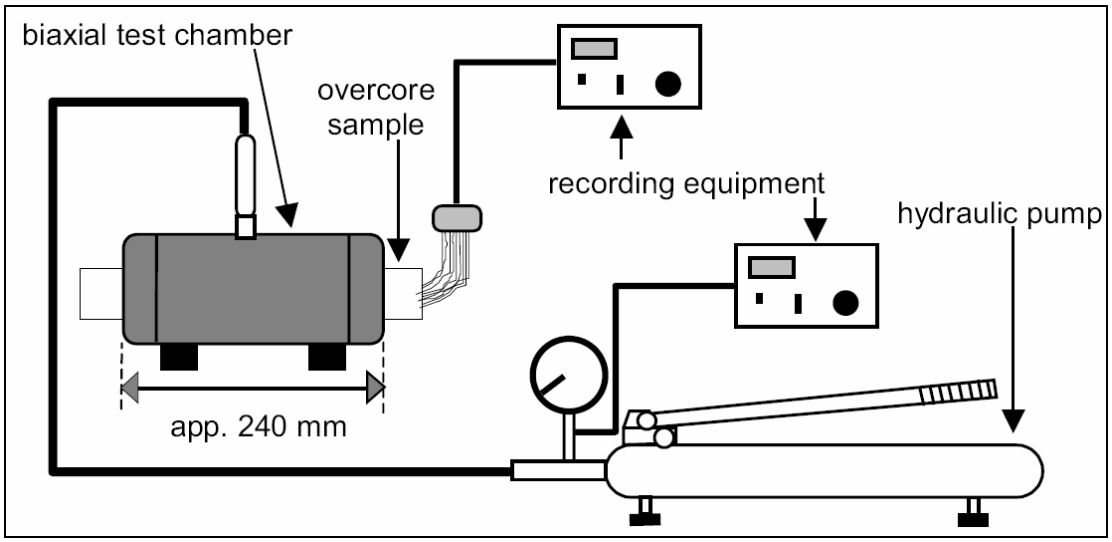


Figure 10 : Schéma de l'essai biaxial [Sjöberg & Perman, 2006]

2.4.4 MESURES OBTENUES DANS LE CAS IDEAL

Les déformations mesurées par les 12 jauges d'une cellule CSIRO au cours d'un essai biaxial sont présentées en fonction du temps sur la Figure 11 et sous forme

de courbes contrainte-déformation sur la Figure 12. À partir de la pente des courbes pression-déformation établies pour chacune des 12 jauges, on détermine les caractéristiques élastiques de la roche en utilisant des formules analytiques dans le cas de roches isotropes [Worotnicki, 1993] et semi-analytique [Worotnicki, 1993 et [Amadei, 1983] dans le cas de roches anisotropes. Cet essai permet aussi de vérifier le bon fonctionnement des jauges. Un certain nombre de tests consistant à comparer les déformations des jauges situées à une même position orthoradiale ou ayant la même orientation, permettent de fournir des indications sur l'homogénéité et l'anisotropie de la roche. En effet dans le cas d'une roche isotrope, lorsque les courbes obtenues par les jauges orthoradiales se superposent ceci indique le milieu est localement homogène. Cependant si dans le même cas les courbes sont dispersées, ceci indique que le milieu est hétérogène. Dans le cas d'une roche homogène, si les courbes obtenues à partir des jauges orthoradiales sont dispersées, le matériau est donc anisotrope. Plus les courbes sont dispersées plus l'anisotropie de la roche est forte.

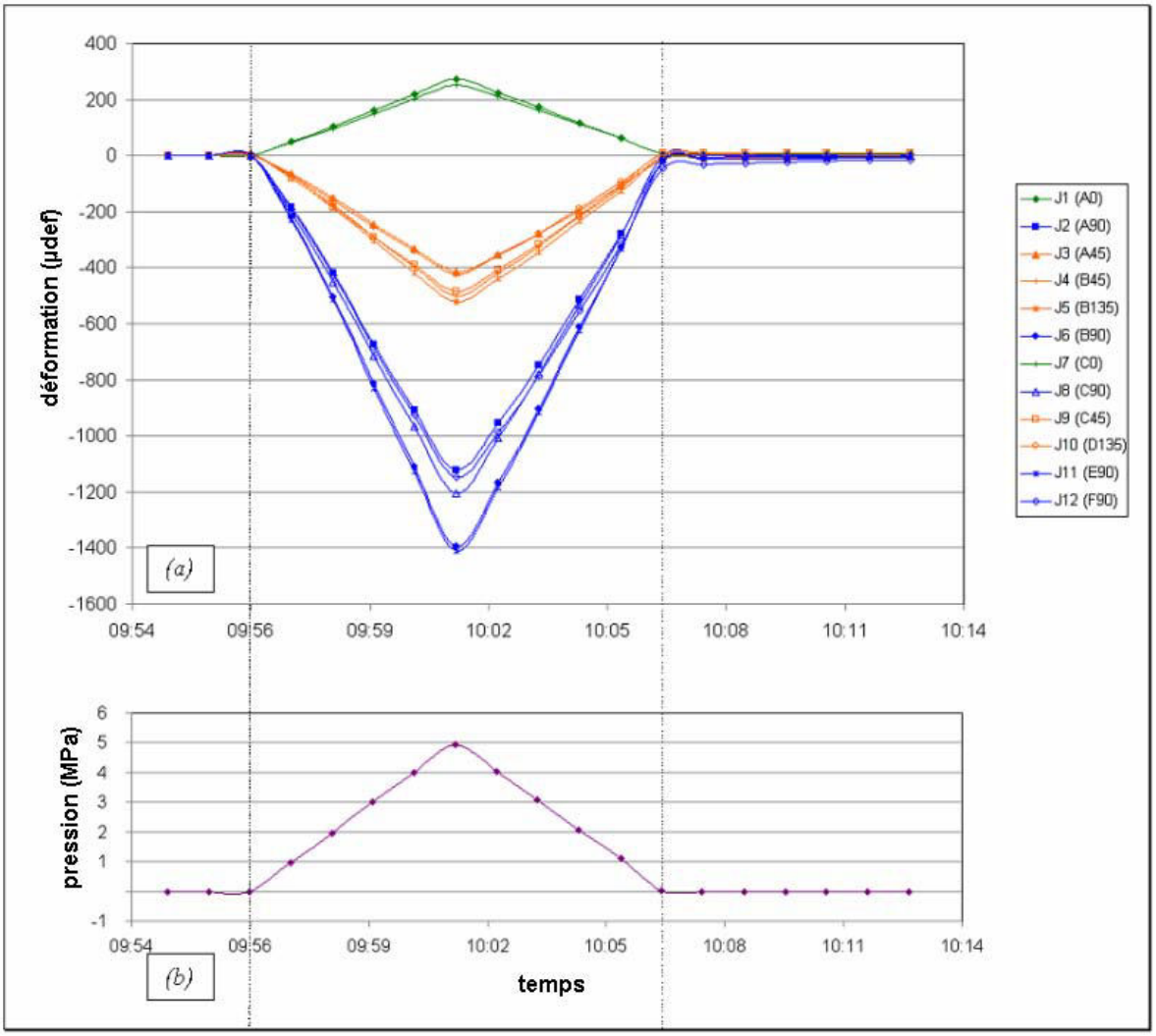


Figure 11 : (a) Courbes typiques de déformations obtenues lors de l'essai biaxial, (b) courbe de variation de la pression appliquée lors de l'essai biaxial [rapport INERIS – DRS-10-97197-04334A ; Lahaie, 2010]

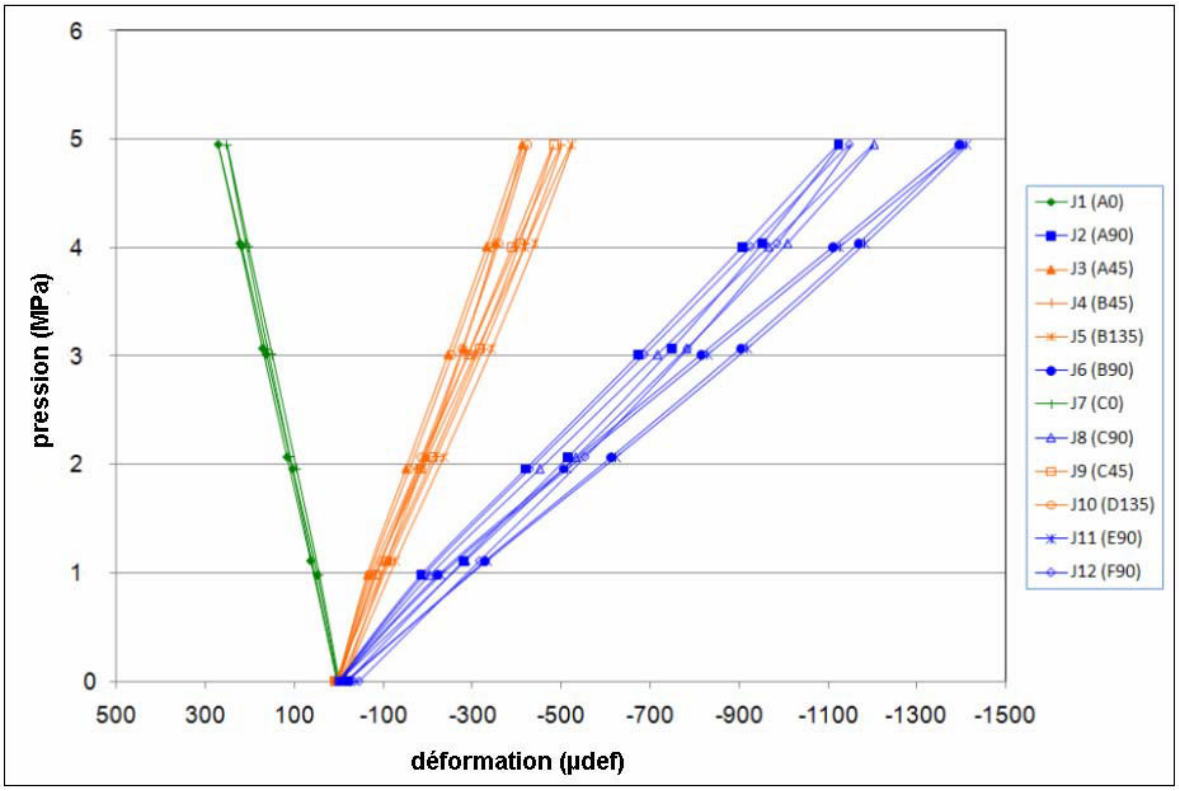


Figure 12 : Courbes contrainte-déformation obtenues lors d'un essai biaxial [rapport INERIS – DRS-10-97197-04334A ; Lahaie, 2010]

2.4.5 PRINCIPE D'INTERPRETATION

L'interprétation de l'essai biaxial comporte deux étapes :

- Calcul des pentes des courbes pression-déformations appliquées au cours de la phase de décharge, qui reproduit au mieux le comportement de la roche au cours du surcarottage, initialement sous contrainte dans le massif.
- Détermination des caractéristiques élastiques de l'anneau de surcarottage à partir de la valeur des pentes déterminées précédemment et des formulations analytiques idoines basées sur la théorie du cylindre creux en élasticité linéaire et adaptées à la configuration particulière de la cellule CSIRO (présence d'une inclusion entre les jauges et la paroi du trou).

Dans le cas d'une roche homogène élastique isotrope, les cinq jauges orthoradiales fournissent la même valeur ($\varepsilon_{\theta\theta}$), de même que les jauges axiales (ε_{zz}) et inclinées ($\varepsilon_{\pm 45°}$) qui respectent en outre la relation :

$$\varepsilon_{\pm 45°} = (\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz})/2 \qquad (4)$$

Dans ce cas, nous obtenons à partir de l'essai biaxial deux valeurs indépendantes ($\varepsilon_{\theta\theta}$ et ε_{zz}) qui permettent de résoudre exactement le système de deux équations [Worotnicki, 1993] à deux inconnues (module de Young et coefficient de Poisson) :

$$\begin{cases} \boldsymbol{E_r} = 2\boldsymbol{K}\dfrac{\boldsymbol{R_{ext}^2}}{\boldsymbol{R_{ext}^2} - \boldsymbol{R_{sep}^2}}\dfrac{\boldsymbol{P}}{\varepsilon_{\theta\theta}} \\ \nu_{\boldsymbol{r}} = -\boldsymbol{K}\dfrac{\varepsilon_{\boldsymbol{zz}}}{\varepsilon_{\theta\theta}} \end{cases} \qquad (5)$$

P : la pression appliquée uniformément par la cellule biaxiale sur la surface externe du corps de la roche ;

R_{ext} : rayon externe du cylindre creux en roche ;

R_{sep} : position radiale de l'interface roche- inclusion;

K : coefficient correcteur qui tient compte de la présence de l'inclusion.

Dans le cas d'un milieu anisotrope, il n'existe pas de solution analytique générale à ce jour. Des travaux conséquents ont été réalisés par Amadéi [1983], Nunes [2002] et Souley [2008]. Le tableau fourni en ANNEXE C mentionné dans le § 2.3.5 rassemble pour mémoire les différentes références disponibles dans la littérature ayant traité ces problèmes et propsé des solutions pour la détermination des caractéristiques élastiques à partir de l'essai biaxial.

Cependant, il est possible d'obtenir une estimation des paramètres élastiques isotropes transverses d'une roche à partir d'une méthode approchée qui consiste à utiliser les formulations en isotrope [Worotnicki, 1993] mais en les appliquant individuellement à chacune des jauges orthoradiales, de façon à calculer un module de Young « apparent » jauge par jauge (voir § 5.2.2.1) :

$$\begin{cases} \boldsymbol{E}_1 = 2\boldsymbol{K}\dfrac{\boldsymbol{R_{ext}^2}}{\boldsymbol{R_{ext}^2} - \boldsymbol{R_{sep}^2}}\dfrac{\boldsymbol{P}}{\varepsilon_{\theta\theta}^{\perp}} \\ \boldsymbol{E}_2 = 2\boldsymbol{K}\dfrac{\boldsymbol{R_{ext}^2}}{\boldsymbol{R_{ext}^2} - \boldsymbol{R_{sep}^2}}\dfrac{\boldsymbol{P}}{\varepsilon_{\theta\theta}^{//}} \\ \nu_{12} = -\boldsymbol{K}\dfrac{\varepsilon_{\boldsymbol{zz}}}{\varepsilon_{\theta\theta}^{//}} \\ \nu_{23} = -\boldsymbol{K}\dfrac{\varepsilon_{\boldsymbol{zz}}}{\varepsilon_{\theta\theta}^{\perp}} \\ \boldsymbol{G}_{12} = \dfrac{\boldsymbol{E}_1\boldsymbol{E}_2}{\boldsymbol{E}_1 + \boldsymbol{E}_2(1+2\nu_{12})} \end{cases} \qquad (6)$$

Nous reprendrons plus en détail ces formulations ainsi que les différents paramètres qu'ils intègrent dans le chapitre 5.

3. PHENOMENES ATYPIQUES OBSERVES LORS DE LA MISE EN ŒUVRE DE MESURES PAR CELLULES DE DEFORMATION : EXEMPLE DE LA CAMPAGNE DE MESURE DE CONTRAINTES REALISEE A TOURNEMIRE EN 2005-2006

3.1 PRESENTATION PREALABLE DU SITE DE TOURNEMIRE

3.1.1 GENERALITES

3.1.1.1 INTRODUCTION GENERALE

En France, la responsabilité de concevoir et de réaliser un éventuel stockage géologique de déchets radioactifs a été confiée à l'Andra[3]. En application de la loi de programme du 28 juin 2006, l'instruction de la demande d'autorisation de création de l'installation est prévue en 2015 et sa mise en service en 2025. Au cours de ce processus, l'IRSN a la charge d'évaluer pour le compte des autorités, la sûreté du projet qui sera proposé par l'Andra. Afin d'assurer cette mission et mener une expertise techniquement crédible et indépendante, l'IRSN se doit d'acquérir des connaissances spécifiques et de développer et maintenir ses compétences. C'est dans ce but qu'il mène, depuis près de 20 ans, un programme de recherche sur son site expérimental du tunnel de la Boutinenque (également connu sous le nom de site de Tournemire) dans le Sud Aveyron.

3.1.1.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE

Ce tunnel ferroviaire de 1885 mètres de long, percé à la fin du XIXe siècle, est situé en bordure du Massif Central. Il traverse une formation argileuse compacte de 250 mètres d'épaisseur, surmontée de 250 mètres de calcaires (Figure 13). Datant du Jurassique inférieur (Toarcien et Domérien), elle s'est formée en domaine marin il y a environ 180 millions d'années. Il s'agit d'une marne silteuse compactée, encore appelée argilite. Elle est principalement constituée d'argile, de calcite et de quartz. Nous présentons dans le Tableau 1 la minéralogie de l'argilite de Tournemire telle que caractérisée par Bonin [1998]. Les pourcentages sont donnés par rapport à la masse humide.

[3] Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

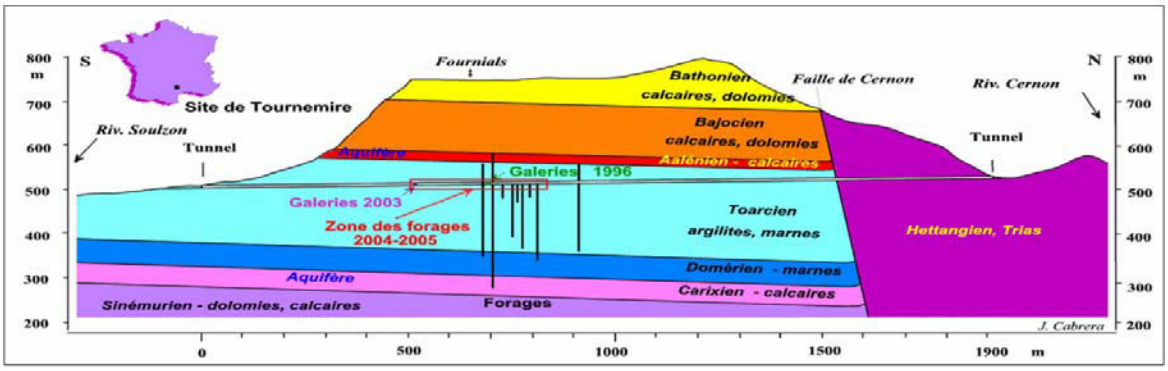


Figure 13 : Coupe Géologique de la station expérimentale de Tournemire [Cabrera et al, 2001]

Composants	(%) massique
Illite et Illite-smectite (interstratifiés)	30-40 %
Kaolinite	10-15 %
Chlorite	2-5 %
Quartz	20-25 %
Carbonates	10-20 %
Pyrite	0-3 %
Matière organique	1 %
Eau	3,5 %

Tableau 1: Caractéristiques minéralogiques des argilites de Tournemire [Bonin, 1998]

Du fait de ses caractéristiques minéralogiques, l'argilite de Tournemire présente des analogies fortes avec les formations argileuses étudiées à Bure, dans l'Est de la France (Meuse/Haute-Marne), par l'Andra en vue de la création d'un stockage géologique de déchets radioactifs. Le tunnel de Tournemire offre ainsi à l'IRSN un terrain sur lequel ses équipes de recherche peuvent développer l'expertise nécessaire à l'Institut pour juger de la qualité et des fondements scientifiques des données acquises par l'Andra et des dossiers techniques qui seront soumis aux pouvoirs publics.

Quatre galeries ont été creusées à partir du tunnel : respectivement galeries principale, secondaire, Est et Ouest. Les galeries Est et Ouest ont été creusées en 1996, les galeries principales et secondaires ont été creusées en 2003 (Figure 14).

Au cours de l'année 2008, deux nouvelles galeries ont été creusées perpendiculairement à la galerie Ouest : les galeries Nord et Sud (Figure 14).

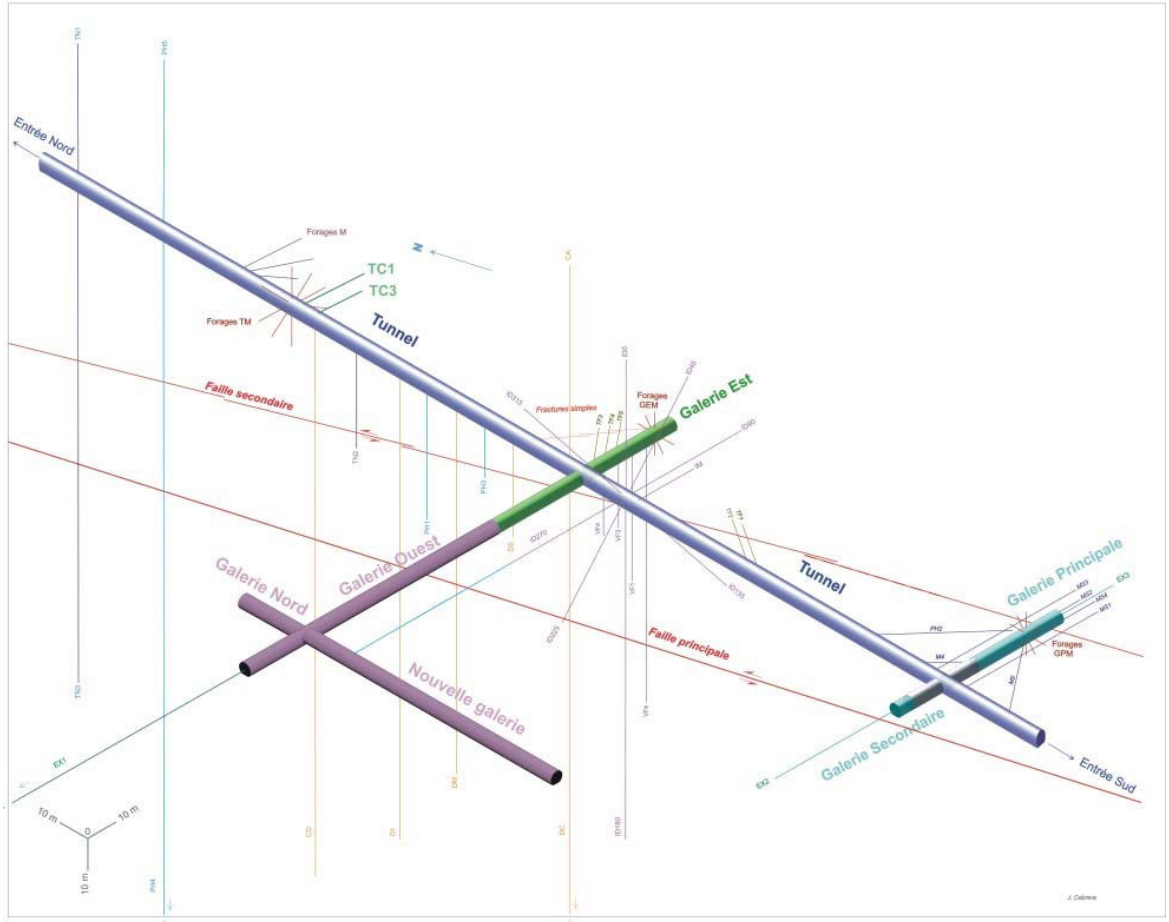


Figure 14 : Représentation 3D de la station expérimentale de Tournemire et des principaux forages associés.

3.1.2 CARACTERISATION EN LABORATOIRE DE L'ARGILITE DE TOURNEMIRE

Nous présentons ci-après les divers travaux de caractérisation mécanique en laboratoire de l'argilite de Tournemire par Cuxac [1991], Niandou [1994], Cazacu [1995], Barbreau & Boisson [1993] et Rejeb *et al.* [1999]. Ces travaux ont fait l'objet d'une synthèse [Cabrera *et al.*, 2001].

3.1.2.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

La caractérisation physique menée par Rejeb *et al.* [1999] a permis de déterminer une masse volumique dans l'état d'humidité naturelle (γ_h), la teneur en eau (w) et la vitesse du son. Les résultats de ces mesures moyennés sur tous les échantillons pratiquement saturés sont les suivants : σ_h = 2560 kg/m3 et w = 3,3 %. La vitesse du son varie d'une direction à une autre par rapport au plan de stratification. Selon Rejeb *et al.* [1999], la vitesse du son varie de 2425 à 3965 m/s perpendiculairement au plan de stratification (valeur moyenne : 3071 m/s) et de 4070 à 4355 m/s parallèlement au plan de stratification (valeur moyenne : 4263 m/s), ce qui donne un rapport d'anisotropie de vitesses de A = 1,4.

3.1.2.2 COMPORTEMENT ELASTOPLASTIQUE ET VISQUEUX

Nous présentons ici les principaux résultats de la campagne de mesure Rejeb *et al.* [1999]. Celle-ci avait pour objectif la caractérisation du comportement mécanique de l'argilite de Tournemire au laboratoire. Elle vient compléter et justifier les résultats des campagnes précédentes [Cuxac, 1991 ; et Niandou, 1994]. Les résultats de cette campagne sont les plus utilisés dans les documents scientifiques.

Des essais de compression simple, de compression triaxiale, de fluage triaxial et de compression diamétrale (essai brésilien) ont été réalisés sur des échantillons cylindriques de 65 mm de diamètre et de 130 mm de hauteur. Ces carottes ont été prélevées suivant différentes orientations par rapport à la stratification de la roche à partir de forages horizontaux, verticaux et inclinés dans le tunnel ainsi que dans la galerie EST. L'axe de chaque éprouvette testée était parallèle, perpendiculaire ou incliné de 30° ou 45° par rapport au plan de stratification. Cinq pressions de confinement (1, 2, 5, 8, 10 MPa) ont été considérées lors des essais triaxiaux avec plusieurs cycles charge/décharge [Rejeb *et al.*, 1999].

On peut rendre compte du comportement mécanique de l'argilite de Tournemire par une loi rhéologique élastoplastique avec écrouissage radoucissant (Figure 15) pour laquelle le critère de rupture est un critère de Mohr-Coulomb caractérisé par un angle de frottement interne de 20° et une cohésion qui varie de 6,7 à 10,8 MPa selon l'orientation par rapport au plan de stratification.

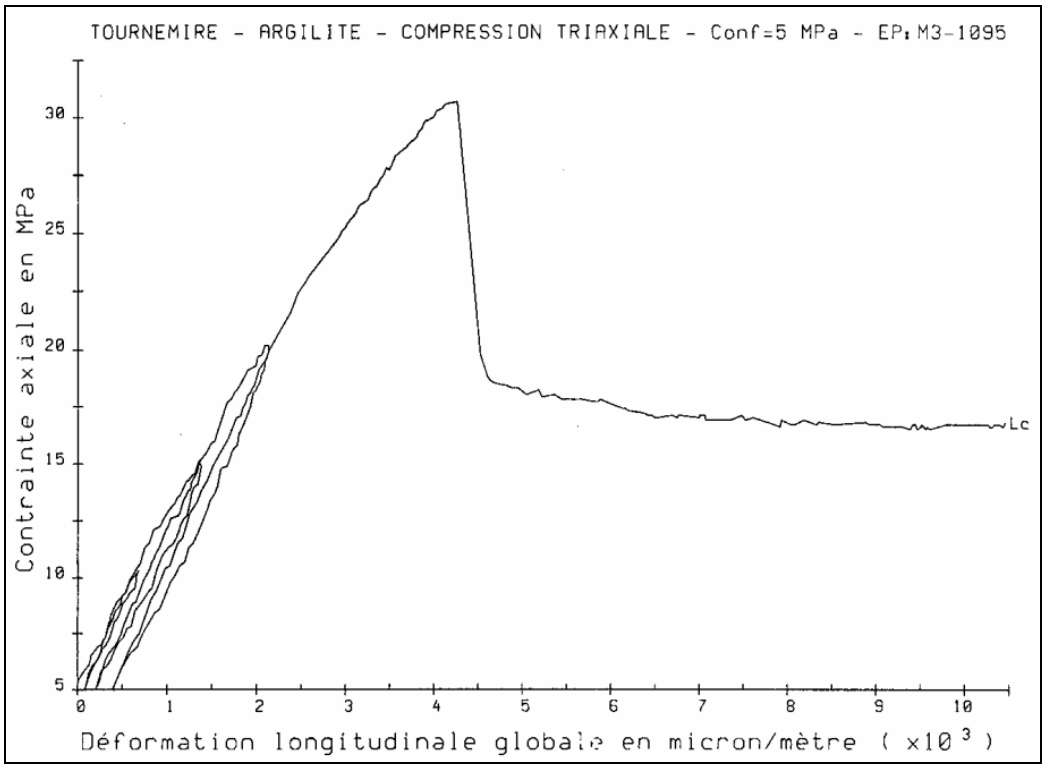


Figure 15 : Essai triaxial avec un confinement de 5 MPa [Rejeb et al., 1999].

Des essais de fluage ont été réalisés dans le but de mettre en évidence une éventuelle viscosité de l'argilite de Tournemire. Ces essais ont consisté à maintenir

pendant trois mois une éprouvette sous confinement de 5 MPa avec une charge axiale de 25 MPa pour les orientations perpendiculaire et parallèle au plan de stratification. La même procédure a été prévue pour les éprouvettes dont les axes longitudinaux sont inclinés de 30° ou 45° par rapport au plan de stratification mais ces dernières se sont rompues au bout de quelques heures sous l'effet du chargement. Le principal résultat de ces essais est que pour les sollicitations testées, on n'observe qu'un fluage primaire (Figure 16) d'amplitude extrêmement limitée en 90 jours d'essais.

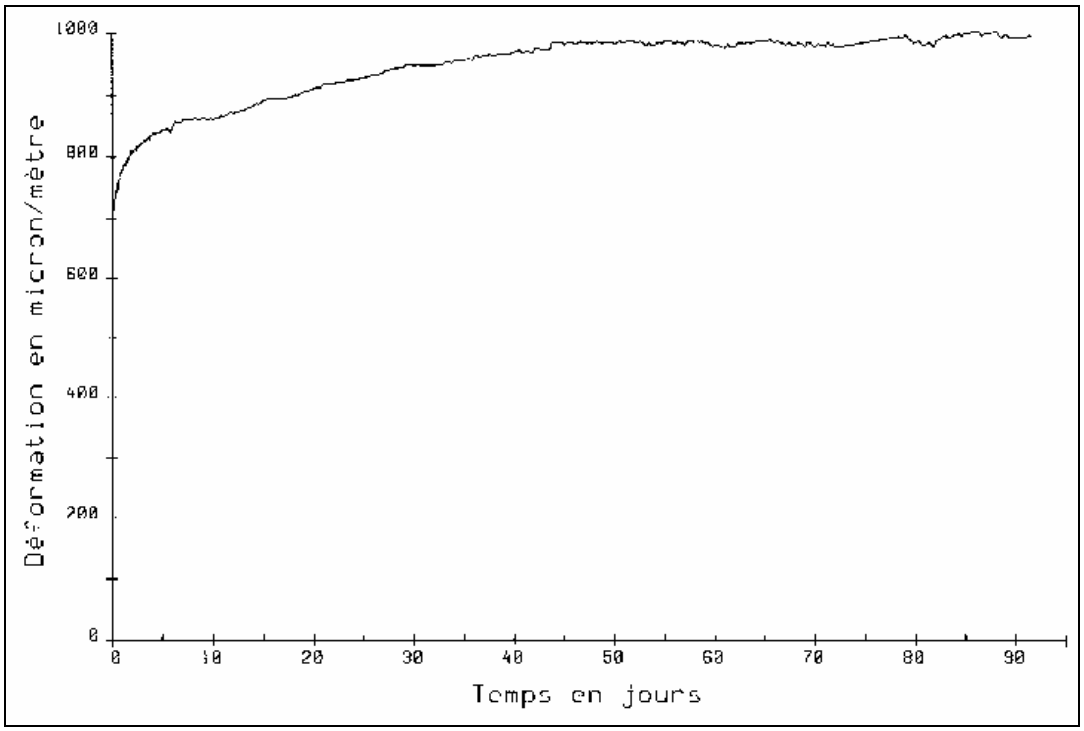


Figure 16 : Essai de fluage avec un déviateur de 20 MPa [Rejeb et al., 1999].

3.1.2.3 ANISOTROPIE DU COMPORTEMENT

Des essais mécaniques et des mesures de vitesse en laboratoire et *in situ* ont été réalisés par différents auteurs [Cuxac, 1991 ; Niandou, 1994 ; Rejeb *et al.*, 1999 et Contrucci, 2006]. Ces essais ont pour objectif de mettre en évidence l'anisotropie de l'argilite de Tournemire, de déterminer les caractéristiques élastiques isotropes transverses de ce matériau et de caractériser sa résistance à la compression simple.

En effet les essais de compression simples en laboratoire ont montré que la résistance à la compression simple varie d'une direction à une autre de 13 à 32 MPa, de même que la résistance maximale avant la rupture de 20 à 57 MPa [Rejeb *et al.*, 1999].

Les essais triaxiaux réalisés par différents laboratoires, ont montré que la déformabilité de l'argilite de Tournemire perpendiculairement au plan de stratification est plus importante que celle dans le plan. Ce résultat met en évidence une forte anisotropie du comportement de l'argilite de Tournemire.

Le chapitre 5 présente de manière détaillée ces différents essais et constitue un récapitulatif des caractéristiques élastiques fournies par chaque auteur. Néanmoins, nous présentons dans le Tableau 2 et à titre indicatif, les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire les plus couramment utilisées dans la littérature.

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
Rejeb *et al.*, [1999]	9270	24190	0,2	0,15	3940	2,61

Tableau 2 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire selon Rejeb et al. [1999]

3.1.3 ETAT DES CONTRAINTES NATURELLES DANS LE SITE DE TOURNEMIRE

Nous présentons ci-dessous les résultats des campagnes de mesure des contraintes naturelles sur le site de Tournemire, non pas dans l'objectif de les détailler mais afin de rappeler, d'une part, la difficulté à les mesurer et, d'autre part, les valeurs du tenseur de contraintes les plus communément admises dans la plupart des modèles numériques.

Deux campagnes de mesures ont été réalisées dans le but de déterminer le tenseur des contraintes sur le site de Tournemire. Durant les deux campagnes, les méthodes de fracturation hydraulique (campagne d'ANTEA) et de stimulation hydraulique (campagne de GEOSTRESS) en forage (HTPF : Hydraulic Tests on Preexisting Fractures) ont été mises en œuvre.

3.1.3.1 CAMPAGNE D'ESSAIS D'ANTEA

ANTEA a effectué en 1995 une campagne de 11 essais dans le forage vertical ID 180 (Figure 17) à des profondeurs de 41 m et 143 m sous le radier du tunnel [Rejeb et Tijani, 2003]. Le champ de contrainte déterminé dans l'intervalle de profondeur testé, montre que tenseur des contraintes obtenu est quasi-isotrope : $\sigma_V = \sigma_H = \sigma_h = 4{,}32 \pm 1{,}13$ MPa. Cependant la valeur de la contrainte verticale est inférieure au poids des terres, estimé à 6 MPa environ.

3.1.3.2 CAMPAGNE D'ESSAIS DE GEOSTRESS

L'Institut Physique du Globe de Paris (IPGP), en association avec la société GEOSTRESS, a réalisé une deuxième campagne d'essais en 1999. Huit essais ont été réalisés dans le forage ID 180 entre les profondeurs 24 m et 135 m et quatre essais dans le forage ID 225 (Figure 17) entre les profondeurs 25 m et 34 m (sous le radier du tunnel).

Le champ de contrainte a été déterminé en combinant les méthodes de fracturation hydraulique classique et la méthode HTPF. L'amplitude et l'orientation de chacune des trois composantes sont récapitulées dans la Figure 18.

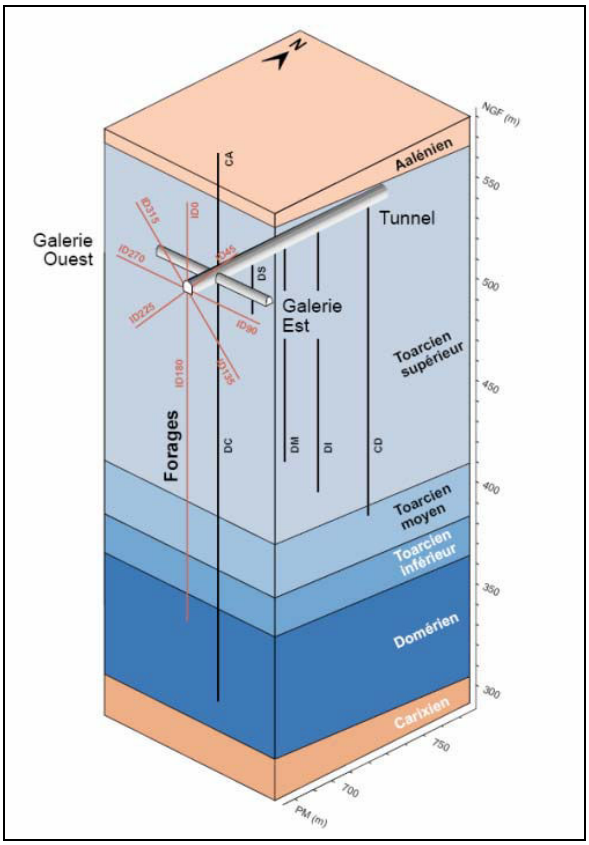


Figure 17 : Localisation des forages ID180 et ID225

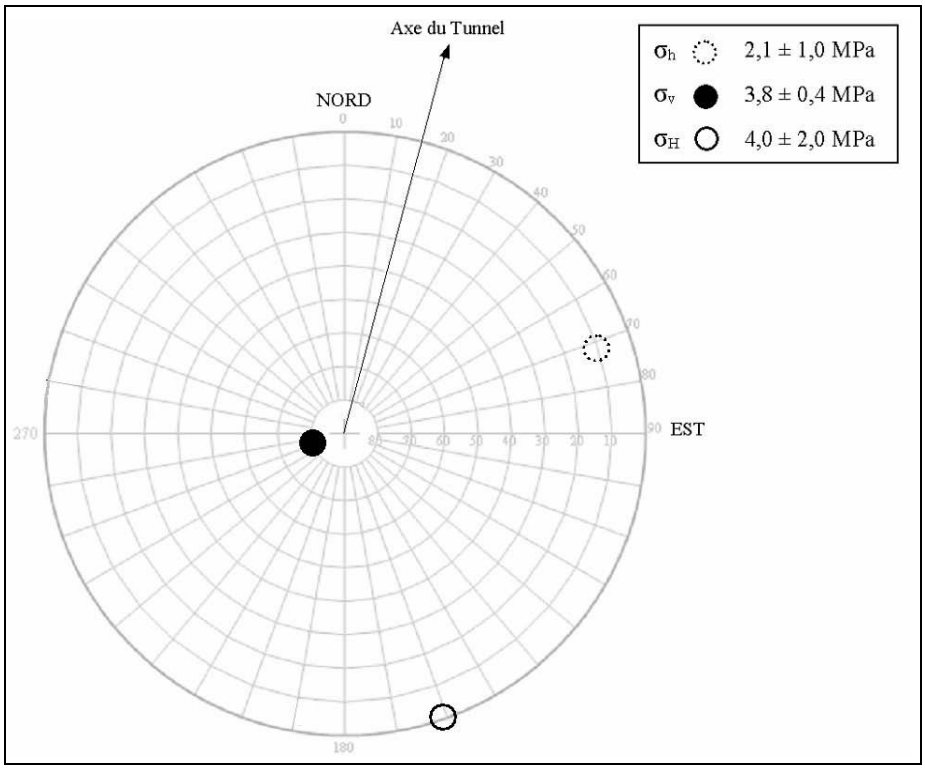


Figure 18 : Contraintes principales dans le site de Tournemire déterminées par GEOSTRESS [Rejeb & Tijani, 2003].

3.1.3.3 INTERPRETATION

Les deux campagnes d'essais diffèrent surtout par leur méthode d'interprétation des résultats : ANTEA suppose que les contraintes varient linéairement avec la profondeur testée alors que GEOSTRESS s'affranchit de cette hypothèse.

L'orientation de la contrainte horizontale majeure déterminée par la campagne de GEOSTRESS, est en accord avec l'état des connaissances concernant les contraintes tectoniques régionales. Les valeurs du tenseur de contraintes les plus communément admises, pour les études de modélisation, sont celles fournies par la 2ème campagne de mesures. La composante verticale est inférieure au poids des terres et présente une inclinaison de 10° avec la verticale. Cette observation pourrait s'expliquer par la topographie du site.

Cet aspect topographique a été mis en évidence dans un travail de modélisation 2D par élément finis [Rejeb & Tijani, 2003]. L'ensemble du massif a été modélisé en considérant les différentes unités lithologiques et la topographie (Figure 19). Rejeb & Tijani [2003] précisent dans leur article le module de Young du calcaire (Bajocien et Bathonien), les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire (Toarcien) ainsi que les masses volumiques correspondantes. Toutefois, ils ne donnent aucune information sur les autres unités lithologiques modélisées. Dans le Tableau 3 nous présentons les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire utilisées lors de ce travail de modélisation. Ces caractéristiques sont fournies par Rejeb & Tijani [2003] et sont étonnamment différentes de celles fournies par Rejeb *et al.* [1999] (Tableau 2).

Afin de retrouver le profil de contraintes obtenu par les deux campagnes de 1995 et 1999, les modélisateurs ont dû modifier significativement les densités des roches déterminées en laboratoire ainsi que les contraintes initiales en gardant invariantes les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire. Ce travail de modélisation met en exergue, d'une part, la difficulté à mesurer d'une manière fiable l'état des contraintes naturelles et, d'autre part, l'incertitude qui entoure la caractérisation des propriétés mécaniques des roches, notamment lorsque celles-ci sont appréhendées à des échelles très différentes.

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
Rejeb *et al.*, [1999]	9270 ± 490	27680 ± 4040	0,2 ± 0,03	0,17 ± 0,03	3940 ± 480	2,61

Tableau 3 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire selon Rejeb & Tijani [2003]

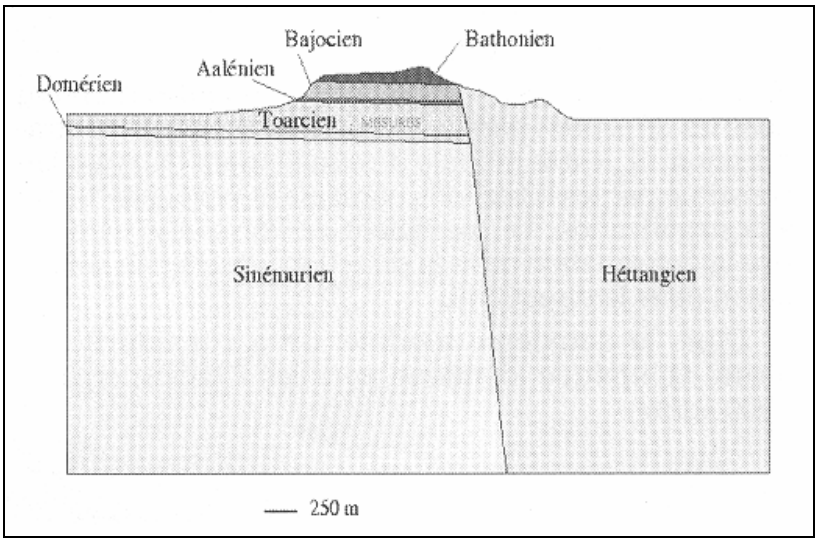


Figure 19 : Géométrie du modèle utilisé pour la modélisation numérique [Rejeb et Tijani, 2003].

3.1.4 ENDOMMAGEMENT AUTOUR DES OUVRAGES

Afin de faire évoluer la connaissance sur les mécanismes à l'origine de l'EDZ (Excavation Damaged Zone), sur l'aptitude des modèles à prédire l'extension de l'EDZ ainsi que son évolution dans le temps, et sur la validité des méthodes de caractérisation de l'EDZ, l'IRSN en association avec l'INERIS a mis en œuvre un programme de recherche sur l'endommagement.

La première étape de ce programme a consisté à décrire par l'observation et des investigations expérimentales la répartition de la zone endommagée autour des ouvrages de la station expérimentale de Tournemire. La seconde étape visait à reproduire par la modélisation, en intégrant des modèles rhéologiques de plus en plus sophistiqués, l'extension et l'intensité de l'EDZ mesurée et observée.

3.1.4.1 RESULTATS D'OBSERVATIONS ET D'INVESTIGATIONS EXPERIMENTALES DE L'EDZ

Différents types de fracturation ont été observés autour des ouvrages de Tournemire. Un premier type concerne l'EDZ autour du tunnel centenaire (fin de l'excavation en 1887). Pour celui-ci la fracturation se présente sous la forme de « pelures d'oignon » dont les épaisseurs sont comprises entre 0,7 m et 1 m et parallèles aux parois du tunnel (Figure 20). Cette extension est corroborée par les mesures de l'étendue de la zone désaturée du massif et a été également mise en évidence par les investigations géophysiques.

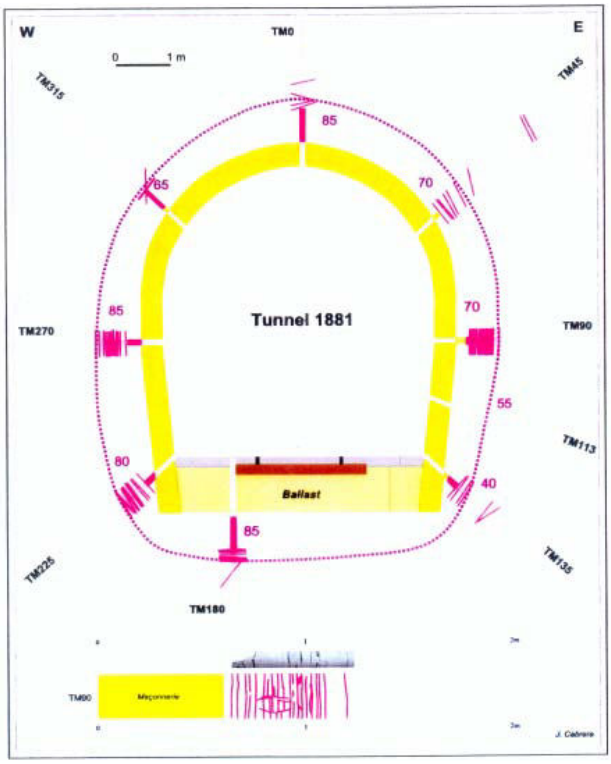


Figure 20 : Cartographie de la fracturation autour du tunnel – Relevé de mai 2005 [Rejeb, 2006]

En ce qui concerne les galeries excavées en 1996 et 2003, pratiquement aucune rupture n'a été observée pendant le creusement, ni durant les jours et les semaines suivants la fin des chantiers d'excavation. Cependant, des fissures sub-horizontales (Figure 21) ont été observées quelques semaines à quelques mois après le creusement autour des parois des galeries. Ces fractures sont associées au processus de désaturation du massif. Leur ouverture et fermeture sont en effet corrélées à l'évolution de l'humidité relative dans l'air ambiant des galeries (Figure 22).

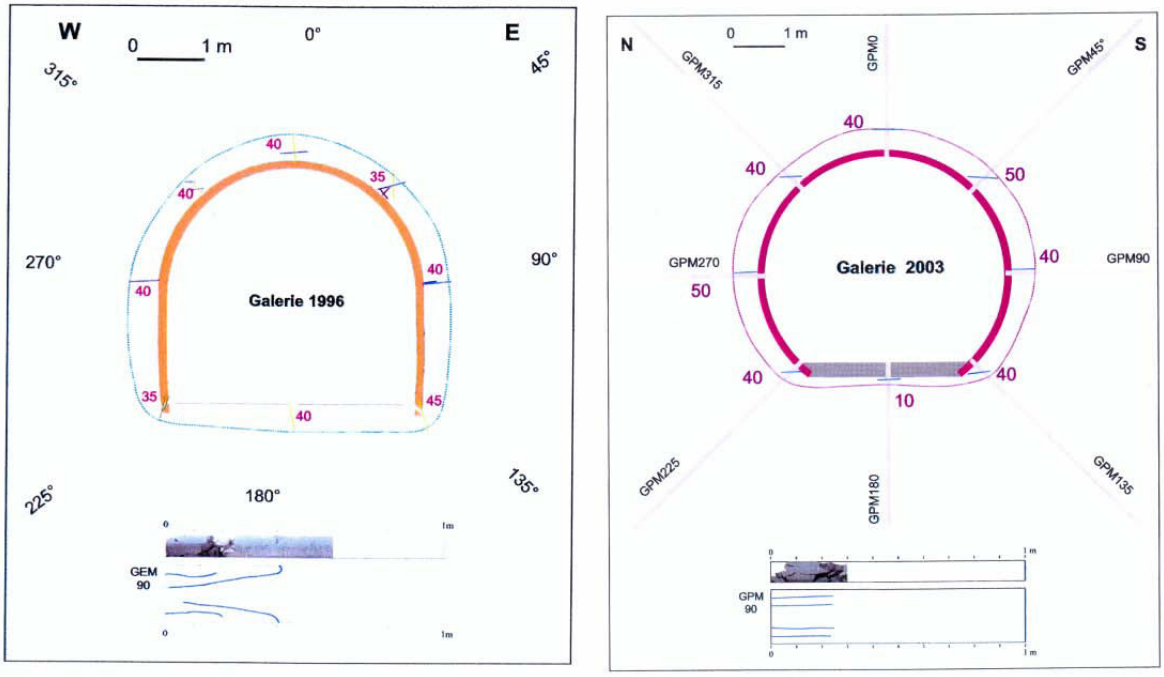


Figure 21 : Cartographie de la fracturation autour de la galerie Est 1996 et de la galerie principale de 2003 – Relevé de mai 2005 [Rejeb, 2006]

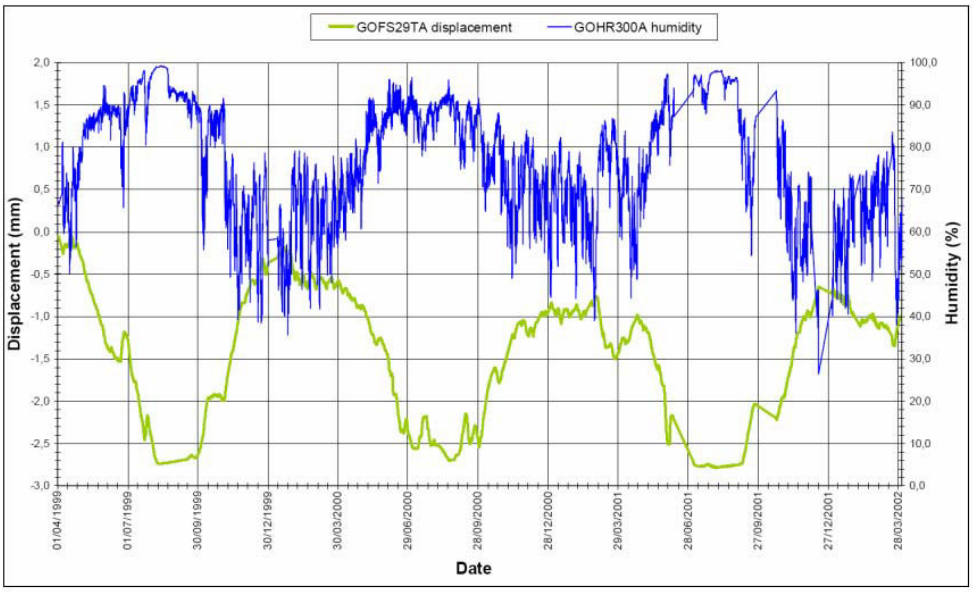


Figure 22 : Corrélation entre l'ouverture des fractures et le teaux d'humidité relative [Rejeb et Cabrera, 2006]

D'une manière générale, l'étendue de l'EDZ et de zones en rupture dépend de la méthode d'excavation, de la géométrie de l'ouvrage, des caractéristiques mécaniques de la roche, des contraintes initiales et des sollicitations mécaniques ou hydro-mécaniques. Dans le cas de Tournemire, les différentes mesures et

observations peuvent laisser supposer que les zones en rupture évoluent avec le temps.

En se basant sur les observations autour des galeries et du tunnel, le développement de l'EDZ autour du tunnel de Tournemire peut être attribué au phénomène de fissuration différée. Ce phénomène peut apparaître lors de la dissipation de la pression interstitielle (couplage hydro-mécanique), du fluage et de la relaxation du matériau. Il peut également être engendré par l'existence de cycles de désaturation et resaturation liés à la porosité de la roche sous l'effet de l'évolution de la température et de l'humidité relative. De plus, ces mécanismes (couplage hydo-mécanique, fluage et relaxation du matériau et désaturation et resaturation de la roche) sont le plus souvent couplés.

3.1.4.2 RESULTATS DE MODELISATION DE L'EDZ

Plusieurs approches de modélisation ont été mises en œuvre : modèle élasto-plastique, modèle de Lemaître (viscoplastique avec et sans endommagement), modèle poro-élastique (prise en compte du couplage hydromécanique). Les résultats ont souligné la difficulté à reproduire, à partir des lois de comportement et des paramètres associés, notamment pour le tunnel, la distribution de l'EDZ observée. Certains modèles ne prévoient pas l'apparition de l'EDZ, d'autres ne reproduisent pas exactement l'EDZ observé, quelques-uns prédisent une extension de l'EDZ à l'infini dans le temps, ce qui n'est pas le cas en réalité (Figure 23).

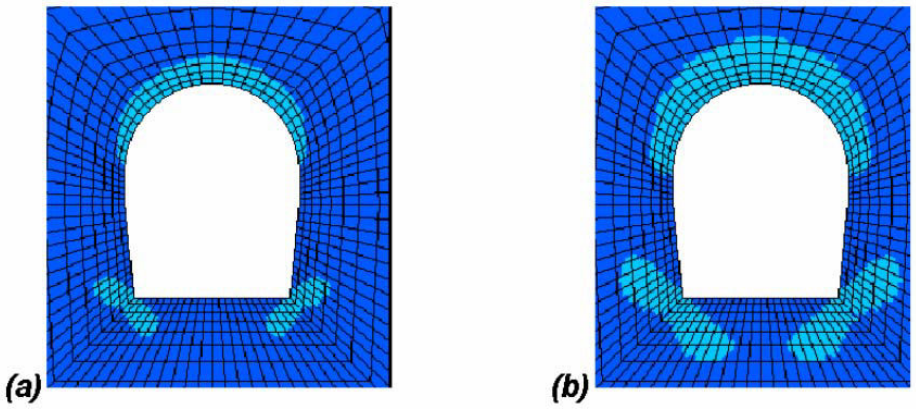


Figure 23 : Calcul d'endommagement par un modèle viscoplastique, étalement de l'EDZ : (a) après 10 années (b) après 100 ans [Rejeb et al., 2006]

Ces études ont permis d'identifier un certain nombre de pistes d'amélioration : la prise en compte de la désaturation par l'application d'une condition aux limites climatique en paroi des excavations, une meilleure connaissance de l'état de contrainte initial et de la pression de pore dans l'environnement des ouvrages, une meilleure appréhension de l'influence de l'effet d'échelle et des conditions d'échantillonnage dans la mesure des propriétés mécaniques. En effet l'incapacité à prédire par la modélisation numérique l'intensité et l'extension de l'EDZ, nécessite d'approfondir la connaissance de la rhéologie de la roche, des mécanismes en présence, ainsi que des conditions aux limites et des

chargements. L'IRSN a donc jugé nécessaire de lancer une nouvelle campagne d'essais géomécaniques (mesure de contraintes *in situ* et détermination des caractéristiques élastiques) dans le cadre d'un accord de collaboration avec l'INERIS. 19 essais de surcarottage et 13 essais biaxiaux ont ainsi été réalisés en utilisant la cellule CSIRO (colle 10-18°C) dans le tunnel, la galerie principale et la galerie Est (voir Figure 14, et pour l'orientation des forages voir ANNEXE D). La campagne de mesures s'est déroulée sur deux périodes, la première du 29/11/2005 au 16/12/2005 et la deuxième du 23/01/2006 au 17/02/2006.

On trouvera tous les détails et les mesures obtenues lors de cette campagne dans le rapport INERIS-DRS-06-71871/RN01 [Lahaie, 2006]. Le présent chapitre n'a pour but que de rappeler les résultats essentiels à la compréhension de la suite de la thèse (phénomènes atypiques observés notamment).

3.2 PRESENTATION DES PHENOMENES OBSERVES

Il est tout d'abord important de rappeler que la mesure des contraintes *in situ* dans les milieux argileux est réputée extrêmement délicate. La technique de surcarottage, en particulier, est généralement difficile à mettre en œuvre dans ce type de milieu du fait de la propension naturelle de l'argilite à fluer ou bien à se fissurer sous l'effet de la désaturation ou des contraintes mécaniques liées aux opérations de foration (discage). Aussi, un objectif de cette campagne à part entière consistait à évaluer la faisabilité de la technique de surcarottage dans le contexte des argilites de Tournemire. En ANNEXE D est présenté un récapitulatif du repérage des essais de surcarottage de la campagne 2005-2006 ainsi qu'en ANNEXE E les paramètres méthodologiques adoptés au cours de ces essais (temps de séchage de la colle, vitesse d'avancement du carottier, vitesse de rotation du carottier, température de l'air injecté …).

La campagne de 2005-2006 a clairement démontré la possibilité de réaliser des mesures de contrainte par surcarottage dans l'argilite de Tournemire. En effet, sur les 19 essais réalisés, 16 ont permis d'obtenir des mesures de qualité suffisante pour pouvoir être interprétés. Par ailleurs, la tenue générale des carottes surforées s'est révélée excellente (voir Figure 24).

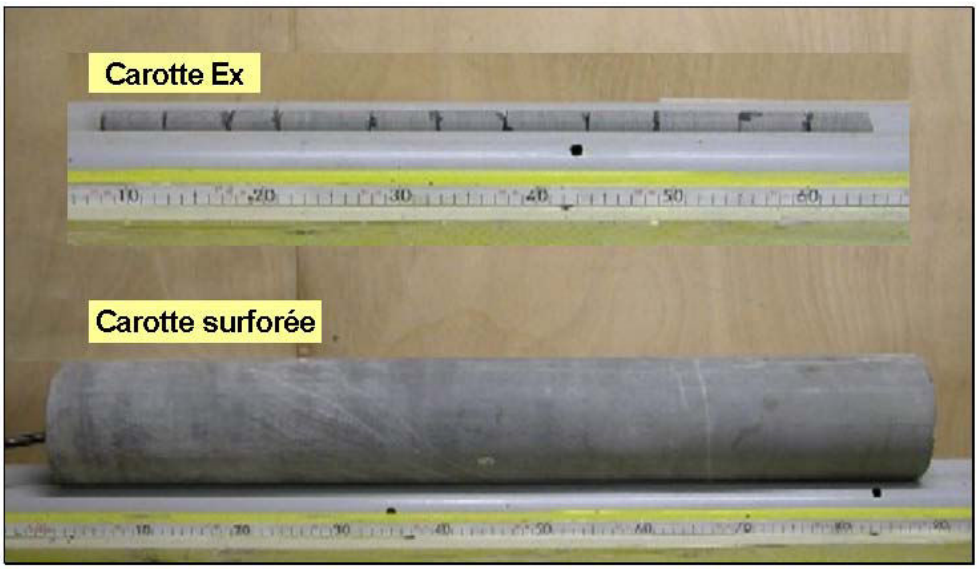


Figure 24 : Illustration de la qualité des carottes obtenues (essai GEC-13)

Toutefois, malgré le succès apparent des essais et l'excellente tenue mécanique des carottes récupérées, les mesures de déformation enregistrées au cours de ces essais ont révélé certains phénomènes inhabituels (Figure 25 et Figure 26) qui ont rendu impossible, en pratique, la détermination des contraintes *in situ*.

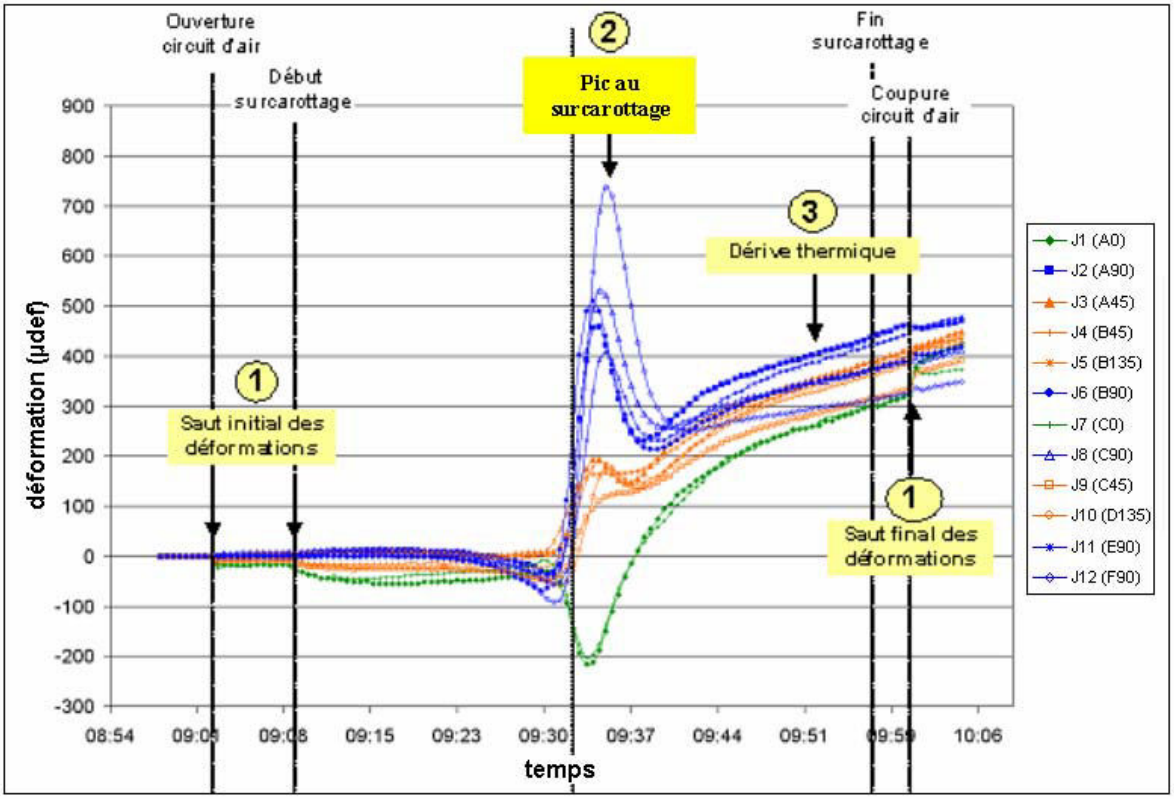


Figure 25 : Illustration des phénomènes inhabituels observés lors de la campagne de 2005-2006 : Courbes types de surcarottage (essai TC12) [Lahaie, 2006]

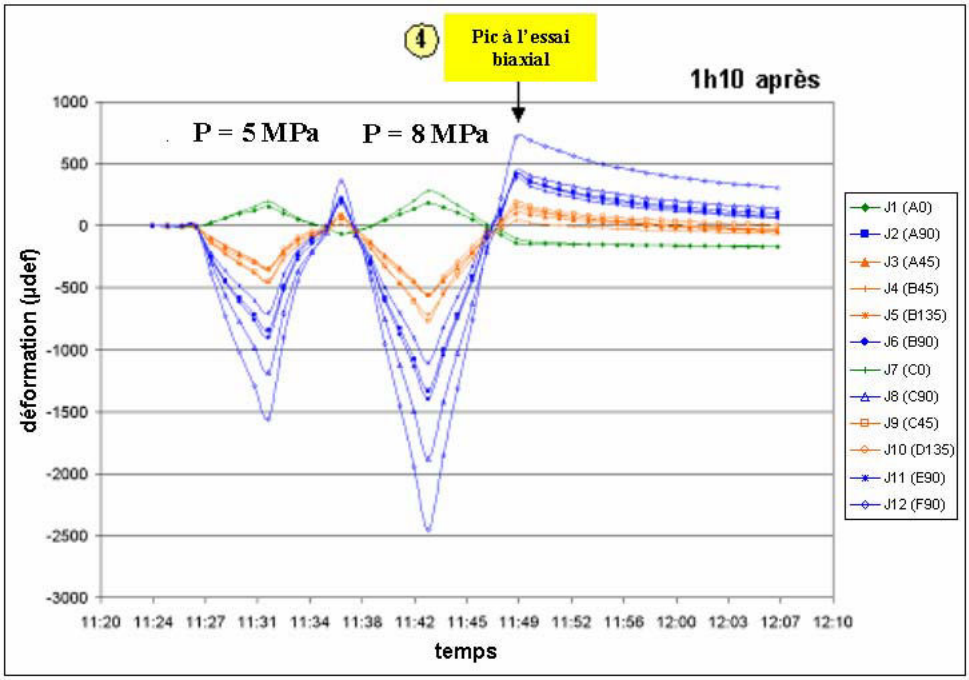


Figure 26 : Illustration des phénomènes inhabituels observés lors de la campagne de 2005-2006 : Courbes types d'essai biaxial (carotte TC11) [Lahaie, 2006]

Au total, cinq phénomènes inhabituels ont été observés lors de la campagne de 2005-2006. Quatre sont identifiés directement sur les courbes de surcarottage (Figure 25) et les courbes biaxiales (Figure 26) en comparaison avec les courbes typiques (respectivement la Figure 7 et la Figure 11) :

1. Saut initial des déformations ;
2. Pic des déformations au surcarottage ;
3. Dérive « thermique » des mesures après le passage du carottier : du fait de l'effet de l'élévation de la température due à l'abrasion lors du surcarottage, les déformations n'atteignent que très lentement leur valeur plateau. En effet cela ne peut pas provenir d'une dérive des capteurs de déformation puisque ces derniers fonctionnent convenablement à une température de 21°C (température maximale atteinte lors des essais de surcarottage) ;
4. Pic des déformations lors de l'essai biaxial.

Le cinquième phénomène découle de l'interprétation des résultats des essais biaxiaux. En effet, les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire, déterminées à partir de l'interprétation des courbes biaxiales, montrent un rapport d'anisotropie des modules d'élasticité faible par rapport à celui déterminé par les essais en laboratoire [Rejeb *et al.*, 1999] sur la base desquels cette roche est connue comme étant fortement anisotrope.

Ces phénomènes (principalement la dérive thermique) ainsi que l'ambiguïté qui pèse sur la détermination des caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire, rendent le processus d'inversion qui permet de remonter aux contraintes du site impossible en pratique.

3.2.1 « SAUT INITIAL DES MESURES »

Au début de l'essai de surcarottage, un saut des mesures (Figure 25) plus ou moins brutal (instantané ou s'étendant sur quelques minutes) et d'amplitude plus ou moins forte (allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de micro-déformations) est observé.

Les déformations observées au cours de ce saut ont un caractère systématique : elles traduisent une contraction axiale du trou EX (évolution négative des mesures des jauges axiales 1 et 7, en vert sur la Figure 25) et une dilatation radiale de celui-ci (évolution positive des jauges tangentielles 2, 6, 8, 11 et 12, en bleu sur la Figure 25). A la fin du surcarottage, un autre saut, généralement de même amplitude mais de signe opposé, est constaté (voir Figure 25). Dans ce cas, le trou EX s'allonge et se referme.

Des tests spécifiques (arrêts et redémarrage successifs de l'avancement du surcarottage, fermeture et réouverture du circuit d'air, voir la Figure 95 de l'ANNEXE B) ont permis de montrer que ces sauts étaient corrélés à l'ouverture/fermeture du circuit d'injection d'air [Lahaie, 2006].

L'explication que l'on peut donc avancer est que l'air appliqué sur la cellule CSIRO et sur les parois du trou Ex engendre une pression, qui tend à ouvrir et à raccourcir le trou Ex. A la fermeture du circuit d'air, le trou Ex subit des déformations inverses.

3.2.2 « PIC AU SURCAROTTAGE »

Sur la Figure 25 (en comparaison avec la Figure 7), on remarque la présence d'un pic des déformations tangentielles (courbes en bleu) faisant suite immédiatement à la phase de relâchement des contraintes (Phase 2, Figure 7) avant que celles-ci n'atteignent leur valeur plateau (Phase 3, Figure 7).

Ce phénomène sera appelé « pic au surcarottage » dans ce qui suit. Afin de mieux le caractériser, nous définissons l'indice d'Amplitude du Pic au Surcarottage (APS) par :

$$\boldsymbol{APS} = (\varepsilon_{\max}^{\boldsymbol{surc}} / \varepsilon_{\min}^{\boldsymbol{surc}}) - 1 \qquad (7)$$

Nous ne nous intéresserons dans cette étude qu'aux jauges orthoradiales où le pic est le plus visible et le plus prononcé.

$\varepsilon_{\max}^{\boldsymbol{surc}}$ est la valeur de la déformation orthoradiale maximale atteinte lors du pic au surcarottage et $\varepsilon_{\min}^{\boldsymbol{surc}}$ la valeur de la déformation orthoradiale minimale atteinte tout de suite après le pic (Figure 27).

L'intensité du pic est donc par définition supérieure ou égale à zéro. La valeur *APS = 0 %* indique l'absence de pic.

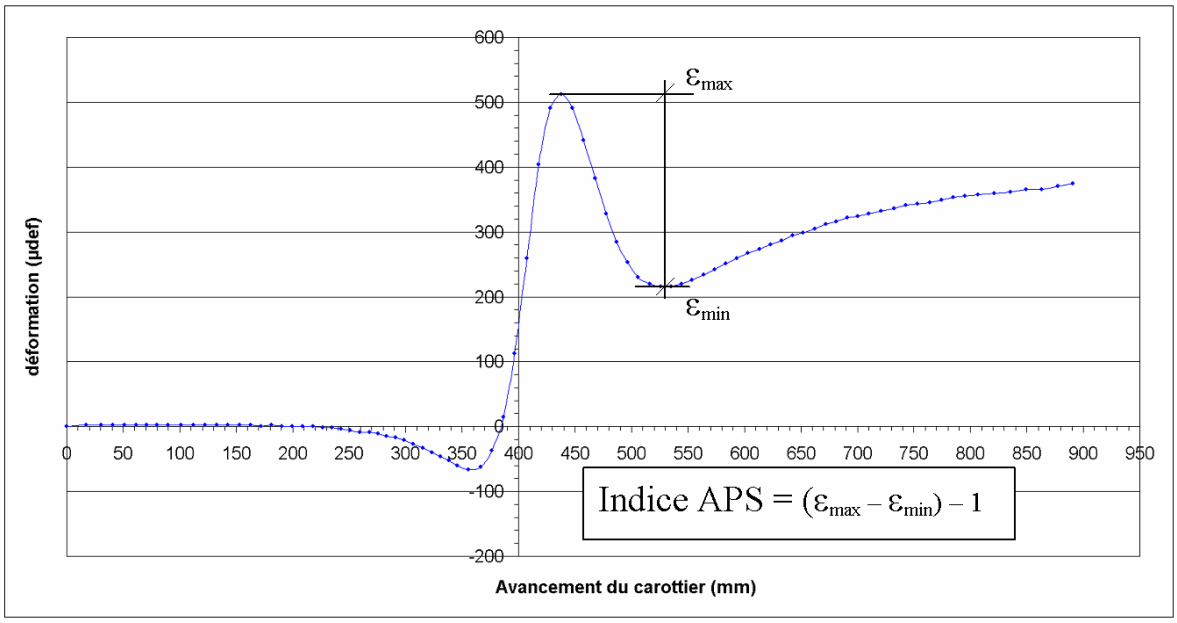


Figure 27 : Indice d'amplitude du pic au Surcarottage (APS)

Nous présentons dans l'ANNEXE F (Tableau 27) la valeur de l'indice d'APS calculée pour chaque essai de la campagne 2005-2006. Comme nous pouvons l'observer sur la Figure 25, le pic est fortement prononcé sur les jauges orthoradiales ; nous ne nous intéressons donc pour la quantification de l'intensité du pic qu'aux cinq jauges orthoradiales présentes sur la cellule CSIRO HI 12. Nous présentons aussi dans ce même tableau la valeur moyenne et la valeur maximale de l'APS pour chaque essai. Nous remarquons que les valeurs moyennes des APS dépassent 85 % dans un grand nombre d'essais et peuvent atteindre 187 %.

3.2.3 « DERIVE THERMIQUE DES MESURES »

Après le pic lors du passage du carottier au niveau du plan de mesure, on observe une dérive (Figure 25) corrélée avec la température, qui perturbe les déformations et empêche d'obtenir rapidement un plateau de déformation (Phase-3, Figure 7) utilisé pour l'étape d'inversion.

On remarque sur la Figure 28 que la température commence à augmenter au moment du passage de la couronne du carottier au niveau du capteur de température (celui-ci étant situé dans le corps de la cellule CSIRO), traduisant ainsi l'échauffement lié à l'abrasion du terrain. La température continue ensuite d'augmenter, d'abord rapidement puis de plus en plus lentement, pour atteindre une valeur pic située en moyenne à 6.5°C au-dessus de la température initiale [Lahaie, 2006] (Figure 28). Cette valeur pic est atteinte 1h environ après le passage de la couronne au droit du capteur.

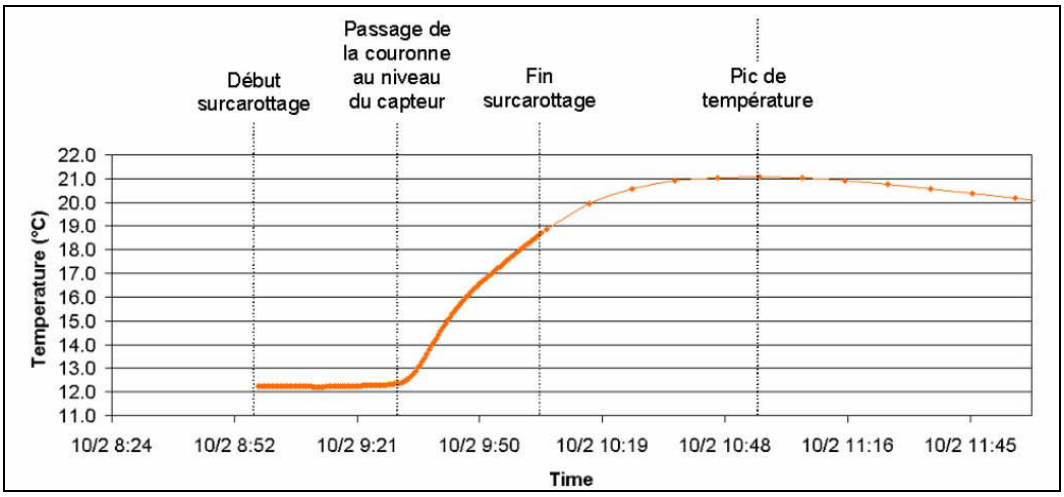


Figure 28 : Courbe type de température enregistrée (essai TC12) [Lahaie, 2006]

Pour mieux mettre en évidence la corrélation entre la dérive des déformations et la température, on a laissé (suite à l'essai de surcarottage) la carotte surforée en place pendant 3 jours au fond du forage dans le carottier [Lahaie, 2006]. On enregistre ainsi la relaxation thermique de la carotte en restant dans les conditions hygrométriques du forage (voir Figure 29). Nous remarquons que le pic de température (+9°C) est atteint environ 1h20 après le passage du carottier au niveau des jauges, ensuite la température redescend ensuite asymptotiquement vers la température initiale. La carotte met environ 1 jour à récupérer 95% de la différence de température au pic et environ 2 jours à retrouver sa température initiale.

Nous remarquons une corrélation claire entre les déformations et la température pendant la première journée. Ensuite les déformations continuent d'évoluer alors que la température se stabilise progressivement durant le deuxième jour. La stabilisation complète de la température durant la troisième journée permet la stabilisation de certaines jauges (jauges axiales en vert et jauges inclinées en orange, voir Figure 29) alors qu'il faut attendre la fin de la troisième journée pour voir la stabilisation des jauges orthoradiales (en bleu sur la Figure 29).

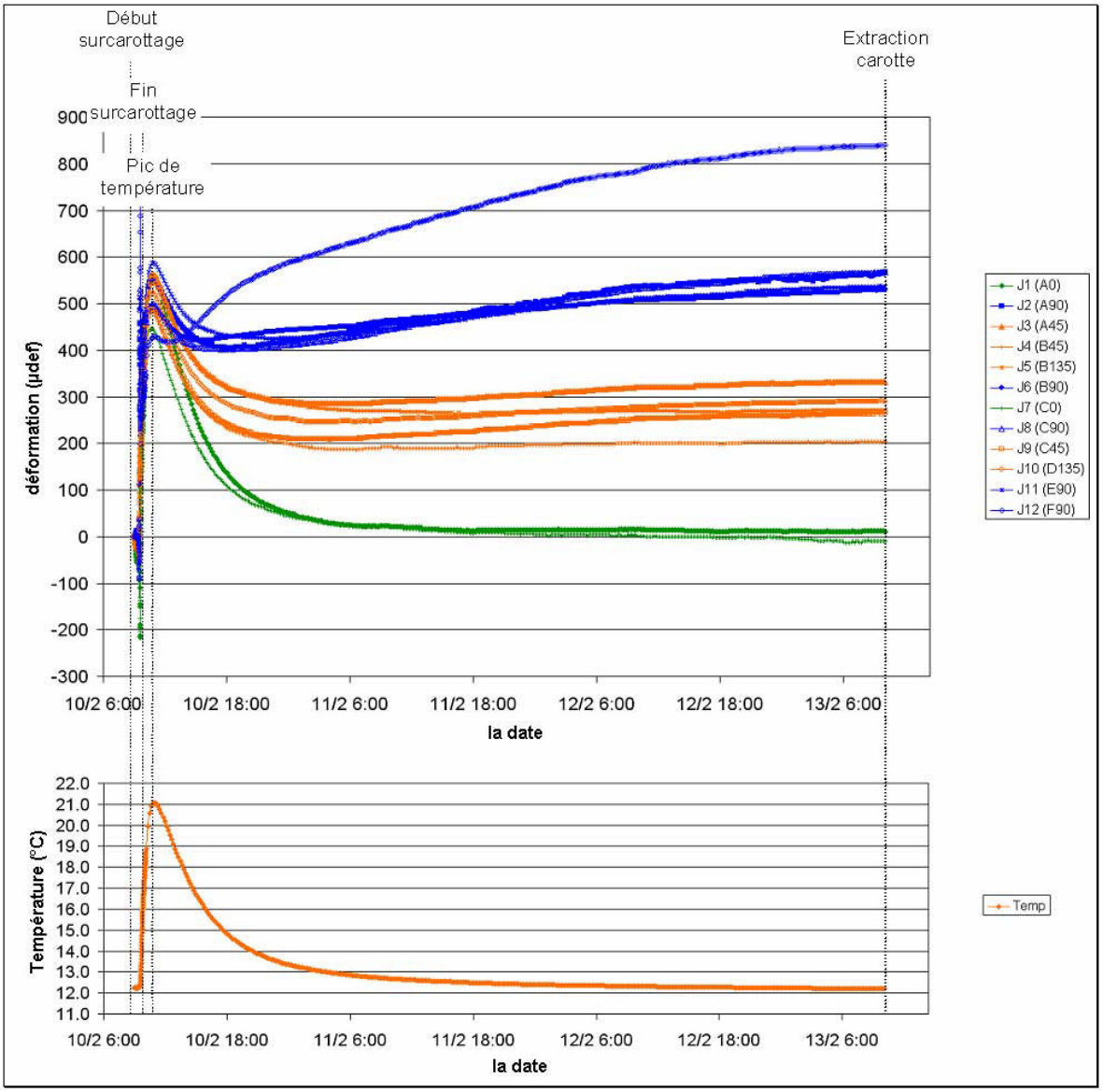


Figure 29 : Corrélation entre les déformations enregistrées après l'essai de surcarottage TC12 et la température, la carotte surforée est laissée en place pendant 3 jours au fond du forage dans le carottier. Stabilisation des déformations enregistrées sur certaines jauges et le commencement pour les autres sur un plateau suite à la stabilisation de la température.

Pour expliquer cet échauffement important observé au cours du surcarottage, on peut invoquer principalement deux facteurs :

- un fluide de foration (*i.e.* l'air), peu favorable à l'évacuation de la chaleur (l'eau n'a pas pu être utilisée du fait de l'interaction qu'elle aurait eut avec l'argilite) ;
- une forte teneur en silice de l'argilite de Tournemire (Tableau 1) qui peut favoriser l'élévation de la température due à l'abrasion lors du surcarottage.

3.2.4 « PIC A L'ESSAI BIAXIAL »

Un phénomène similaire au « pic au surcarottage » a été observé sur certaines courbes de déformation obtenues au cours de l'essai biaxial (Figure 26) en comparaison avec une courbe typique (Figure 11). En effet, tout comme le « pic au surcarottage », ce phénomène apparaît lors du relâchement de contrainte. Dans l'essai biaxial, le relâchement des contraintes s'accompagne d'une relaxation accentuée des déformations. Après l'application d'un cycle de charge-décharge, les déformations des jauges tangentielles, par exemple (courbes en bleu), atteignent une valeur supérieure à leur valeur d'origine (comme si la carotte restituait plus d'énergie lors de la phase de décharge qu'elle n'en avait emmagasiné lors de la phase de charge). Ensuite, les déformations s'inversent pour retrouver asymptotiquement leur valeur d'origine.

Ce phénomène, que l'on qualifiera de « pic à l'essai biaxial », ne se manifeste pas dans tous les essais biaxiaux, mais seulement pour ceux qui sont réalisés juste après la fin de l'opération de surcarottage (dans un délai d'une heure et demie à trois heures). Lors des essais réalisés quelques jours après le surcarottage, on n'a plus de trace de ce phénomène (Figure 30(a) et (b)).

Nous définissions l'indice d'Amplitude du Pic lors de l'essai Biaxial (APB) par :

$$\boldsymbol{APB} = -\varepsilon_{\max} / \varepsilon_{\min} \qquad (8)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}_{max}$ est la valeur de la déformation orthoradiale atteinte lors du pic à l'essai biaxial et $\boldsymbol{\varepsilon}_{min}$ la valeur de la déformation orthoradiale lors de l'application de la pression maximale à la fin du cycle de chargement (Figure 31).

L'intensité du pic est donc par définition supérieure ou égale à zéro. La valeur *APB = 0 %* indique l'absence de pic.

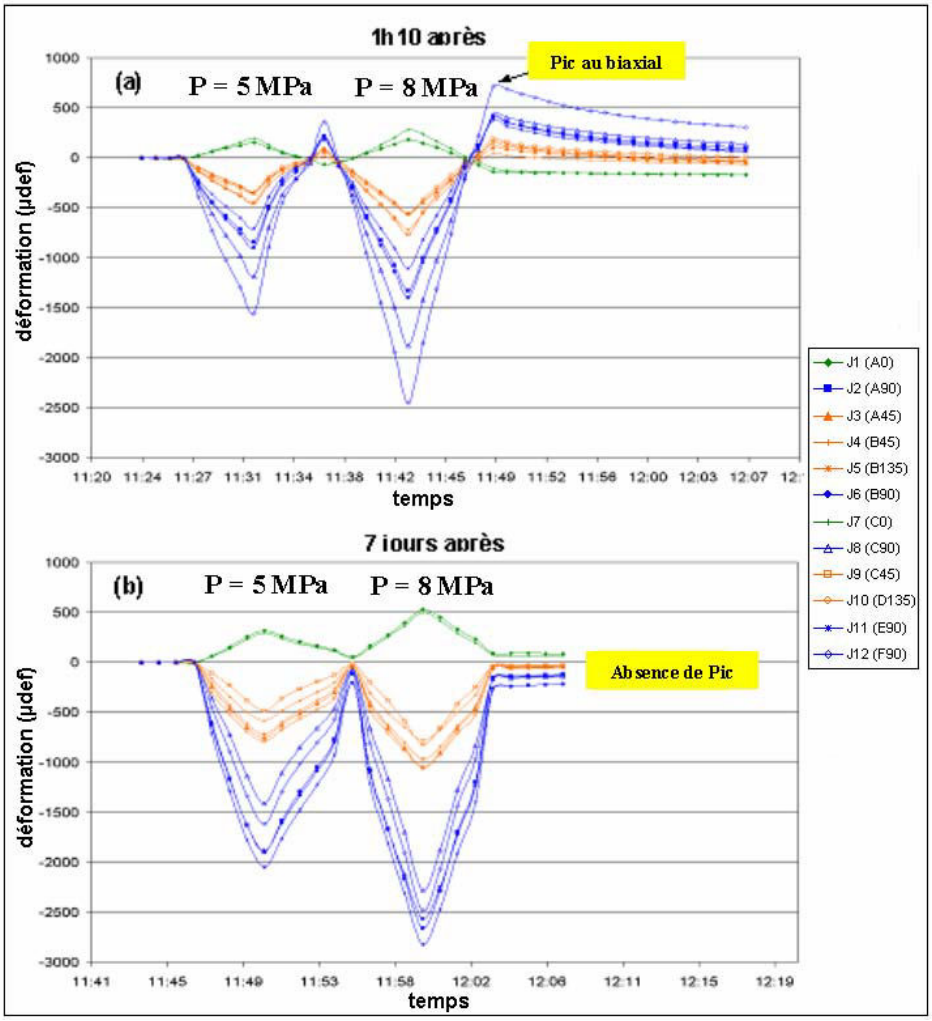


Figure 30 : courbes de déformation obtenues lors d'un essai biaxial réalisé (a) 1h10 et (b) 7 jours après le surcarottage correspondant (carotte TC11) [Lahaie, 2006].

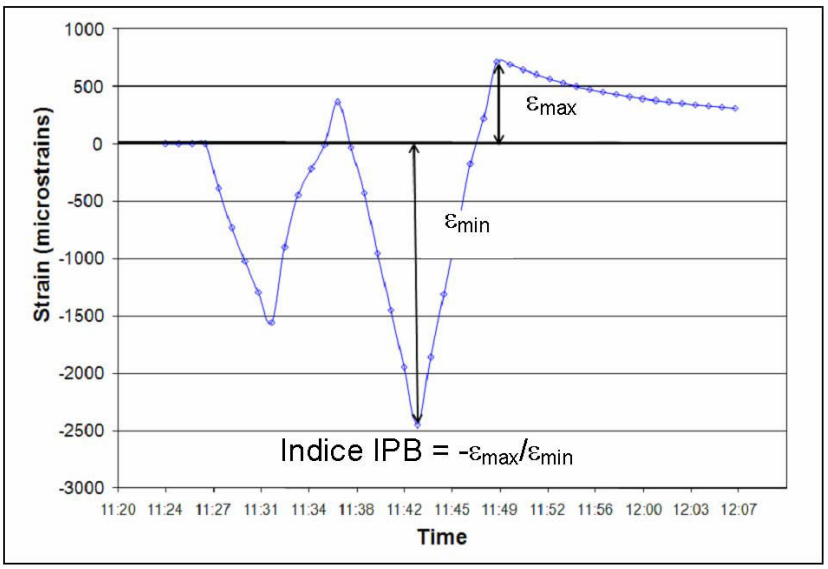


Figure 31 : indice d'amplitude du pic à l'essai biaxial (APB)

Nous présentons dans l'ANNEXE F (Tableau 28) l'intensité du pic à l'essai biaxial (APB) observée sur chaque essai lors de la campagne 2005-2006. Comme le montre la Figure 26 et comme cela avait déjà été noté pour le pic à l'essai de surcarottage, le pic à l'essai biaxial est fortement prononcé au niveau des jauges orthoradiales ; nous ne nous intéressons donc pour la quantification de l'intensité du pic qu'aux cinq jauges orthoradiales. Nous présentons aussi dans ce même tableau, la valeur moyenne et la valeur maximale de l'APB mesurée dans chaque essai.

3.3 RECHERCHE D'HYPOTHESES EXPLICATIVES A PRIORI POUR LE PHENOMENE DE PIC AU SURCAROTTAGE

Nous nous sommes concentrés en premier lieu, dans la recherche d'hypothèses explicatives à l'origine des phénomènes observés, sur l'étude du pic au surcarottage. En effet cette étude pouvait approfondir notre connaissance sur la rhéologie de cette argilite et apporter des informations utiles sur un éventuel couplage thermomécanique ou hydromécanique qui pourrait être à l'origine du phénomène.

Deux pistes ont été évoquées dans un premier temps :

1- Comportement poro-viscoélastique de la roche lié à une différence de cinétique entre la remise à l'équilibre (lente) des pressions interstitielles et la cinétique (rapide) du relâchement des contraintes au surcarottage. Ceci expliquerait la dépendance du phénomène à l'état de saturation de la carotte et la disparition du phénomène 3 jours après le surcarottage.

2- Effet de l'augmentation de température sur le comportement de la roche ou de la colle.

Une recherche bibliographique a été réalisée afin de voir si des phénomènes de pic de déformation tels que décrits dans le sous-chapitre 3.2.2 avaient déjà été observés. La revue principalement utilisée pour cette recherche bibliographique est l'International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, « Special Issue of the IJRMMS » de l'année 2003 intitulé « Rock Stress Estimation ISRM Suggested Methods and Associated Supporting Papers ».

Un tableau (ANNEXE G) synthétise les articles analysés et renseigne sur les caractéristiques suivantes :

- le type de cellule utilisé (CSIR, CSIRO, Bore Probe, CCBO, DDGS, USBM…) (pour les différents types de cellules voir ANNEXE A) ;
- la localisation géographique de l'essai ;
- la nature de la roche étudiée ;
- le fluide de foration utilisé ;
- le type de colle utilisé ;
- les phénomènes atypiques observés (saut de mesures initial et final, phénomène de pic, dérive…).
- les explications fournies par les auteurs (saut lors de l'injection du fluide, microfracturation, dérive thermique, gonflement/polymérisation de la résine…).

La recherche bibliographique synthétique et spécifique au sujet du « pic au surcarottage » montre qu'un tel phénomène (rarement aussi prononcé toutefois) a également pu être observé lors d'essais réalisés sur :

- des marnes [Bigarré & Camus, 1993],
- des granites [Sjöberg, 2004 ; Sjöberg & Klasson, 2003 ; Sjöberg & Perman, 2006 et Hakala, 2006],
- des échantillons en aluminium [Bertillson, 2007].

Pour autant, ce phénomène a été peu discuté dans la littérature et les interprétations fournies par les auteurs sont très diverses et peu argumentées (mauvais collage des jauges de déformation [Hakala, 2006], microfracturation de la carotte [Cai *et al.*, 1995], fluage de la colle [Irvin *et al.*, 1987], comportement plastique de la roche [Nechnech, 1998].

La recherche bibliographique sur les explications à l'origine du phénomène de pic au surcarottage mène donc à deux hypothèses explicatives. Ce phénomène peut être dû soit à un problème instrumental (séchage de la colle, fluide de foration, élévation de la température dans le massif pendant le carottage, vitesse d'avancement du carottier…), soit à un phénomène physique lié à la rhéologie de la roche et qui se développerait en réponse à une sollicitation mécanique exercée par l'opération de surcarottage.

3.4 MODELISATION NUMERIQUE DU « PIC AU SURCAROTTAGE » EN ELASTICITE LINEAIRE

3.4.1 INTRODUCTION

Des travaux de modélisation de l'essai de surcarottage ont été déjà réalisés à l'aide de différents codes de calcul. Certains ont mis en évidence le phénomène de pic. L'intensité du pic, dans les cas observés, restant tout de même peu intense, et les auteurs ne s'intéressant pas particulièrement à ce phénomène, ils n'ont pas proposé une explication détaillée sur son origine.

On note parmi ces chercheurs Worotnicki, [1993] qui a utilisé un code aux éléments finis (calcul élastique). On mentionne aussi les travaux de Fouial, [1997] (calcul élastique linéaire isotrope), Nechnech, [1998] (calcul élastoplastique) qui ont tous deux utilisé le code de calcul aux éléments finis CESAR-LCPC, et les travaux de Giot, [2004] (calcul élastique isotrope) en utilisant le code de calcul aux éléments finis CAST3M du CEA. Des travaux de modélisation dans ce domaine ont aussi été réalisés par Hakala, [2006] (calcul élastique linéaire) en utilisant le code de calcul aux différences finis FLAC d'Itasca Consulting Group.

3.4.2 OBJECTIF ET DEMARCHE

Pour analyser plus en détail le phénomène de pic au surcarottage dans le cas des argilites de Tournemire, nous nous sommes intéressés dans un premier temps à la rhéologie de la roche. Nous avons décidé d'aborder le problème par une approche directe, c'est-à-dire de procéder à une modélisation de l'essai de surcarottage (dans un premier temps). Nous avons voulu tester tout d'abord, par la simple hypothèse de l'élasticité linéaire, la possibilité de reproduire une forme similaire au pic des déformations lors de la modélisation de l'essai de surcarottage.

Pour ce travail de modélisation numérique, nous avons utilisé le code de calcul aux éléments finis CESAR_LCPC et son nouveau pré processeur CLEO. L'originalité de ce travail réside dans la recherche et le test des hypothèses pouvant expliquer l'origine du pic. On trouvera tous les détails de ce travail dans le rapport de l'IRSN DEI/SARG/2009-001 [Ben Ouanas, 2008]. Nous présentons dans ce chapitre (§ 3.4) les résultats essentiels obtenus à l'issue de ce travail de modélisation.

Notre démarche a consisté, dans un premier temps, à essayer de reproduire numériquement un rebond des déformations (voir Figure 32) lors du surcarottage avec des hypothèses simples, à savoir un comportement élastique linéaire isotrope de la roche et un état de contraintes initial isotrope, puis de « sophistiquer » le modèle en introduisant, par exemple, une anisotropie des caractéristiques élastiques du matériau puis une anisotropie des contraintes initiales. Nous reprenons plus en détail la signification et l'origine du rebond de déformations observé lors de la modélisation de l'essai de surcarottage dans le § 3.4.4.1.

En effet le rebond des déformations est similaire dans sa forme au pic de surcarottage. Pour éviter toute ambiguïté dans la comparaison entre l'amplitude du rebond et le pic au surcarottage, nous définissons un nouvel indice l'Amplitude du Rebond au Surcarottage (ARS) :

$$\boldsymbol{ARS} = (\varepsilon_{\max}^{\mathrm{mod}\,\boldsymbol{el}} / \varepsilon_{\boldsymbol{plateau}}^{\mathrm{mod}\,\boldsymbol{el}}) - 1 \qquad (9)$$

$\varepsilon_{\max}^{\mathrm{mod}\,\boldsymbol{el}}$ est la valeur maximale de la déformation orthoradiale atteinte par le rebond au cours de la modélisation du surcarottage et $\varepsilon_{\boldsymbol{plateau}}^{\mathrm{mod}\,\boldsymbol{el}}$ la valeur de la déformation orthoradiale plateau (stabilisation de la déformation) obtenue par le modèle à la fin du surcarottage.

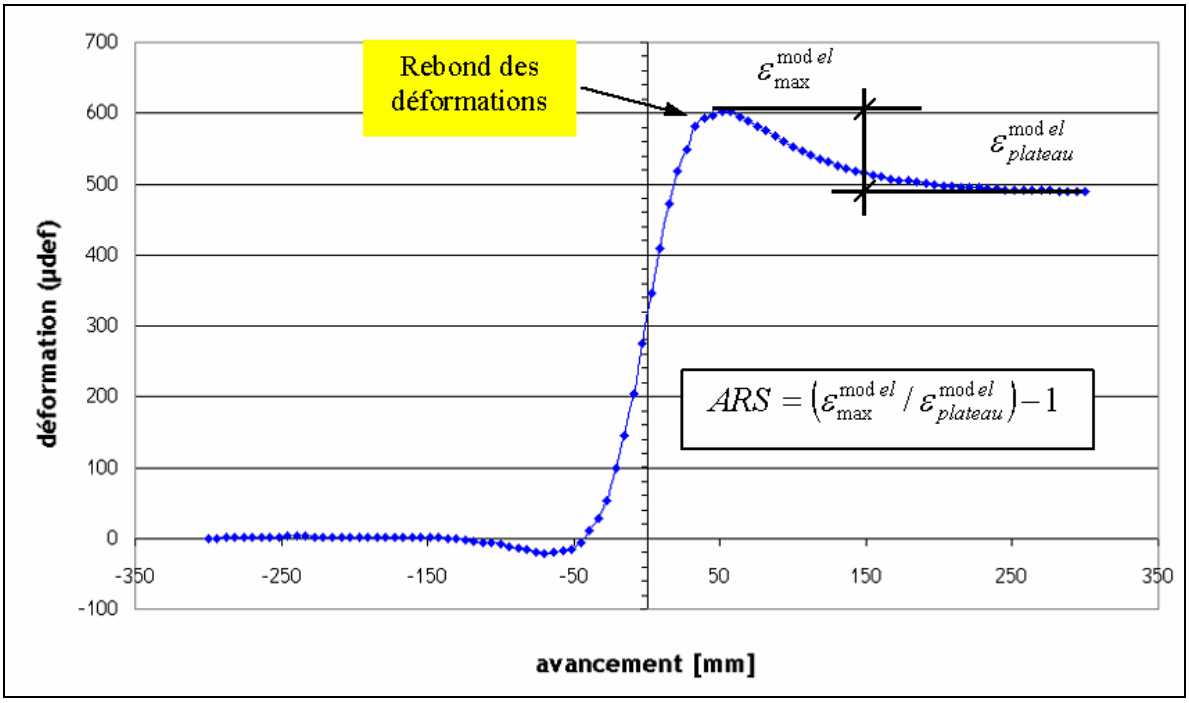


Figure 32 : Indice du rebond à l'essai de surcarottage (ARS).

L'amplitude de ce rebond « ARS » sera ensuite comparée à l'amplitude du pic au surcarottage APS.

3.4.3 PRESENTATION DU MODELE

Nous n'avons pas cherché à reproduire explicitement la progression du surcarottage au cours du temps (avancement du carottier), mais pour en rendre compte nous nous sommes intéressés aux déformations à différents points avec une saisie fixe. Une telle approche « spatiale » plutôt que « temporelle » est possible car nous faisons l'hypothèse d'élasticité linéaire. Le détail du modèle est présenté sur la Figure 33. Le détail de la modélisation ainsi que la technique de maillage adopté pour la génération du modèle 2D et 3D sont présentées dans l'ANNEXE H-1.

L'étude se voulant essentiellement phénoménologique, l'inclusion n'a pas été pris en compte d'emblée dans la modélisation. De même, le forage d'accès n'a pas été modélisé. On a donc supposé que la cellule de mesure était positionnée suffisamment loin du forage d'accès pour que l'influence de celui-ci sur les déformations mesurées soit négligeable (Figure 33).

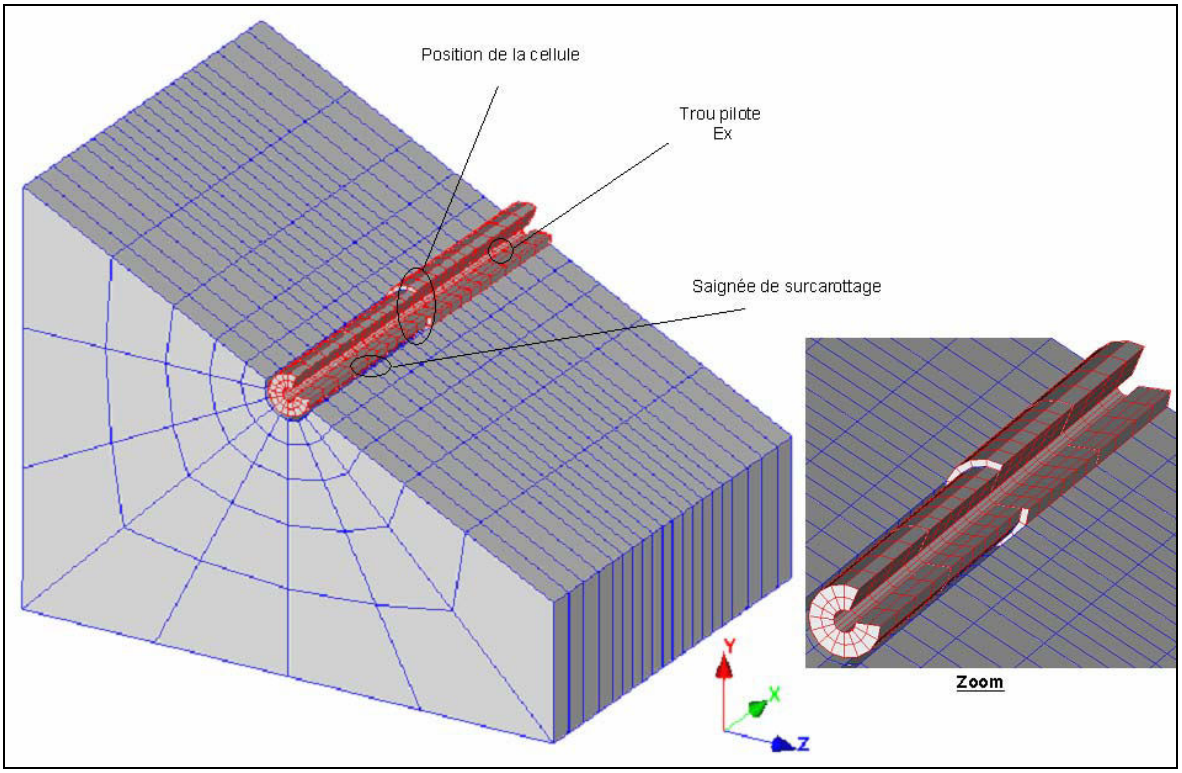


Figure 33 : Représentation du modèle de l'essai de surcarottage

Les dimensions du modèle retenu (Figure 34) sont :

- Diamètre du trou pilote : ϕ_1 = 38 mm ;
- Diamètre interne de la saignée de surcarottage : ϕ_2 = 122 mm ;
- Diamètre externe de la saignée de surcarottage : ϕ_3 = 146 mm ;

- Une section carrée pour le modèle dont le côté est : H = 10*ϕ_3 = 1460 mm;
- Longueur du modèle : L_{surc} = 600 mm.

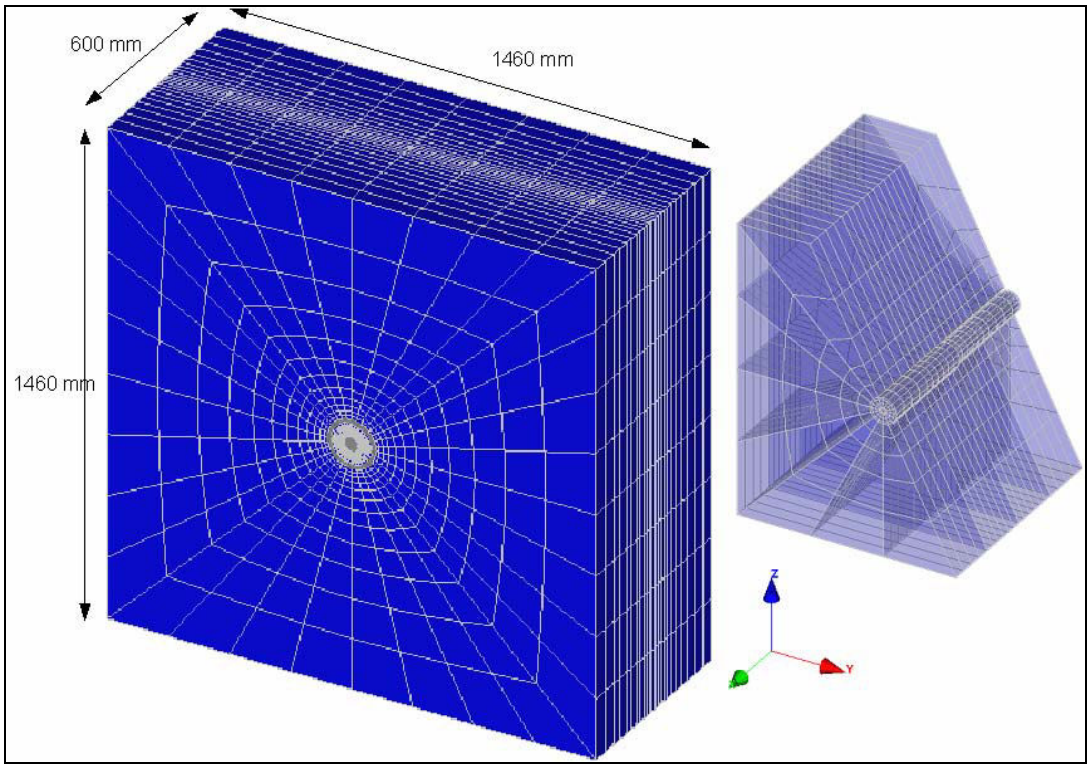


Figure 34 : Présentation du modèle 3D

L'essai de surcarottage est modélisé par l'intermédiaire de 3 phases successives :

- Phase 1 : initialisation de l'état de contrainte du modèle ;
- Phase 2 : réalisation du trou pilote (38 mm),
- Phase 3 : réalisation d'une saignée coaxiale au petit forage, de diamètre extérieur 146 mm et de diamètre intérieur 122 mm.

Les techniques d'optimisation du maillage 3D ainsi que la validation des différentes phases du modèle de surcarottage sont présentées dans l'ANNEXE H-2.

Nous avons analysé l'influence de plusieurs paramètres sur l'amplitude du rebond et nous avons choisi de tracer les courbes normalisées $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier.

Nous nous sommes approchés au mieux, dans notre étude de l'amplitude du rebond, des conditions du site de Tournemire, ainsi que des caractéristiques élastiques de l'argilite étudiée. Nous avons choisi comme paramètres de modélisation les caractéristiques élastiques et les valeurs de contraintes qui se rapprochent des conditions du site de Tournemire :

- Le tenseur des contraintes initiales fournit par la campagne de fracturation hydraulique classique combiné à la méthode HTPF de GEOSTESS (voir Figure 18, § 3.1.3.2) ;
- Les caractéristiques élastiques fournis par les essais mécaniques en laboratoire réalisés par Rejeb *et al.*, [1999] (voir Tableau 2, § 3.1.2.3) ;
- Prise en compte du poids des terres à partir de la géologie du site (voir Figure 13 et § 3.1.3.3).

3.4.4 RESULTATS

Nous présentons dans le Tableau 4 un récapitulatif des hypothèses et des résultats des différents modèles de surcarottage réalisés lors de cette étude.

3.4.4.1 CAS DE REFERENCE : COMPORTEMENT ELASTIQUE LINEAIRE ISOTROPE ET CONTRAINTES INITIALES ISOTROPES

Nous avons considéré tout d'abord le cas le plus simple (comportement élastique linéaire isotrope de la roche, contraintes initiales isotropes) et nous avons fait varier le coefficient de Poisson de la roche afin d'étudier son effet sur l'intensité du rebond. Le résultat obtenu est présenté sur la Figure 35. Le tenseur des contraintes initiales est isotrope $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 3$ MPa, la valeur du module de Young est E = 9 MPa.

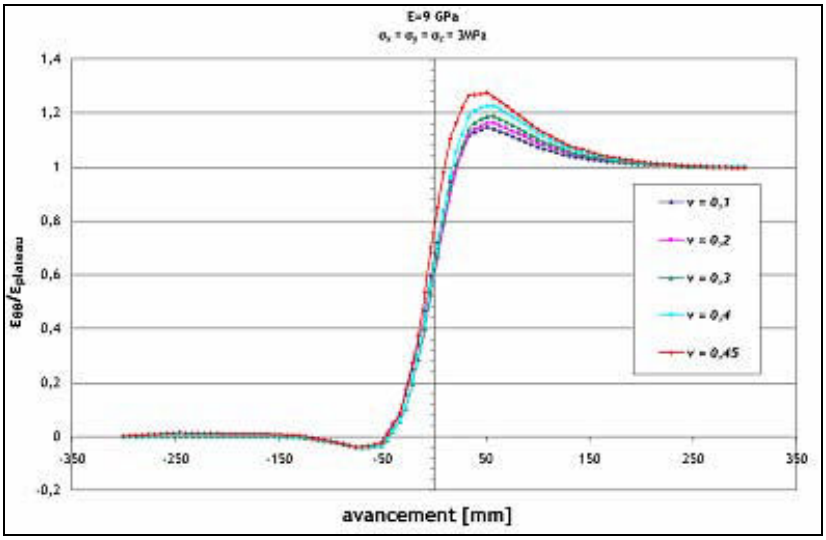


Figure 35 : Courbes $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier pour différentes valeurs du coefficient de Poisson ν

Nous avons tracé, Figure 36, la variation de l'intensité du rebond en fonction du coefficient de Poisson ν : 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,45. Plus le coefficient de Poisson est grand, plus l'intensité du rebond est importante. La valeur maximale de l'intensité de rebond est de 27 % pour ν=0,45.

	Caractéristiques élastiques					$A_E = E_2/E_1$	θ (°)	Contraintes principales [MPa]			$A\sigma = \sigma_X/\sigma_Y$	Axe forage / plan d'anisotropie	ARS (%)
	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]			σ_X	σ_Y	σ_Z			
1	9000		0,1			1		3	3	3	1		15
2	9000		0,2			1		3	3	3	1		16
3	9000		0,3			1		3	3	3	1		19
4	9000		0,4			1		3	3	3	1		23
5	9000		0,45			1		3	3	3	1		27,5
6	9000	9000	0,2	0,2	4000	1	0	3	3	3	1	//	17
7	9000	13500	0,2	0,2	4000	1,5	0	3	3	3	1	//	14
8	9000	18000	0,2	0,2	4000	2	0	3	3	3	1	//	13
9	9000	22500	0,2	0,2	4000	2,5	0	3	3	3	1	//	12,5
10	9000	27000	0,2	0,2	4000	3	0	3	3	3	1	//	13,5
11	9000	9000	0,2	0,2	4000	1	45	3	3	3	1	//	33
12	9000	13500	0,2	0,2	4000	1,5	45	3	3	3	1	//	19,5
13	9000	18000	0,2	0,2	4000	2	45	3	3	3	1	//	17
14	9000	22500	0,2	0,2	4000	2,5	45	3	3	3	1	//	15
15	9000	27000	0,2	0,2	4000	3	45	3	3	3	1	//	14
16	9000	9000	0,2	0,2	4000	1	90	3	3	3	1	//	19
17	9000	13500	0,2	0,2	4000	1,5	90	3	3	3	1	//	17,5
18	9000	18000	0,2	0,2	4000	2	90	3	3	3	1	//	18
19	9000	22500	0,2	0,2	4000	2,5	90	3	3	3	1	//	22,5
20	9000	27000	0,2	0,2	4000	3	90	3	3	3	1	//	24,5
21	9000	9000	0,2	0,2	4000	1	0	3	3	3	1	⊥	17
22	9000	13500	0,2	0,2	4000	1,5	0	3	3	3	1	⊥	14
23	9000	18000	0,2	0,2	4000	2	0	3	3	3	1	⊥	15
24	9000	22500	0,2	0,2	4000	2,5	0	3	3	3	1	⊥	07
25	9000	27000	0,2	0,2	4000	3	0	3	3	3	1	⊥	04,5
26	9000	9000	0,2	0,2	4000	1	45	3	3	3	1	⊥	34
27	9000	13500	0,2	0,2	4000	1,5	45	3	3	3	1	⊥	29
28	9000	18000	0,2	0,2	4000	2	45	3	3	3	1	⊥	30,5
29	9000	22500	0,2	0,2	4000	2,5	45	3	3	3	1	⊥	21
30	9000	27000	0,2	0,2	4000	3	45	3	3	3	1	⊥	17
31	9000	9000	0,2	0,2	4000	1	90	3	3	3	1	⊥	19
32	9000	13500	0,2	0,2	4000	1,5	90	3	3	3	1	⊥	16
33	9000	18000	0,2	0,2	4000	2	90	3	3	3	1	⊥	15
34	9000	22500	0,2	0,2	4000	2,5	90	3	3	3	1	⊥	08,5
35	9000	27000	0,2	0,2	4000	3	90	3	3	3	1	⊥	05
36	9000		0,2			1		3,00	3,00	3,00	1		16,5
37	9000		0,2			1		3,50	2,75	2,75	1,27		19,5
38	9000		0,2			1		4,00	2,50	2,50	1,6		20,5
39	9000		0,2			1		4,50	2,25	2,25	2		24,5
40	9000		0,2			1		5,00	2,00	2,00	2,5		28,5
41	9000		0,1			1		6,00	1,50	1,50	4		61

Tableau 4 : Tableau de synthèse des hypothèses et des résultats des différents modèles de surcarottage

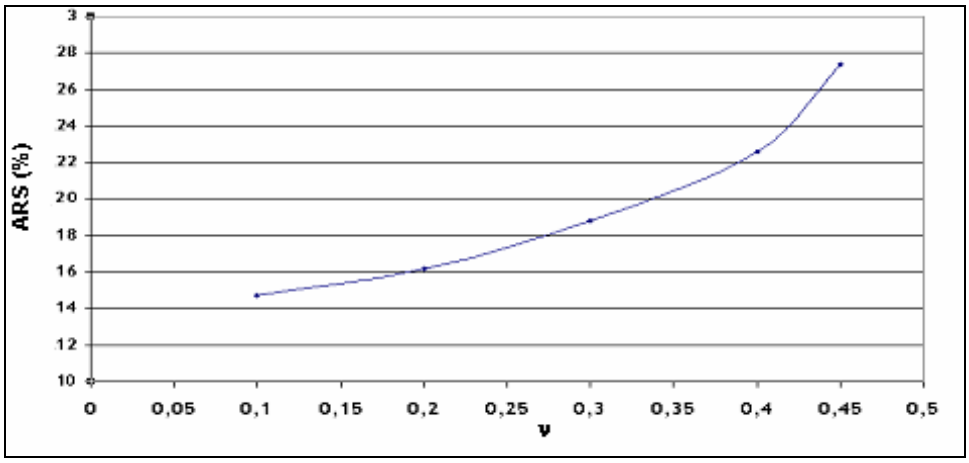


Figure 36 : Intensité du rebond ARS en fonction du coefficient de Poisson ν

La distribution des contraintes autour de la saignée de surcarottage (ANNEXE I) permet de comprendre le phénomène de rebond.

Nous observons dans le cas de référence sur la Figure 37 la variation des contraintes axiales et orthoradiales en fonction de l'avancement du carottier sur la paroi du trou EX. Dans un cas idéal (courbe typique de l'essai de surcarottage, voir Figure 7), le relâchement de la carotte lors de l'essai de surcarottage se suit immédiatement par l'annulation des contraintes et la déformation orthoradiale varie comme le montre la courbe en pointillé sur la Figure 37. Cependant, dans le cas particulier où le relâchement de la carotte s'accompagne d'un décalage ($\Delta\sigma$) entre les courbes des contraintes orthoradiales et axiales, un rebond de déformation (raccourcissement de la carotte) apparaît par effet poisson (courbe en rouge, Figure 37).

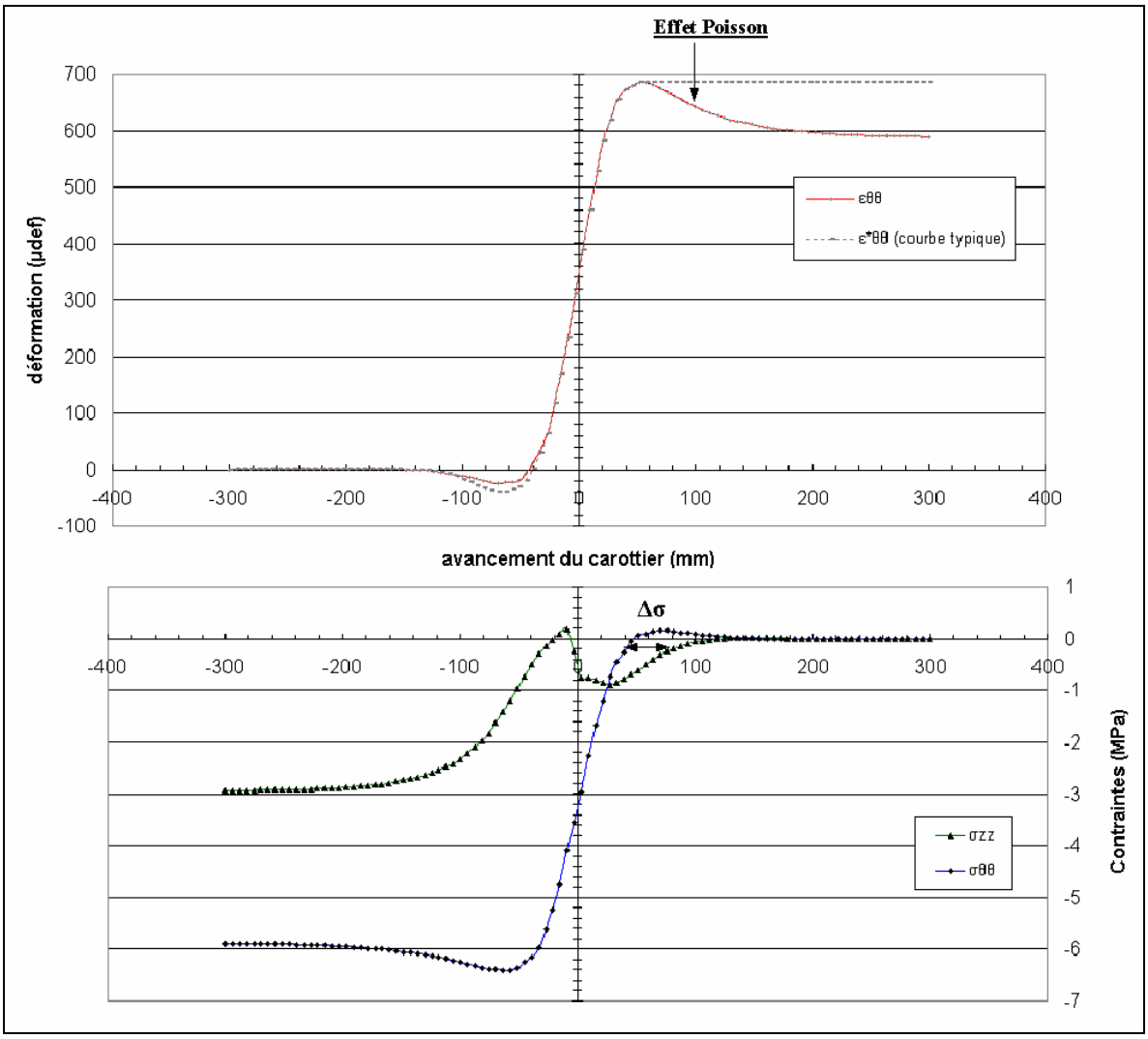


Figure 37 : Influence des contraintes orthoradiales et axiales sur le rebond

3.4.4.2 IMPACT DE L'ANISOTROPIE DES PROPRIETES ELASTIQUES DE LA ROCHE

Pour étudier l'effet de l'anisotropie des propriétés élastiques de la roche sur le rebond, nous avons fait varier le rapport d'anisotropie $A_E=E_2/E_1$ de 1 à 3. Dans le cas isotrope transverse, nous avons fixé le module de Young perpendiculaire au plan d'anisotropie E1 et nous avons varié le module de Young parallèle au plan d'anisotropie E_2. Le module de cisaillement G12 est égal à 4 MPa, les coefficients de Poisson sont : ν_{12} = 0,20 et ν_{13} = 0,20. Le tenseur des contraintes initiales est isotrope $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 3$ MPa

Nous avons considéré dans notre étude le cas où le forage est perpendiculaire au plan d'anisotropie ainsi que le cas où le forage est parallèle au plan d'anisotropie.

Dans chaque cas nous avons étudié trois orientations différentes (θ) de la stratification de la roche par rapport au plan (oxy) : parallèle, perpendiculaire et faisant un angle de 45°.

3.4.4.2.1 AXE DU TROU EX PARALLELE A LA STRATIFICATION

Nous avons analysé les courbes de variations des déformations normalisées $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier (ANNEXE J) pour différentes valeurs de θ dans le cas ou l'axe du trou du forage est parallèle au plan de stratification (Figure 38).

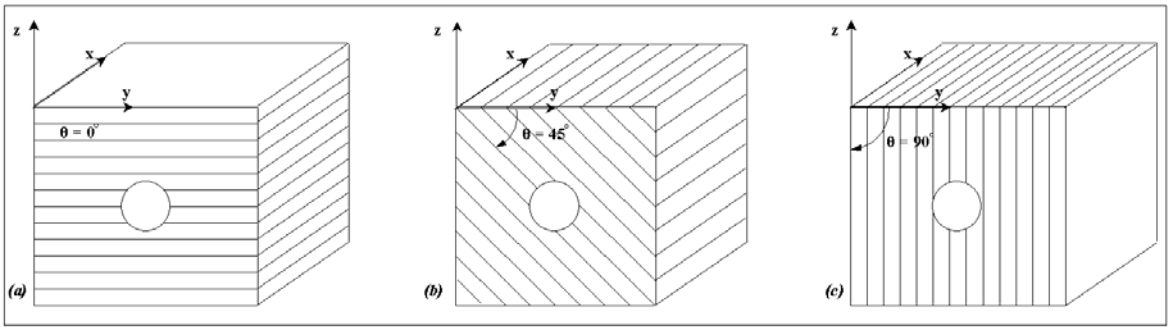


Figure 38 : Forage parallèle au plan d'anisotropie
Différentes orientations du plan d'anisotropie (a) θ=0 ; (b) θ=45 ; (c) θ=90°.

Nous remarquons sur la Figure 39 que le rebond est quasiment présent dans toutes les configurations. L'anisotropie des modules élastiques n'influence pas beaucoup l'intensité du rebond lorsque le forage est parallèle au plan de stratification. En effet, l'ARS atteint une valeur maximale de 33 % lorsque la roche est isotrope.

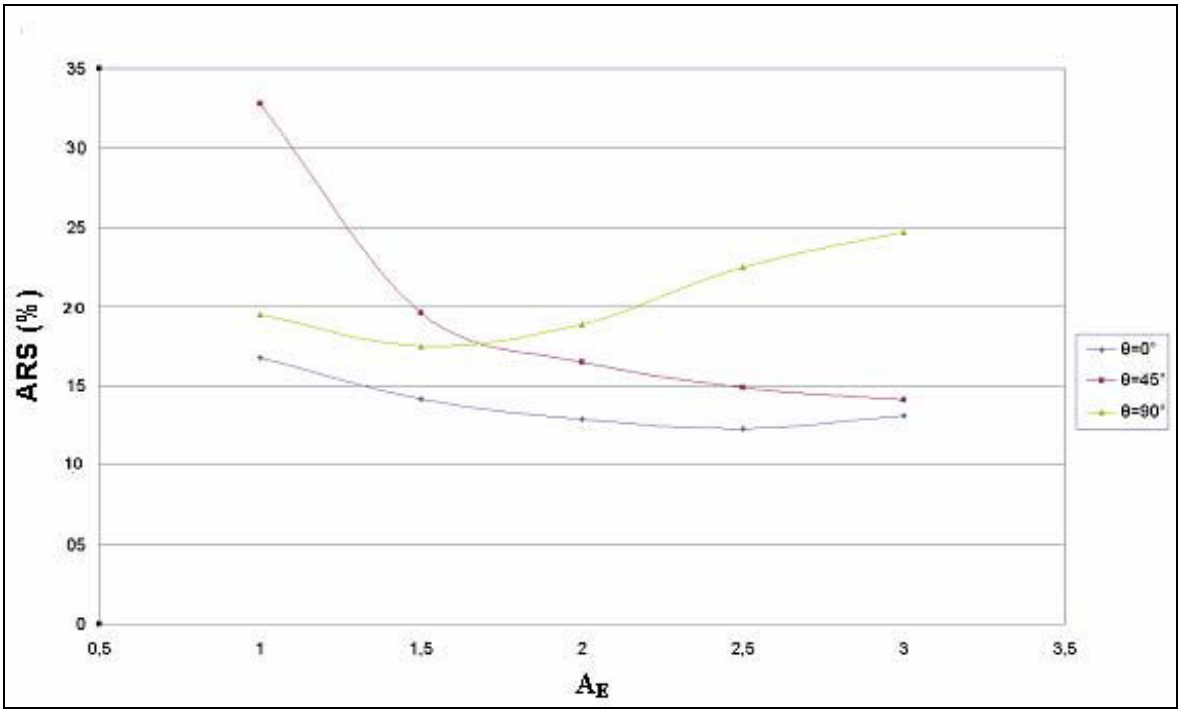


Figure 39 : Intensité du rebond en fonction de l'anisotropie de la roche
Axe du trou Ex parallèle à la stratigraphie

3.4.4.2.2 AXE DU TROU EX PERPENDICULAIRE A LA STRATIGRAPHIE

L'ANNEXE J rassemble l'ensemble des courbes de variations des déformations normalisées $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier, pour différentes valeurs de θ, dans le cas ou l'axe du forage est perpendiculaire au plan de stratification (Figure 40).

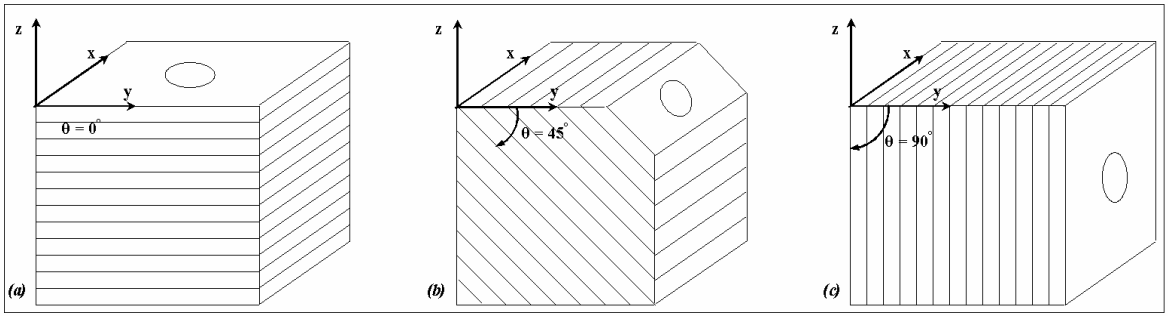


Figure 40 : Forage perpendiculaire au plan d'anisotropie
Différents orientations du plan d'anisotropie (a) θ=0° ; (b) θ=45° ; (c) θ=90°.

Dans le cas où le forage est perpendiculaire au plan de stratification, l'anisotropie de la roche influence considérablement l'intensité du rebond. Pour cette configuration, plus la roche est anisotrope moins le rebond est important. L'ARS atteint une valeur maximale de 34 % (Figure 41).

Nous pouvons également affirmer que dans les deux cas où le forage est soit perpendiculaire soit parallèle à la stratification, l'intensité du rebond reste maximale.

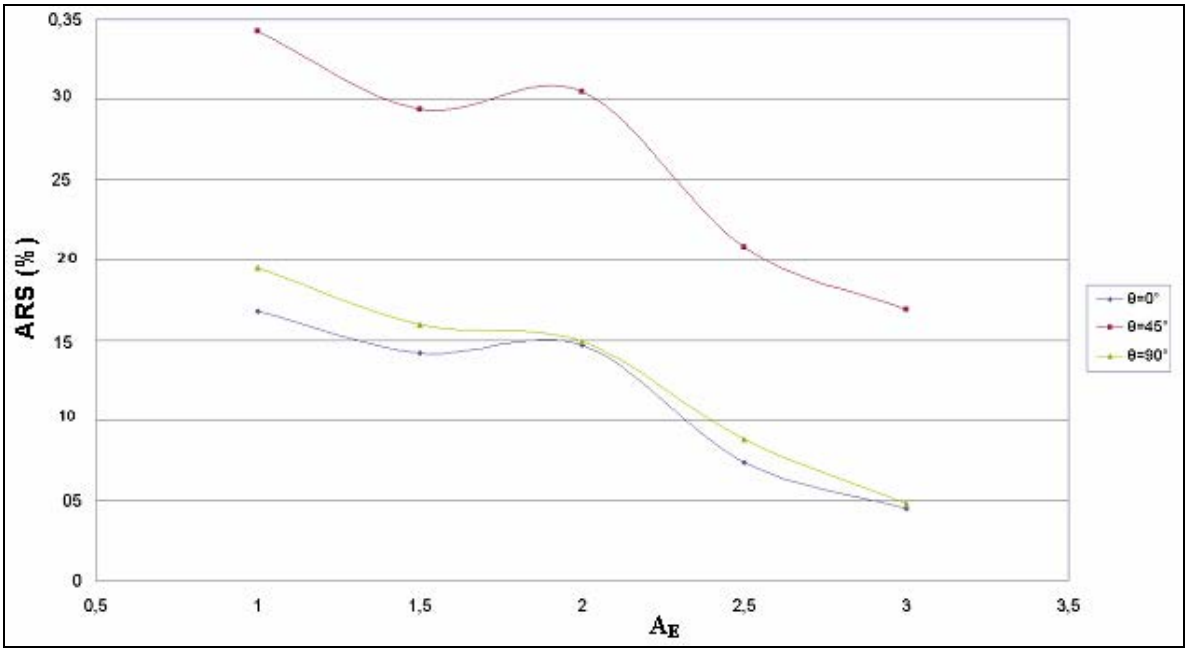


Figure 41 : Intensité du rebond en fonction de l'anisotropie de la roche
Axe du trou Ex perpendiculaire à la stratigraphie

3.4.4.3 IMPACT DE L'ANISOTROPIE DES CONTRAINTES INITIALES

Nous avons fixé l'axe « x » comme axe du forage. Pour simplifier le travail, nous avons étudié l'effet de l'anisotropie des contraintes initiales sur le rebond dans le cas d'un tenseur de contraintes présentant une symétrie de révolution autour de l'axe du forage ($\sigma_y = \sigma_z \neq \sigma_x$). Nous définissons le paramètre : $\boldsymbol{A}_\sigma = \sigma_x / \sigma_y$.

Le comportement de la roche est supposé élastique, homogène isotrope. E = 9 MPa et ν = 0,2.

3.4.4.3.1 CAS OU $\sigma_x > \sigma_y = \sigma_z$

Les résultats des différentes courbes donnant la variation des déformations normalisées $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier pour différents états de contraintes initiales sont présentées dans l'ANNEXE J.

Nous présentons sur la Figure 42 la variation de l'ARS en fonction des différents états de contraintes initiales. Nous avons constaté que plus les contraintes initiales sont anisotropes plus le rebond est important. L'APS atteint une valeur de 29 % pour une valeur de $\boldsymbol{A}_\sigma = 2{,}5$.

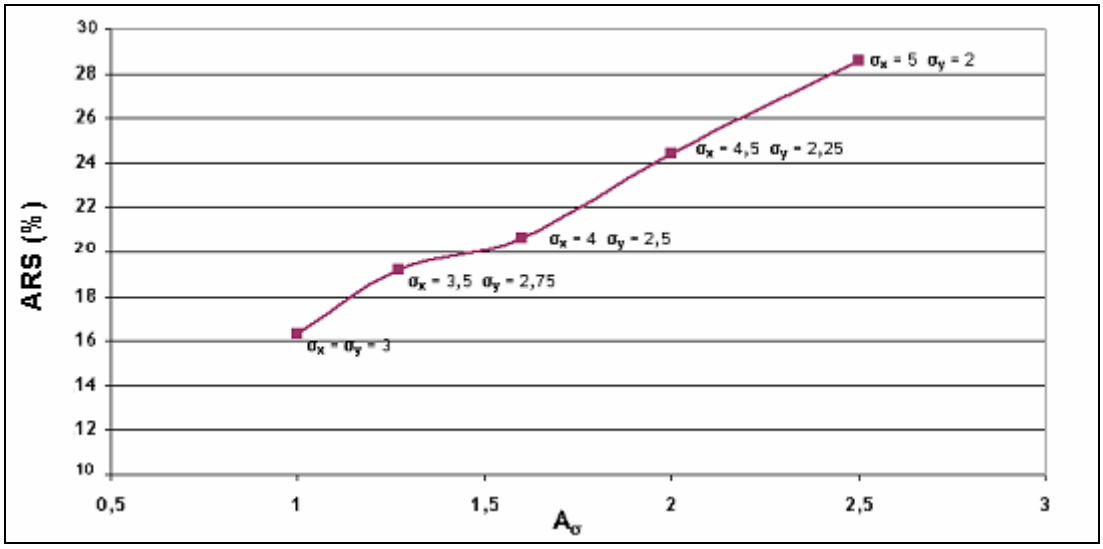


Figure 42 : Intensité du rebond en fonction de l'anisotropie des contraintes

3.4.4.3.2 CAS OU $\sigma_x < \sigma_y = \sigma_z$

Pour cette configuration, nous avons constaté que l'intensité du rebond diminue lorsque les contraintes latérales augmentent comparativement à la contrainte axiale. Cependant cette variation est très faible, comme le montre la Figure 43. Néanmoins, il est important de noter que les déformations orthoradiales, pour un rapport de contrainte de 2, sont nettement supérieures (900 $\mu\varepsilon$) à celles calculées dans le cas d'un chargement isotrope (700 $\mu\varepsilon$) (Figure 44).

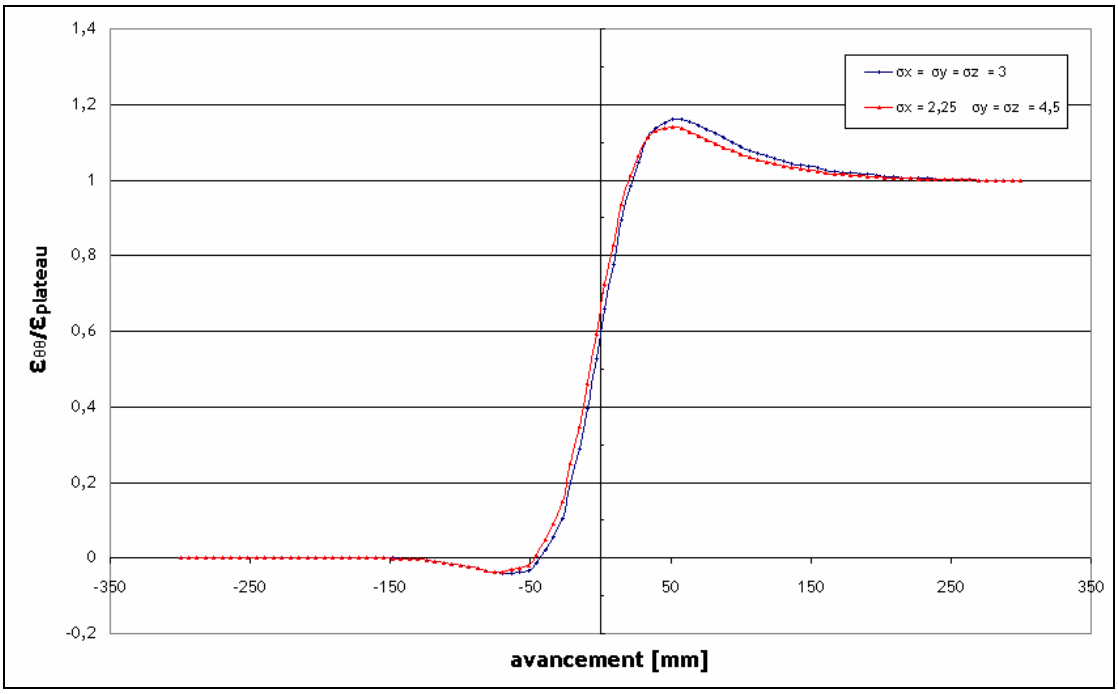


Figure 43 : Courbes $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier pour différents états de contraintes ($\sigma_x < \sigma_y = \sigma_z$)

En conclusion l'anisotropie des contraintes affecte l'ARS. En effet, dans le cas de type $\sigma_x > \sigma_y = \sigma_z$, plus l'anisotropie est importante plus l'amplitude du rebond est importante. Cependant le cas de type $\sigma_x < \sigma_y = \sigma_z$ influence très faiblement l'amplitude du rebond.

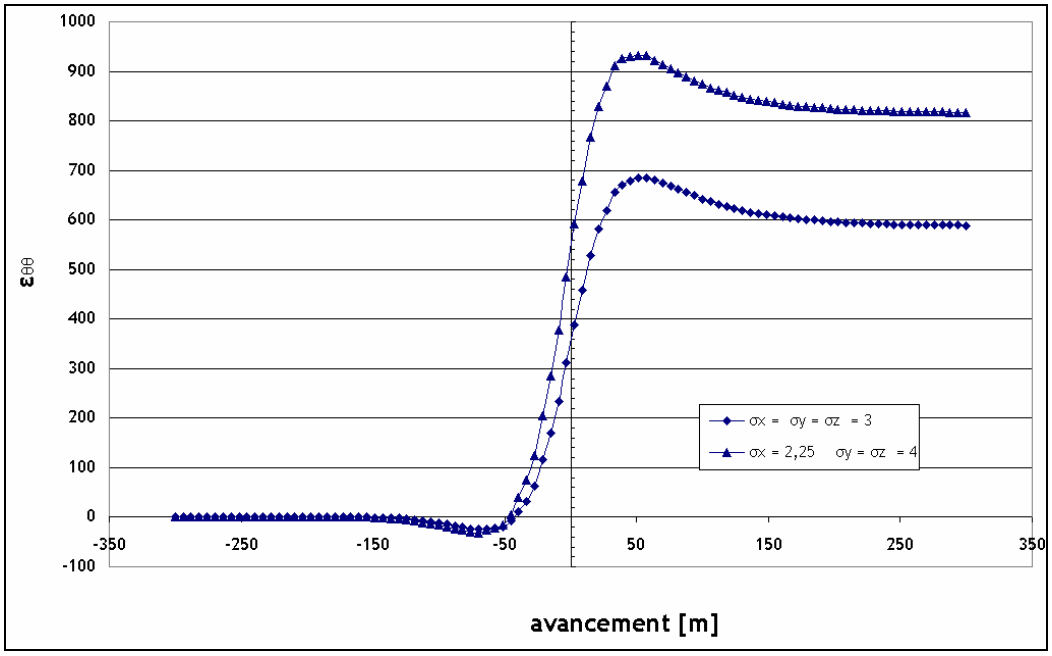


Figure 44 : Courbes $\varepsilon_{\theta\theta}$ en fonction de l'avancement du carottier pour différentes états de contraintes ($\sigma_x < \sigma_y = \sigma_z$)

3.4.4.4 SCENARIO MAXIMALISTE

Nous avons ensuite essayé de maximiser le phénomène de rebond en cumulant toutes les conditions qui favorisent son apparition. Nous avons retenu pour chacune des études de sensibilité effectuées dans les paragraphes précédents, la modalité qui maximise l'intensité du rebond : un module d'élasticité isotrope E = 9 GPa, avec un coefficient de Poisson élevé (ν = 0,45), des contraintes initiales anisotropes σ_x = 6 MPa et $\sigma_y = \sigma_z$ = 1,5 MPa, en considérant un forage perpendiculaire à la stratigraphie. Cependant, en traçant les courbes de variation des déformations normalisées $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier (ANNEXE J), des anomalies apparaissent. En effet soit que les valeurs plateaux sont proche de zéro et le rapport $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau\ tend}$ vers l'infinie ou bien ou bien les valeurs plateaux sont négative. Dans ces cas il est donc impossible de définir l'ARS.

Nous retiendrons donc en définitive le résultat d'un état qui donne une courbe typique représentant un scénario maximaliste, c'est-à-dire que nous considérons ici, un comportement de la roche linéaire isotrope E = 9 GPa, avec un coefficient de Poisson faible (ν= 0,1), ainsi que des contraintes initiales anisotropes σ_x = 6 MPa et $\sigma_y = \sigma_z$ = 1,5 MPa (Figure 46).

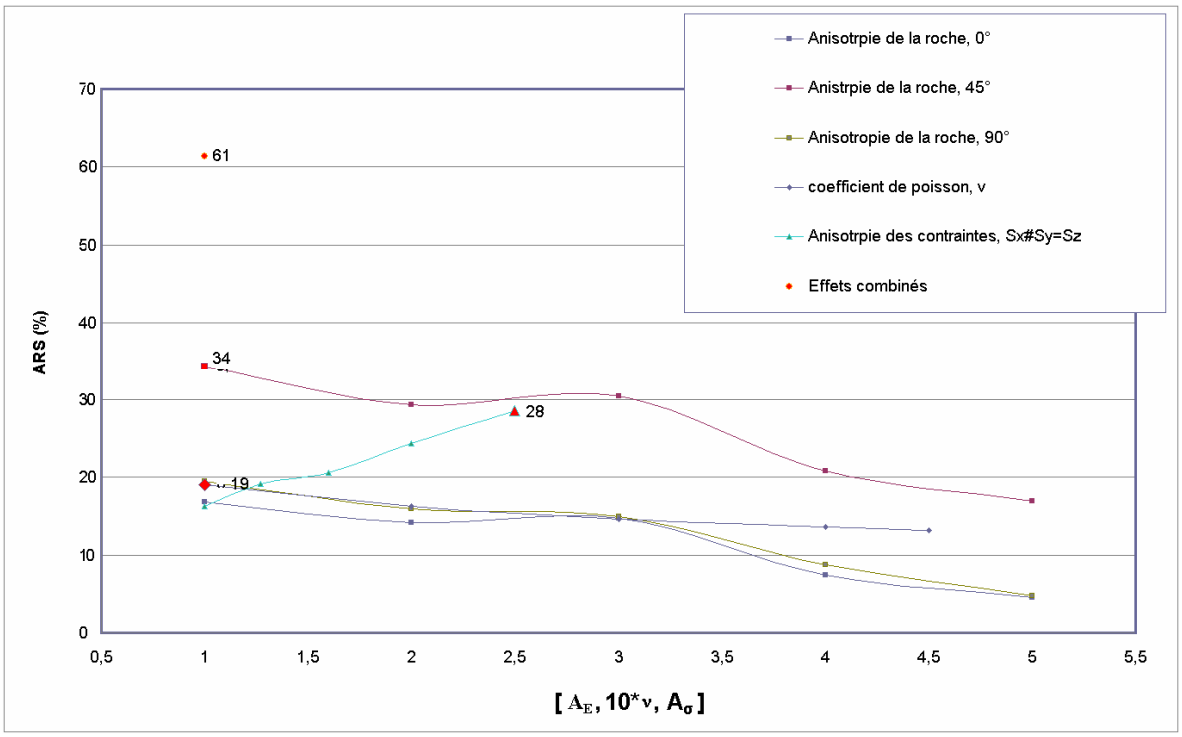


Figure 45 : Variation de l'intensité du rebond en fonction des paramètres étudiés

La courbe montre qu'en cumulant tous les effets (scénario maximaliste), l'intensité du rebond peut atteindre 60% (Figure 46) en restant dans l'hypothèse d'un comportement élastique de la roche.

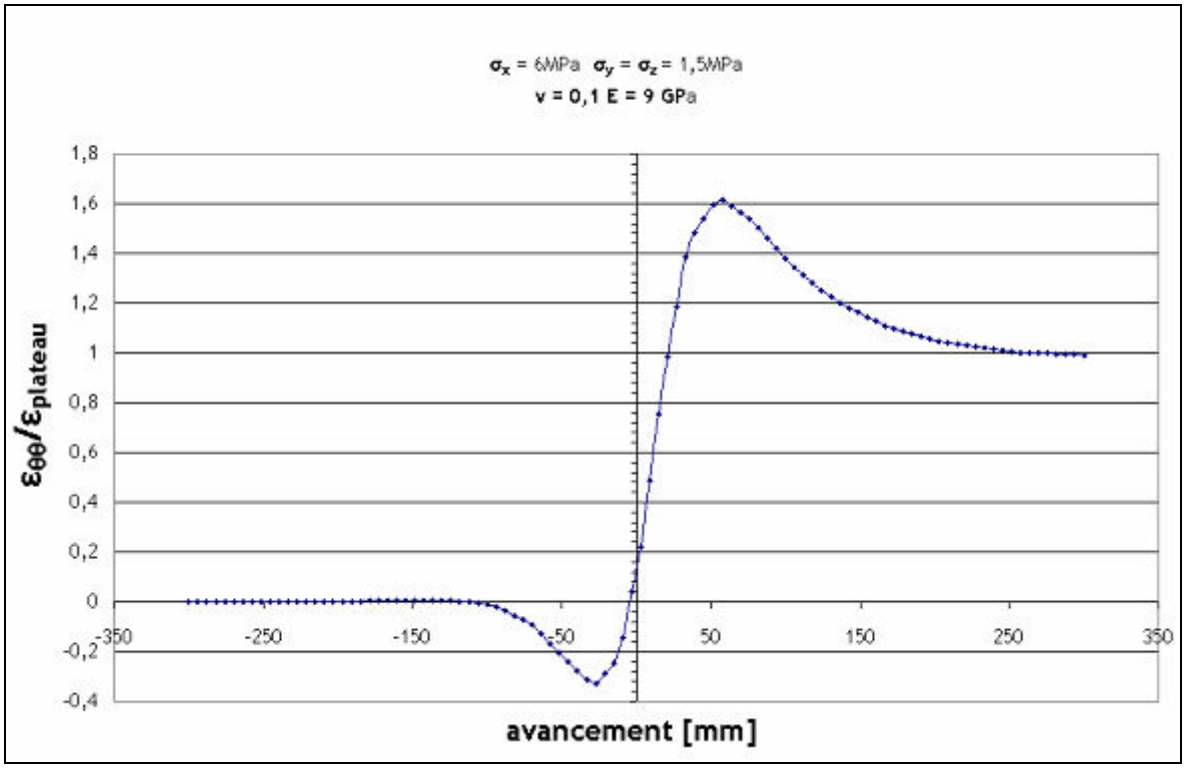


Figure 46 : Courbes $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier scénario maximaliste

3.4.5 CONCLUSION

Nous venons de voir dans le § 3.4 que la réponse élastique, en balayant différentes possibilités, ne suffit pas à expliquer l'amplitude du pic observée lors des campagnes de mesures *in situ*. En effet, l'intensité du rebond modélisé varie de 0% à 35% pour des effets séparés et peut atteindre 60% si toutes les conditions favorisant son apparition sont combinées. Néanmoins, même dans ces conditions maximalistes, l'hypothèse d'un comportement élastique n'est pas suffisante pour reproduire le comportement des argilites de Tournemire observé lors des essais de surcarottage, au cours desquels, le pic peut atteindre de 120 à 180 %.

Rappelons ici que la recherche bibliographique sur l'origine du phénomène de pic au surcarottage (§ 3.3) a mené à deux hypothèses explicatives : problème instrumental ou phénomène physique lié à la rhéologie. Avant de lancer un programme plus sophistiqué de modélisation intégrant les couplages thermomécanique ou hydromécanique, nous avons décidé de mettre en œuvre une nouvelle campagne d'essais géomécaniques pour évaluer l'impact éventuel des conditions expérimentales (la vitesse de rotation du carottier, le fluide de foration utilisé et le séchage de la colle) sur les mesures de déformations lors de l'essai de surcarottage.

4. EXPLICATION DES PHENOMENES OBSERVES

4.1 APPORTS DE LA NOUVELLE CAMPAGNE D'ESSAIS GEOMECANIQUES *IN SITU*

4.1.1 OBJECTIF ET DEMARCHE

Dans l'objectif de mieux cerner et si possible d'identifier l'origine des phénomènes inhabituels observés en 2005-2006 (voir § 3), l'IRSN et l'INERIS ont décidé de réaliser une nouvelle campagne de mesure de contraintes par surcarottage dans la station expérimentale de Tournemire. Cette campagne s'est déroulée du 3 au 18 novembre 2008. Ce travail a fait l'objet d'un rapport [Lahaie, 2010] qui n'est pas repris ici, mais dont l'essentiel est résumé dans cette section (§ 4.1). Ce travail a ensuite été complété par des travaux en laboratoire détaillés dans la partie 4.2.

La campagne a consisté à réaliser plusieurs essais de surcarottage, à 1 m de distance les uns des autres (Figure 47), dans une zone considérée comme géologiquement homogène, suivis chacun de plusieurs essais biaxiaux (Figure 48 et Figure 49). A plusieurs reprises, le protocole d'essai a été modifié afin d'évaluer l'impact des conditions expérimentales sur les mesures obtenues. Les paramètres dont l'influence a été testée sont notamment : la vitesse de rotation du carottier, le fluide de foration utilisé (air ou huile) et le temps de séchage de la colle. L'objectif était de vérifier si un ou plusieurs de ces paramètres pouvaient jouer un rôle dans l'apparition (ou la disparition) des phénomènes observés en 2005-2006 et ainsi, ouvrir des pistes d'explication à ces phénomènes.

La méthode mise en œuvre lors de cette campagne est le surcarottage de cellule CSIRO Hi 12. La colle utilisée, fournie par ES&S (Australie), est recommandée pour une gamme de températures de la roche de 10 à 18°C. Le temps de séchage préconisé par le fournisseur pour cette colle est de 16 heures.

Figure 47 : Photographies des essais de surcarottage – Campagne de 2008

Figure 48 : Réalisation des essais biaxiaux dans la galerie Ouest

Figure 49 : Exemple de carotte obtenue après un essai de surcarottage (TC34)

4.1.2 EFFET DU TEMPS DE SECHAGE DE LA COLLE SUR LES PHENOMENES OBSERVES

4.1.2.1 IMPACT DU TEMPS DE SECHAGE SUR LE « PIC AU SURCAROTTAGE »

Les courbes de déformations obtenues lors des essais de surcarottages sont présentées dans l'ANNEXE K.

La Figure 50 montre clairement l'impact du temps de séchage sur la forme des courbes obtenues, notamment sur le pic au surcarottage (phénomène 2 sur la Figure 25 § 3). Celui-ci est très prononcé pour les faibles temps de séchage (14-16h) et s'atténue ensuite pour disparaître au fur et à mesure que le temps de séchage augmente [Lahaie, 2010].

La Figure 51 représente l'amplitude du pic, exprimée à travers l'indice APS « Amplitude du Pic au Surcarottage » (voir § 3.2.2), en fonction du temps de séchage.

On note qu'il faut attendre 78h de séchage pour observer une disparition totale du pic (APS = 0).

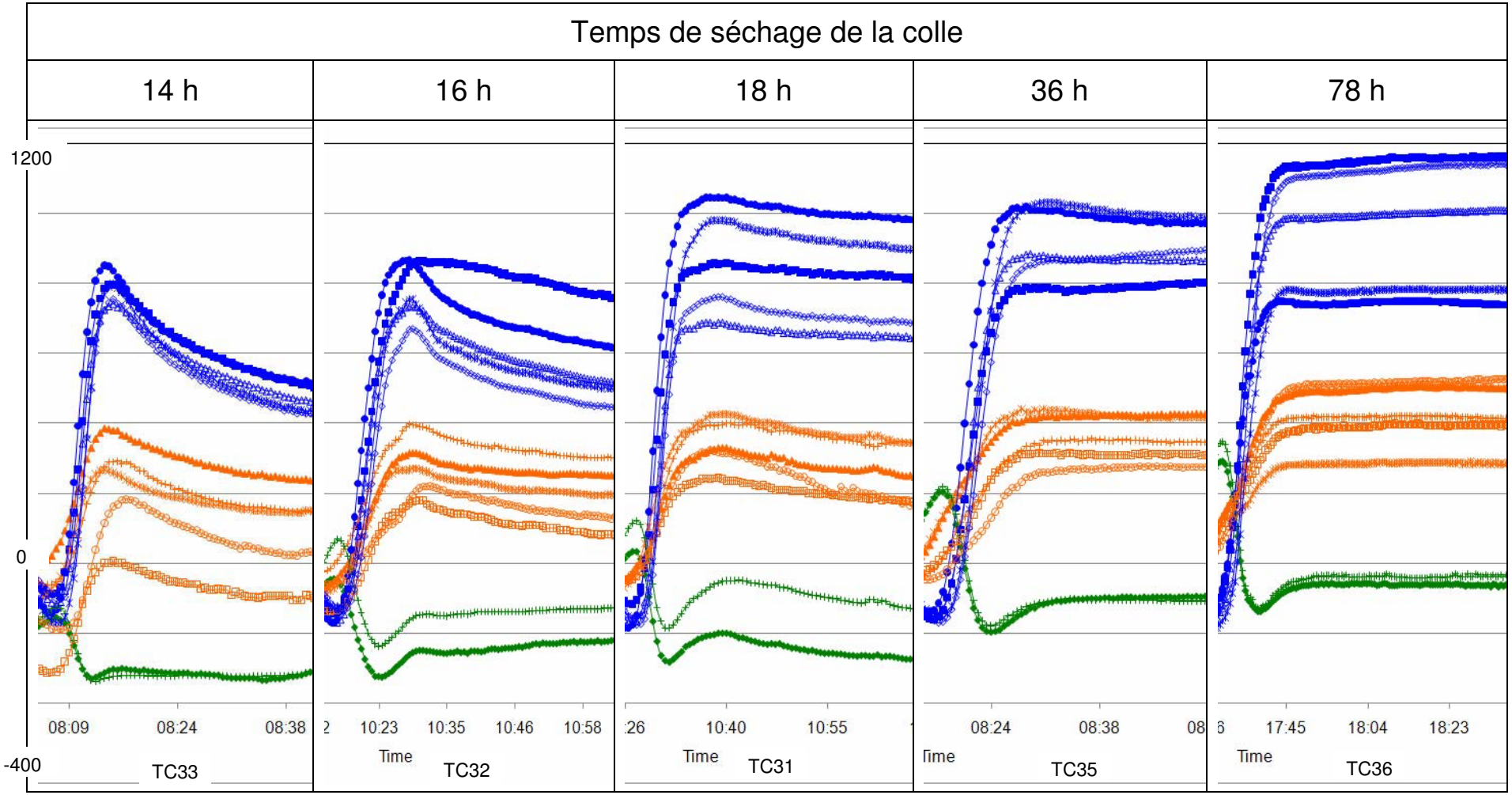


Figure 50 : Impact du temps de séchage de la colle sur la forme du pic à l'essai de surcarottage [Lahaie, 2010]

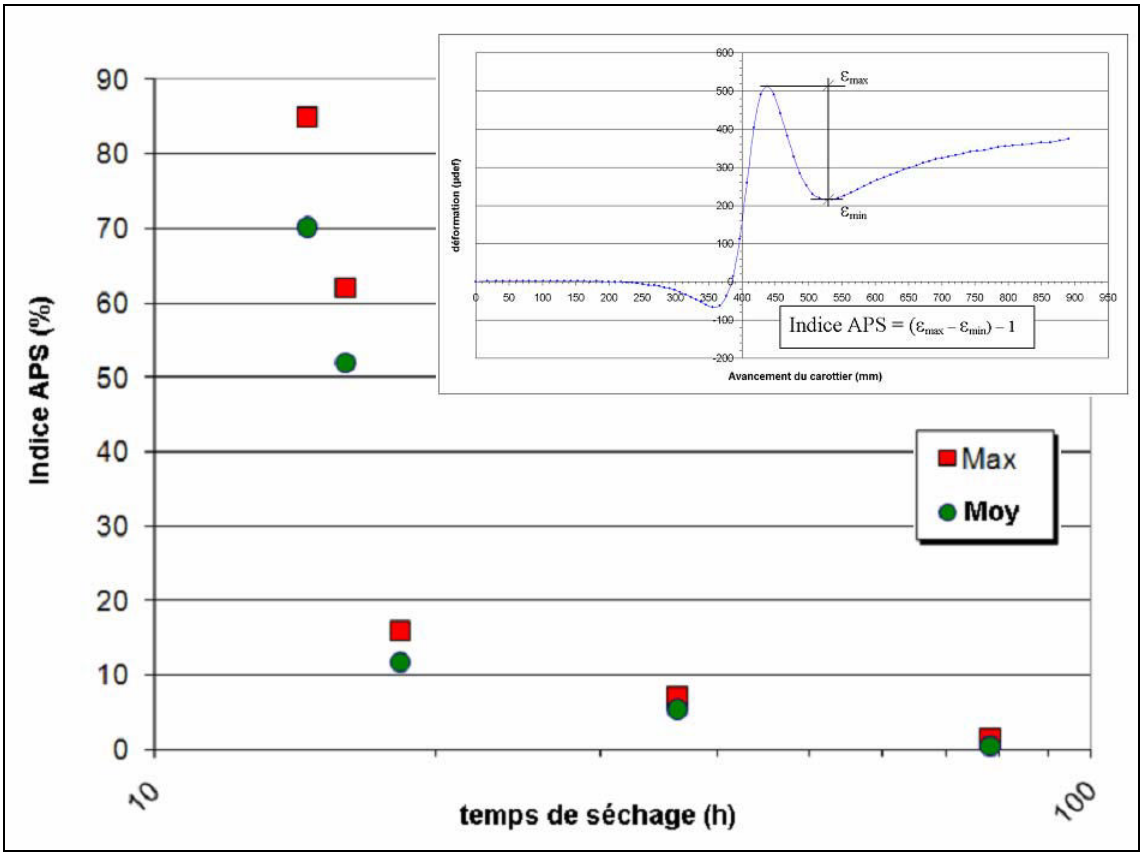


Figure 51 : Diminution de l'indice APS « Amplitude du Pic au Surcarottage » avec le temps de séchage (l'échelle des abscisses est logarithmique) [Lahaie et al., 2010]

4.1.2.2 IMPACT DU TEMPS DE SECHAGE SUR LE « PIC A L'ESSAI BIAXIAL »

Le phénomène de « pic à l'essai biaxial » était une des particularités des essais biaxiaux réalisés en 2005-2006. À la fin d'un cycle charge-décharge, les déformations orthoradiales atteignaient une valeur supérieure à celles de l'état initial non chargé (traduisant ainsi un allongement par rapport à cet état initial), puis s'inversaient progressivement pour retrouver asymptotiquement leur valeur de départ (cf. phénomène 4 sur la Figure 26 § 3). D'autre part, on constatait que ce phénomène ne se manifestait plus lorsque le même essai était réalisé non plus quelques minutes, mais plusieurs jours après l'essai de surcarottage.

La nouvelle campagne de mesure permet de mieux comprendre la raison de la disparition de ce phénomène au bout de quelques jours. Les courbes de déformations obtenues lors des essais biaxiaux durant la campagne de 2008 sont présentées dans l'ANNEXE L. Comme le montre la Figure 52, le pic résulte d'un temps de séchage insuffisant de la colle. Ceci est illustré par la Figure 53 qui démontre clairement, à travers l'indice APB (Amplitude du Pic au Biaxial, voir § 3.2.4) la corrélation entre le pic à l'essai biaxial et le temps de séchage. Notons que les points de même couleur correspondent à des essais biaxiaux réalisés sur une même carotte à des temps de séchage différents.

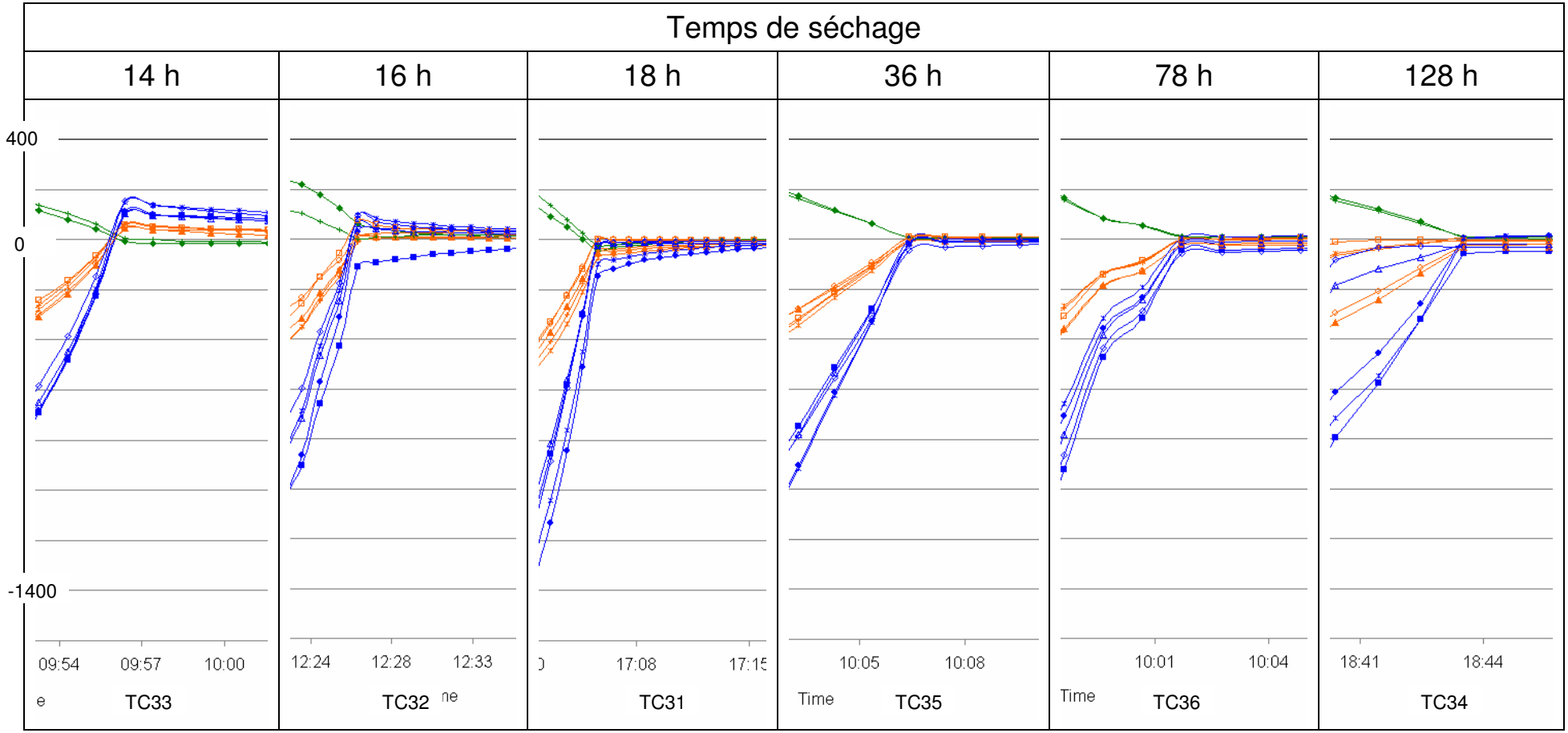


Figure 52 : Impact du temps de séchage de la colle sur la forme des courbes de réponse obtenues lors d'un essai biaxial

On peut toutefois remarquer que le pic à l'essai biaxial s'estompe plus vite avec l'augmentation du temps de séchage que le pic au surcarottage (voir Figure 51 pour comparaison). En effet, le pic à l'essai biaxial tend à disparaître dans les 24 h qui suivent la pose de la cellule alors que le pic au surcarottage persiste au moins jusqu'à 60 h après.

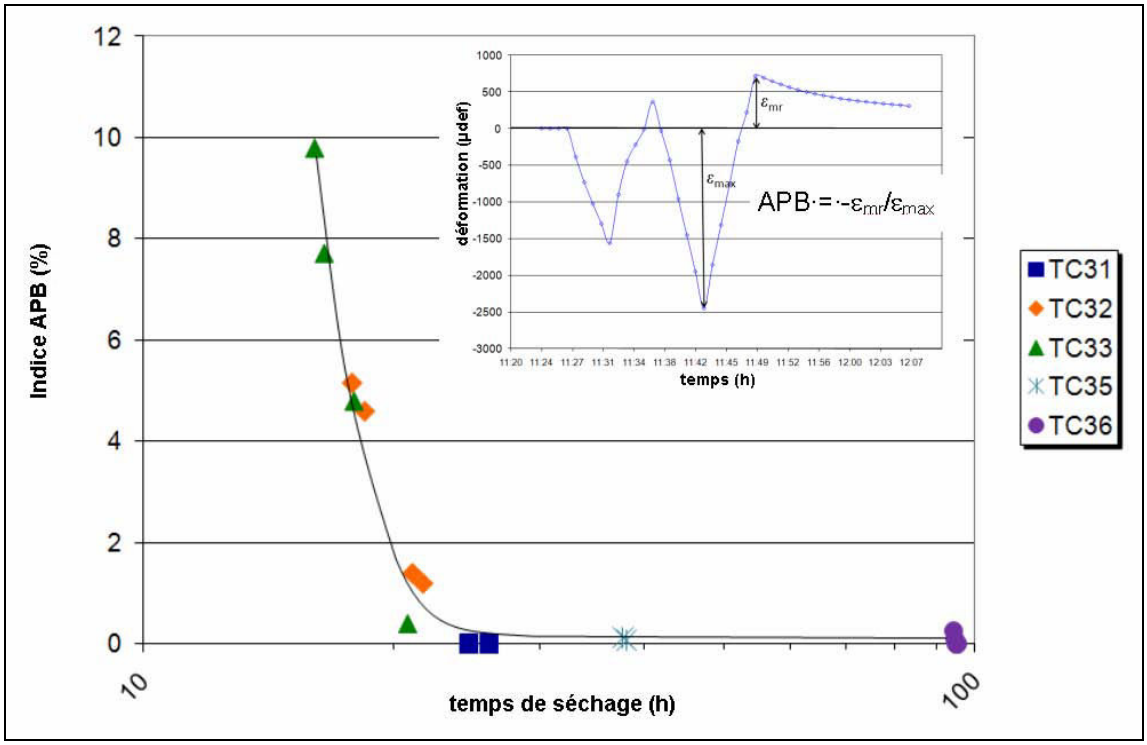


Figure 53 : Impact du temps de séchage sur l'APB « Amplitude du Pic au Biaxial ». Le temps de séchage est calculé à partir de la pose de la cellule et intègre donc la durée du surcarottage) [Lahaie et al., 2010].

Il existe donc clairement une corrélation entre le pic à l'essai biaxial et le temps de séchage de la colle. L'explication phénoménologique que nous entrevoyons aujourd'hui (mais qui reste à valider), est qu'il s'agirait d'une manifestation du comportement viscoélastique (ou visco-élastoplastique) de la colle [Lahaie, 2010]. En effet, l'analyse de l'essai de fluage réalisé sur la carotte creuse de l'essai TC33 à un temps de séchage d'environ 19 h montre qu'une déformation différée significative est observée à chaque palier de pression (Figure 54). Celle-ci persiste pendant un certain temps lorsque la carotte est totalement déchargée, générant ainsi un passage momentané des courbes dans le domaine des allongements, avant que les courbes ne reviennent à leur valeur initiale (d'où l'effet de « Pic »). On remarque également que, pour une pression constante appliquée, la vitesse de déformation diminue au cours du temps. En outre, cette vitesse est plus rapide lors du palier à 5 MPa que lors du palier à 8 MPa (réalisé après celui à 5 MPa).

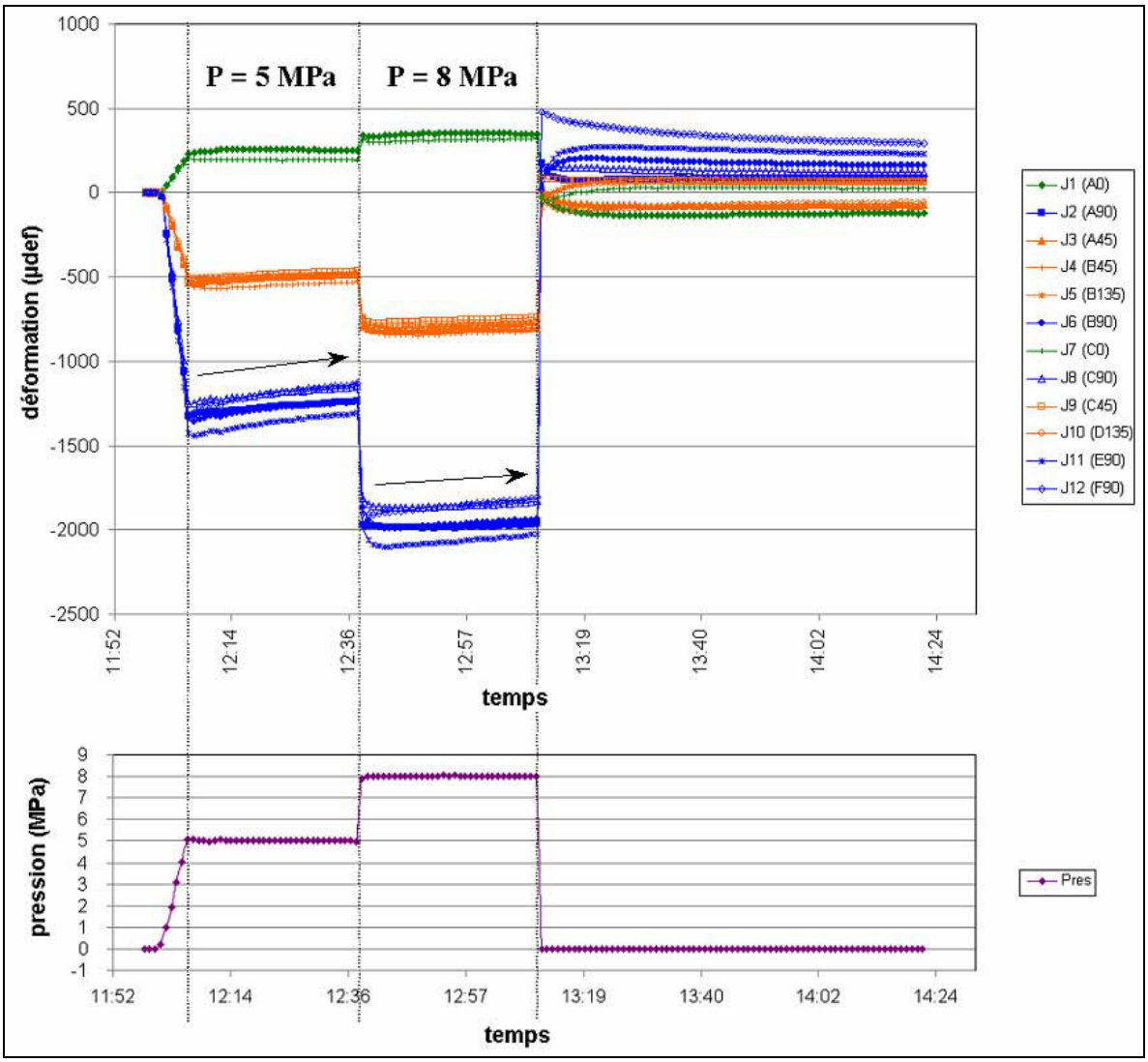


Figure 54 : Déformations enregistrées en fonction du temps lors d'un essai biaxial réalisé sur la carotte TC33 dans une cellule de Hoek-Franklin. Les paliers de pression à 5 et 8 MPa ont été maintenus durant quelques dizaines de minutes chacun avant que la pression ne soit totalement relâchée.

On peut regretter qu'il n'y ait pas eu d'essai de fluage réalisé à un temps de séchage plus important. Ceci aurait permis de vérifier si la vitesse de fluage diminuait avec le temps de séchage et d'associer clairement ce phénomène à la colle et non à l'argilite (voir § 3.3). Néanmoins l'essai de fluage réalisé sur la carotte TC33 a permis de mettre en lien le phénomène atypique « pic à l'essai biaxial » avec un éventuel comportement viscoélastique (ou viscoplastique) de la colle lorsque celle-ci n'est pas correctement polymérisée. Il serait donc intéressant d'explorer cette piste en développant une loi de comportement de la colle et des paramètres qui la caractérisent.

4.1.2.3 IMPACT DU TEMPS DE SECHAGE SUR LE « SAUT INITIAL DES DEFORMATIONS »

Un autre phénomène observé dans les essais de la campagne 2005-2006 et qui disparaît avec l'augmentation du temps de séchage est le saut initial des mesures lors de l'ouverture du circuit d'air (phénomène 1 sur la Figure 25 § 3). Ceci est illustré sur la Figure 56. La Figure 55 représente l'amplitude moyenne du saut pour

chaque famille de jauges, en fonction du temps de séchage. On constate clairement que l'amplitude du saut diminue, en valeur absolue, avec ce dernier.

Cette corrélation entre l'amplitude du saut et le temps de séchage nous permet de mieux en comprendre l'origine physique. En effet, nous avons vu en 2005-2006 que ce saut exprimait un raccourcissement axial de la cellule, que nous avions alors interprété comme résultant de la « poussée » exercée sur la cellule par l'air injecté (voir § 3.2.1) Il était cependant difficile de comprendre qu'une pression aussi faible (0,2 MPa, voir ANNEXE B) puisse générer des déformations d'une telle amplitude (jusqu'à 200$\mu\varepsilon$ sur certaines jauges). On sait désormais que cette amplitude trouve son explication dans le fait que la colle n'était pas totalement sèche à ce moment-là [Lahaie, 2010]. La pression de 0,2 MPa pouvait donc suffir pour générer de telles déformations puisque la colle était encore molle et la cellule n'était pas parfaitement couplée au massif.

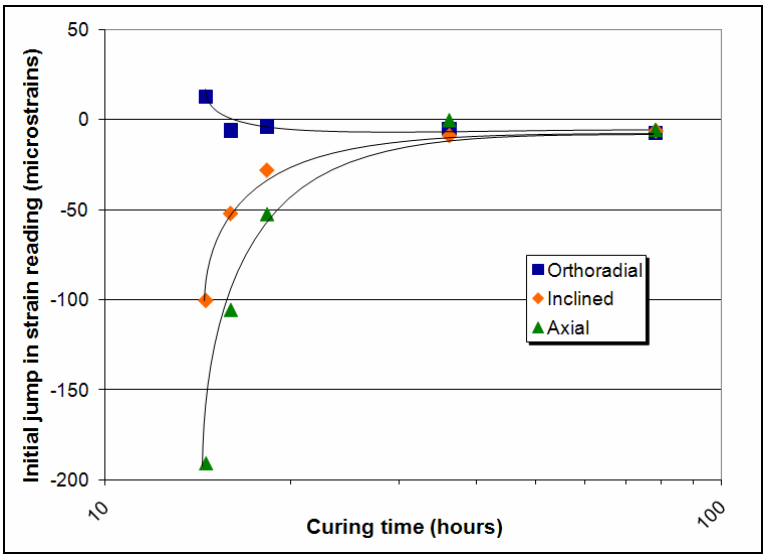


Figure 55 : Impact du temps de séchage sur le saut initial des déformations observé au début du surcarottage. Chaque point correspond à la moyenne des mesures d'une famille de jauges) [Lahaie et al., 2010].

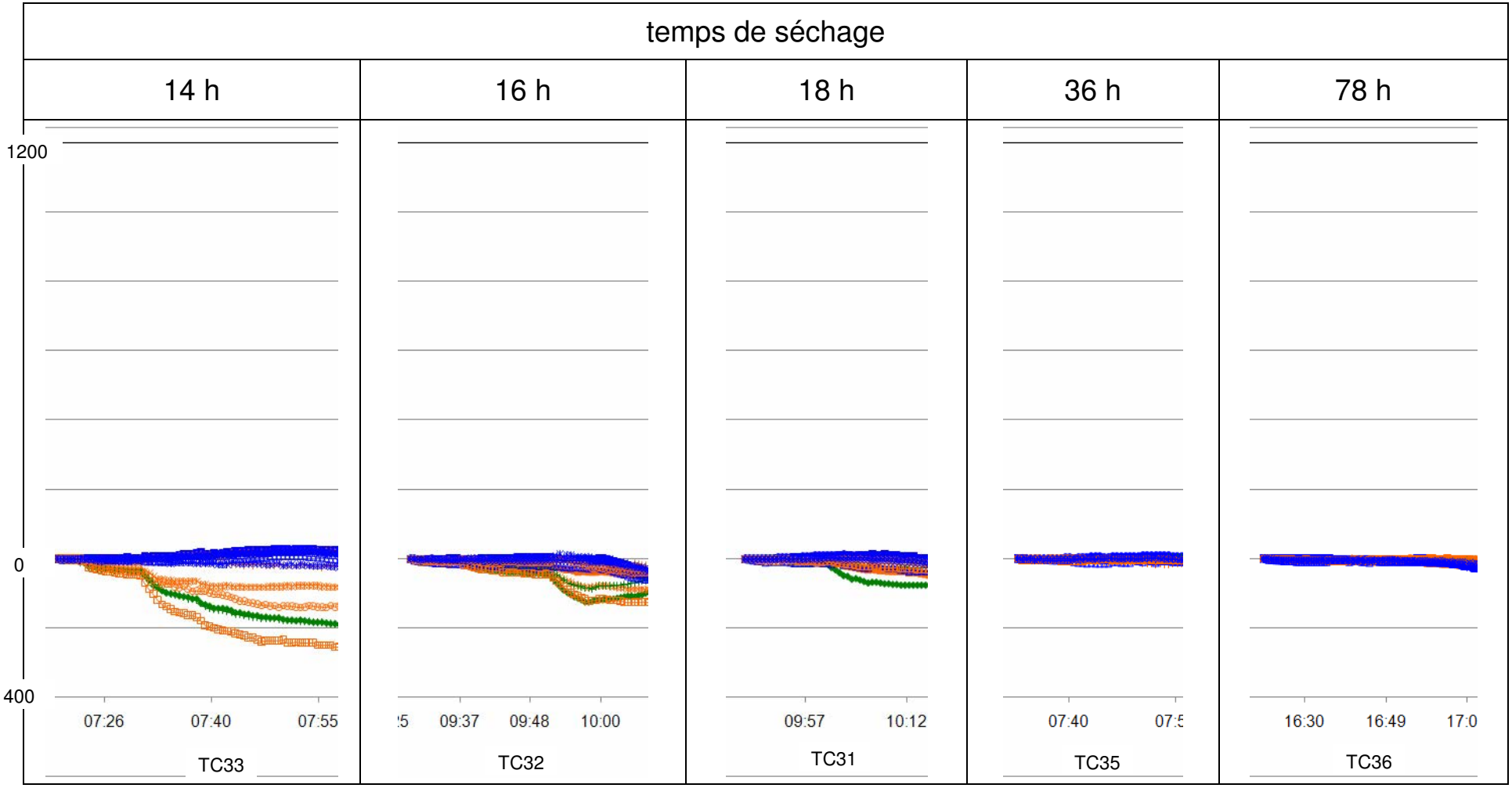


Figure 56 : Impact du temps de séchage sur le saut de mesure observé au début du surcarottage [Lahaie, 2010]

4.1.2.4 ANALYSE DES COURBES DE SECHAGE

Pour mieux comprendre le comportement de la colle durant sa polymérisation dans les conditions du site et en contact avec la roche, des premiers enseignements sur son état au moment du surcarottage peuvent être obtenus à partir de l'examen des courbes dites de « séchage », c'est-à-dire les courbes de déformations et de température enregistrées sur la cellule CSIRO entre la pose de la cellule et son surcarottage. Dans le cas présent, certaines cellules ont été laissées jusqu'à 5 jours dans le forage avant d'être surcarottées, donnant accès à des chroniques de séchage exceptionnellement longues.

Les courbes de séchage relatives à tous les essais sont présentées dans l'ANNEXE M. La Figure 57 présente les déformations moyennes par famille de jauges (orthoradiales, axiales et inclinées) pour tous les essais. Les courbes dans chaque groupe de jauges (orthoradiales, axiale et incliné) sont dispersées, mais leurs allures sont identiques au sein du même groupe (voir Figure 28). La Figure 58 présente la température mesurée sur la cellule CSIRO au cours du séchage, pour tous les essais. En effet, la polymérisation de la résine d'époxy est une réaction exothermique, elle s'accompagne d'une augmentation de la température du milieu ainsi qu'un dégagement de la chaleur.

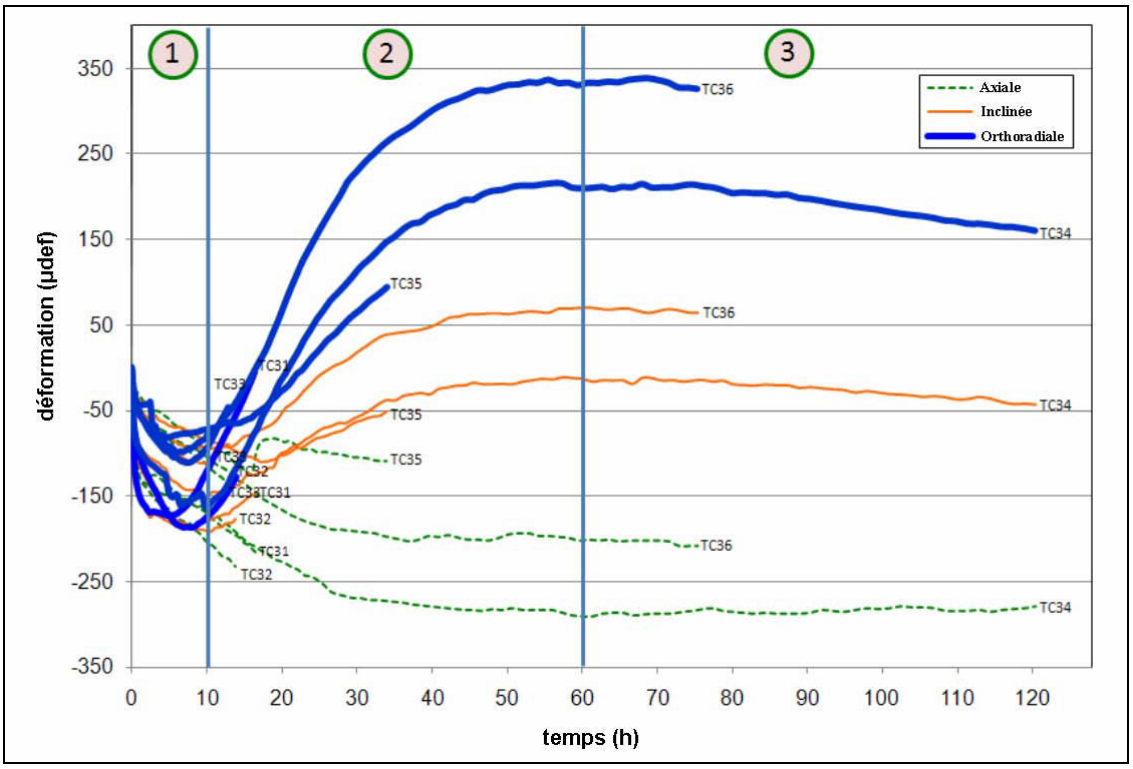


Figure 57 : Déformations moyennes enregistrées au cours de la phase séchage. Chaque courbe est une moyenne des 2 ou 5 courbes de déformations propres à une famille de jauges donnée (en bleu : jauges orthoradiales, en vert : jauges axiales, en orange : jauges à 45/135°) [Lahaie, 2010]

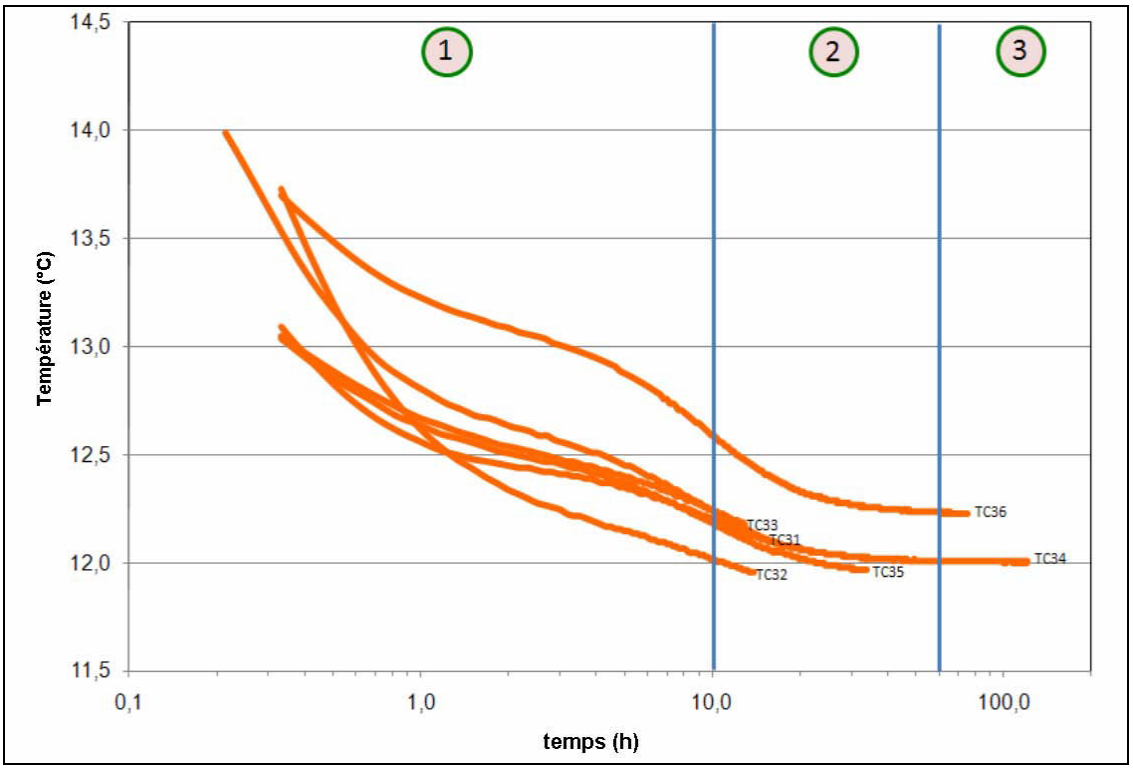


Figure 58 : Température enregistrée sur chaque cellule CSIRO au cours de la phase de séchage [Lahaie, 2010] (l'échelle des abscisses est logarithmique). La température de l'air et du massif au moment des essais est de 12°C.

On remarque une évolution systématique des courbes de séchage, qui peut se décomposer en 3 phases (numérotées 1, 2, 3 sur Figure 57) :

- Une 1ère phase (de 0 à 10 h environ), pendant laquelle la température varie rapidement et les déformations de la cellule suivent globalement cette variation. Dans le cas présent, la température démarre à une valeur située entre 14 et 16°C (effet de la réaction exothermique de polymérisation de la colle) puis diminue progressivement pour se stabiliser à la température du terrain (~12°C). Les déformations des jauges durant cette phase, indiquent toutes des raccourcissements, correspondant bien à un phénomène de contraction du corps de la cellule sous l'effet de la diminution de température. On note d'ailleurs que l'ordre de grandeur des déformations enregistrées au cours de cette phase (~60-80$\mu\varepsilon$/°C) est cohérent avec le coefficient de dilatation thermique de la résine époxy constituant le corps de la cellule (~70$\mu\varepsilon$/°C) ;
- Une 2ème phase (de 10 à 60 h environ) durant laquelle les courbes se différencient par familles de jauges de même orientation : les jauges orthoradiales (en bleu) indiquent un allongement, les jauges axiales (en vert) un racourcissement et les jauges obliques (en orange) un comportement intermédiaire entre les jauges axiales et les jauges orthoradiales. Cette évolution exprime une élongation de la cellule.

- Une 3ème phase (après 60 h) durant laquelle on observe une stabilisation des courbes de mesure. On peut penser que cette stabilisation marque la fin du rétreint de la colle et a priori, la fin du processus de polymérisation. Cette hypothèse est corroborée par l'évolution de la température (la réaction de polymérisation étant exothermique) qui se stabilise également complètement après 40-60h de séchage (Figure 58).

Il ressort de cette analyse que si la stabilisation des mesures (de déformation et de température) est effectivement un indicateur pertinent de la fin de la polymérisation de la colle, alors les courbes font apparaître que celle-ci n'est atteinte qu'environ 60 h (soit 2,5 jours) après la pose de la cellule [Lahaie, 2010], ce qui n'est pas en accord avec les préconisations du fournisseur qui indique un temps de séchage de 16 heures. En effet pour une telle durée, comme nous pouvons le constater sur la Figure 57 en début de la phase 2, les courbes de déformation évoluent encore. Ceci indique que la colle n'est pas encore polymérisée et que la réalisation des essais de surcarottage fausse les résultats. Il faudra donc attendre minimum 60 heures (début de la phase 3, Figure 57) pour observer la stabilisation des déformations sur un plateau et espérer des essais de surcarottage affranchis de l'effet du temps de séchage.

4.1.3 IMPACT DES AUTRES PARAMETRES EXPERIMENTAUX

En dehors de l'effet du temps de séchage de la colle, l'effet de plusieurs autres paramètres expérimentaux a été étudié au cours de cette campagne. L'impact de chacun d'entre eux sur les courbes de mesure obtenues est discuté ci-après.

4.1.3.1 IMPACT DE LA VITESSE DE ROTATION DU CAROTTIER

Un phénomène marquant de la campagne de 2005-2006 était l'échauffement de la cellule se produisant au cours du surcarottage : augmentation de la température de 6,5°C en moyenne et pouvant aller jusqu'à une dizaine de degrés pour certains essais. Cet échauffement provoquait une importante dérive des mesures (phénomène 3 sur la Figure 25 § 3). Un des objectifs de la nouvelle campagne était de définir un protocole permettant d'éliminer ce phénomène. Pour cela, plusieurs pistes ont été testées : réduction de la vitesse de rotation du carottier, foration à l'huile (l'huile permettant une meilleure évacuation de la chaleur que l'air) et foration à l'azote.

Il s'est avéré très vite que le fait de forer avec une vitesse de rotation très faible (16-20 tr/min au lieu des 50-70 tr/min lors de la campagne de 2005-2006) permettait d'éliminer totalement le problème d'échauffement (et donc de dérive thermique) connu en 2005-2006. La Figure 59 montre l'évolution de la température de la cellule pour les essais TC11 et TC12, pour lesquels la vitesse de rotation était respectivement de 16 et 70 tr/min. Dans le premier cas, la température est stable au passage du carottier, voire diminue, l'air injecté étant plus froid (10,5°C) que la température du massif (12°C). Dans le deuxième cas, malgré un air injecté encore plus froid (9°C), la température de la cellule augmente au passage du carottier. Cette augmentation était de 1,4°C lorsque l'acquisition a dû être interrompue (dans le but d'effectuer l'essai biaxial) mais il est probable que celle-ci aurait atteint plusieurs degrés.

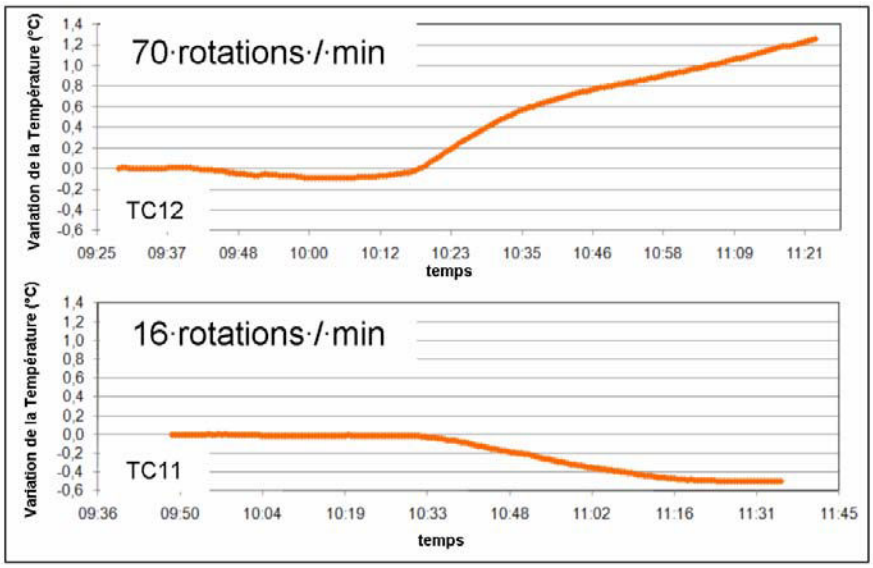


Figure 59 : Impact de la vitesse de rotation sur l'échauffement de la cellule lors du surcarottage (essais TC11 et TC12) [Lahaie, 2010]

Comme la réduction de la vitesse de rotation a permis d'éliminer le problème de dérive thermique, l'essai à l'azote, qui avait été prévu dans ce but, n'a pas été réalisé. En revanche, un essai à l'huile a été réalisé (voir ci-après).

4.1.3.2 IMPACT DU FLUIDE DE FORATION

Un essai à l'huile (essai TC36) a été réalisé dans un double objectif :

1. tester l'efficacité de l'huile comme moyen de réduction de l'échauffement du carottier et donc la dérive thermique qui a affecté les mesures en 2005-2006 ;
2. tester si le fait de limiter la désaturation de la carotte (l'huile formant un film protecteur sur la carotte) pouvait avoir un impact sur l'observation (ou non) des pics de déformation au surcarottage et à l'essai biaxial.

Cet essai a montré que l'utilisation de l'huile n'apportait pas d'avantage particulier par rapport à ces deux objectifs. En effet, l'huile étant utilisée en circuit fermé (elle était récupérée en sortie du forage), sa température a augmenté au cours du surcarottage (+3,5°C) ce qui a eu l'effet inverse de celui escompté (refroidir la carotte). L'utilisation d'huile à l'avenir nécessiterait de la refroidir via un circuit réfrigérant avant de la réinjecter dans le forage, ce qui compliquerait considérablement le protocole de mesure.

En ce qui concerne le deuxième objectif, le fait de forer à l'huile (et donc de limiter la désaturation de la carotte) n'a eu aucun impact perceptible sur la présence des pics de déformation. Au contraire, l'essai réalisé à l'huile a été celui qui a montré le plus faible pic au surcarottage, mais, comme discuté au § 4.1.2.1, c'est le temps de séchage de la colle (et non un éventuel problème de désaturation de la carotte) qui en est à l'origine [Lahaie, 2010].

On note également que le fluide de foration n'a pas d'impact sur l'amplitude moyenne des valeurs plateau des déformations et donc sur la détermination des contraintes. L'air, qui est parfois suspecté d'induire une modification des propriétés de roches du type des argilites en paroi du trou et par conséquent des erreurs lors

de la détermination des contraintes, semble donc tout aussi pertinent pour la foration que l'huile.

Enfin, on peut remarquer que l'augmentation de la température, qui avait été un temps soupçonnée d'être à l'origine du pic par le biais d'un couplage thermomécanique, n'a eu aucune incidence sur celui-ci. L'essai TC36 est en effet celui qui a montré le moins de pic au surcarottage, alors que c'est celui où la température a augmenté le plus (+3,5°C).

4.2 ESSAIS COMPLEMENTAIRES EN LABORATOIRE SUR LA COLLE EPOXY

4.2.1 ETUDE DU TEMPS DE POLYMERISATION DE LA COLLE PAR CALORIMETRIE DIFFERENTIELLE

4.2.1.1 OBJECTIF

L'objectif de ce travail a été de vérifier, par des essais spécifiques en laboratoire, que le temps de polymérisation nécessaire pour la colle 10-18°C à une température de 12°C (celle de Tournemire) est bien supérieur à celui recommandé par le fournisseur (16 heures).

Pour déterminer le temps de polymérisation complète d'une résine époxy (temps de séchage de la colle) à différentes températures, nous avons utilisé la technique de Calorimétrie Différentielle, connue sous le nom de DSC (Differential Scanning Calorimeter) (Figure 60). Les essais ont été réalisés en collaboration avec le Laboratoire de Physique des Matériaux (LPM), section « Polymères, Composites et Verres » de l'Institut Jean Lamour de Nancy. Deux campagnes ont été programmées, une première campagne du 03/02/2010 au 19/02/2010 et une deuxième campagne du 10/03/2010 au 12/03/2010.

Figure 60 : Déroulement de l'essai de calorimétrie différentielle (DSC)

4.2.1.2 DEMARCHE

Nous avons étudié en premier lieu la variation du temps de séchage de la colle (temps de polymérisation de la résine époxy) avec la température et déterminé ainsi la durée nécessaire pour le séchage de la colle dans la gamme de température de 16°C à 18°C recommandée par le fournisseur. En second lieu nous avons déterminé, à partir de la courbe de variation du temps de séchage de la colle en fonction de la température, le temps de séchage nécessaire pour ce type de colle dans les conditions du site de Tournemire lors de la campagne de 2008 (T = 12°C).

4.2.1.3 PROTOCOLE ET INTERPRETATION DE L'ESSAI

L'essai DSC consiste à mesurer la chaleur dégagée lors de la réaction de polymérisation d'une résine époxy. Lorsque la température est maintenue constante, l'essai est appelé « essai isotherme » et lorsque la température est variable au cours de l'expérience, l'essai est appelé « essai scan ».

Le protocole de l'essai DSC consiste à placer une capsule contenant quelques milligrammes de la colle testée dans une chambre adiabatique (Figure 60). On ajoute par la suite de l'azote liquide qui permet de bloquer la polymérisation de la colle avant le déclenchement de l'essai en la maintenant à une température de -40°C.

Lors d'un essai scan, on impose à l'échantillon de colle une température variant de -40°C à 300°C avec une vitesse de 10°C/min. On mesure alors en quelques minutes l'enthalpie massique de référence ΔH_R (J/g), qui correspond à la chaleur totale dégagée lors de la polymérisation complète de la colle. On trace pour ce faire la courbe de variation du flux de chaleur dégagé en fonction de la température imposée (ANNEXE N). Celle-ci est caractérisée par un pic atteint au milieu de l'essai (à T ~ 100°C sur la courbe donnée en exemple) suivi d'un palier qui marque l'arrêt de dégagement de la chaleur traduisant la fin de la polymérisation (Figure 61).

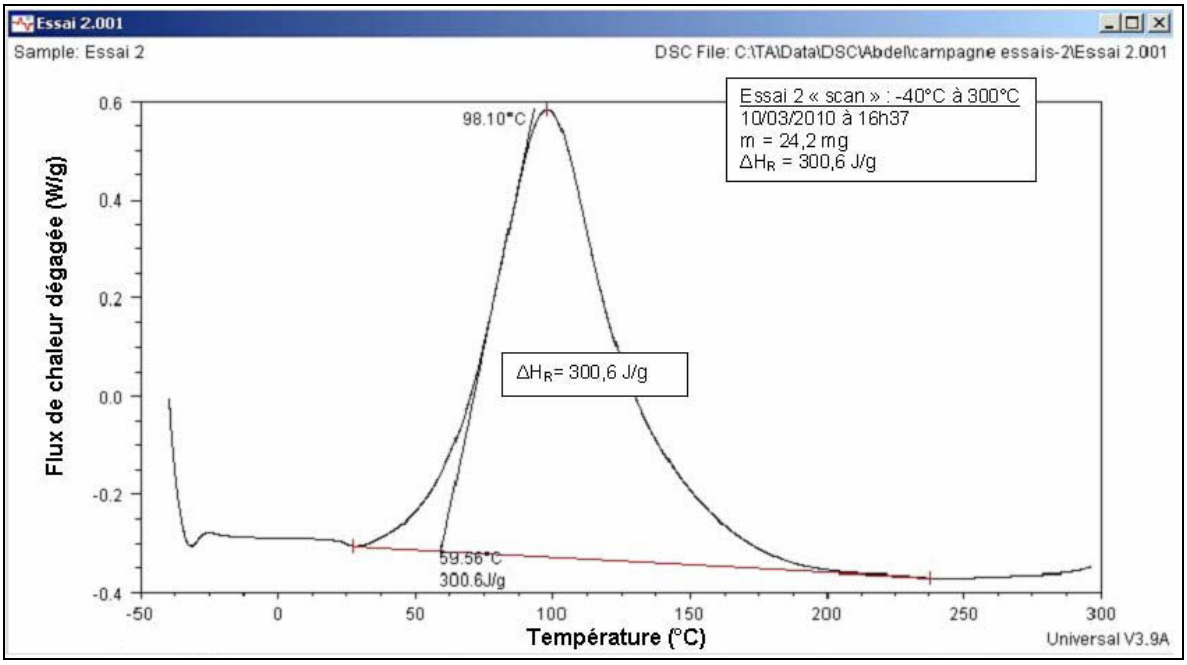


Figure 61 : Essai « scan » : de -40° C à 300° C réalisé à partir de l'essai DSC, mesure de l'enthalpie ΔH_R à partir du logiciel associé à la machine DSC

Lors d'un essai isotherme à la température T_{iso} donnée, la température est d'abord augmentée au début de l'essai de -40°C à T_{iso} avec une vitesse rapide de 60°C/mn, puis maintenue à la valeur T_{iso}. Cet essai peut durer de quelques heures à quelques jours, selon la température choisie. Il permet de mesurer à cette température l'enthalpie massique isotherme ΔH_T (J/g) qui représente la chaleur totale dégagée lors de la polymérisation complète de la colle. On trace pour cela la courbe de variation du flux de chaleur dégagé en fonction du temps (ANNEXE O). Cette courbe présente un pic atteint tout au début de l'essai, suivi d'une décroissance du flux avec le temps (Figure 62). Tout comme dans l'essai scan, la fin de la polymérisation de la colle lors de l'essai isotherme est marquée par un palier de la courbe qui indique l'arrêt de dégagement de la chaleur.

De manière conventionnelle, nous avons considéré que le temps de séchage isotherme est le temps qui permet d'obtenir une enthalpie isotherme égale à 80% de l'enthalpie de référence. Nous avons donc réalisé un essai scan avant chaque essai isotherme.

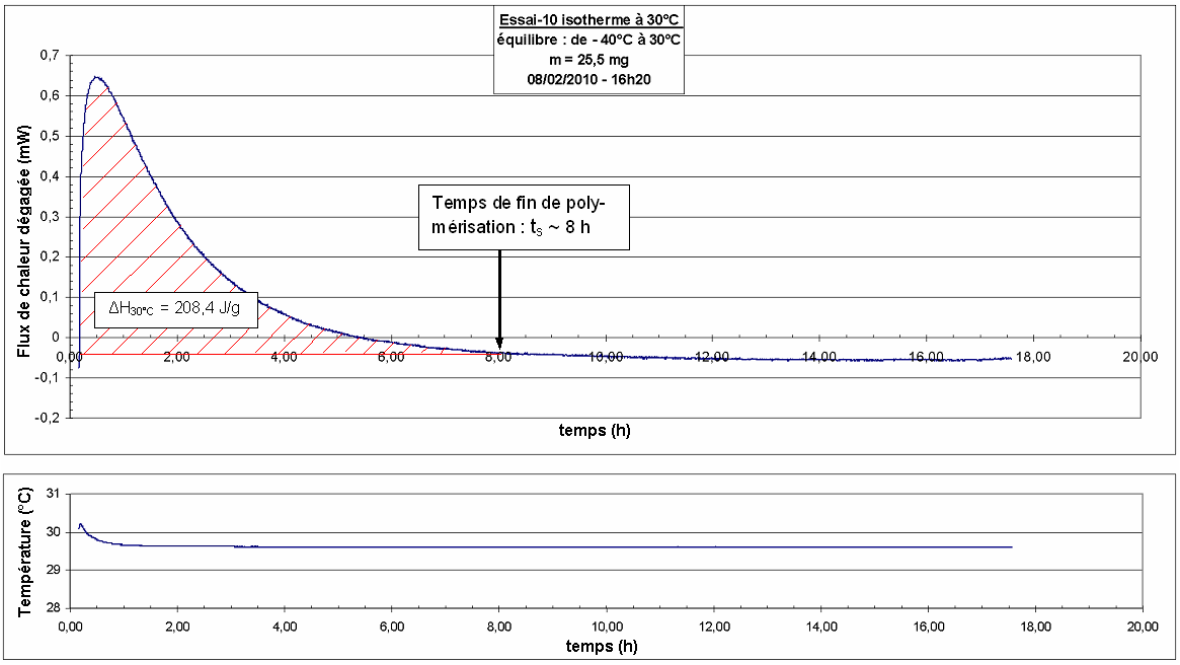


Figure 62 : Essai DSC isotherme et calcul de l'enthalpie ΔH_T (aire sous la courbe de flux de chaleur).

4.2.1.4 DEROULEMENT DES ESSAIS ET RESULTATS

Les essais ont été réalisés en deux campagnes séparées. Le protocole de la première campagne était simple et nous avons réalisé des essais isothermes regroupés et séparés des essais scan pour les températures suivantes : 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C et 80°C. Les résultats de cette première campagne nous ont permis de développer un protocole plus performant pour la deuxième campagne.

Lors de la 2ème campagne, nous avons réalisé des essais isothermes précédés à chaque fois d'un essai scan, afin de déterminer avec plus de précision le temps de séchage de la colle pour les températures suivantes : 16,5°C, 20°C. Pour des raisons pratiques, nous n'avons pas pu effectuer d'essais à une température inférieure à 16°C car nous ne disposions pas d'un dispositif de refroidissement permettant de maintenir la température choisie suffisamment longtemps.

Les courbes des essais scan sont regroupées en ANNEXE N et les courbes des essais isothermes sont regroupées en ANNEXE O.

À partir de ces essais, nous avons tracé le temps de séchage en fonction de la température (Figure 63).

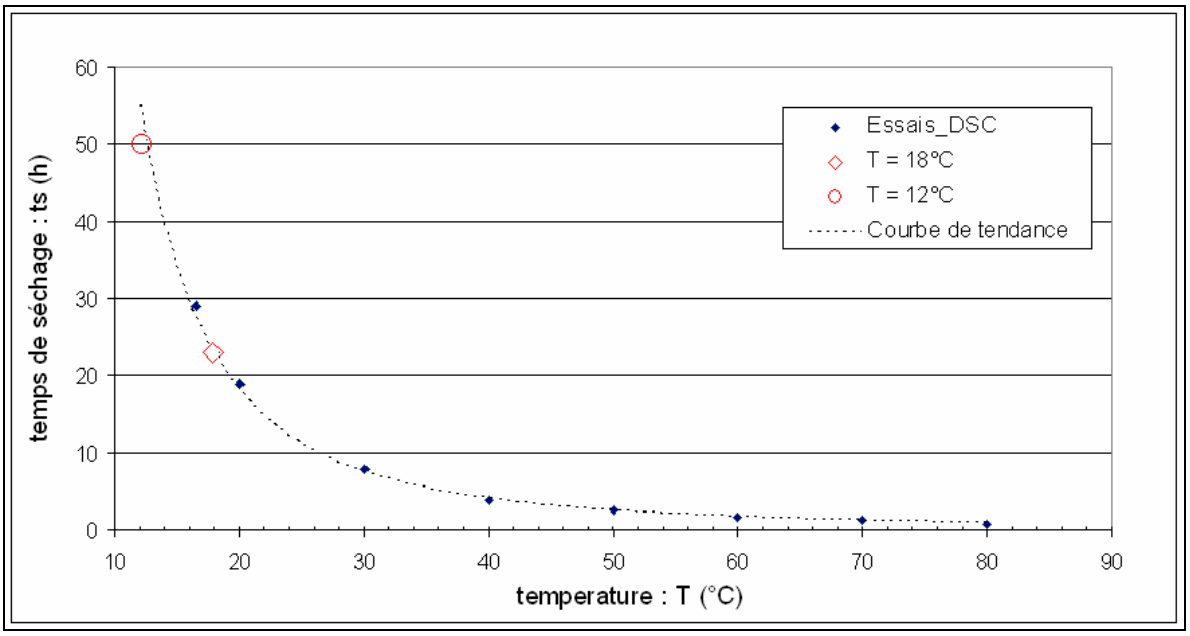


Figure 63 : Variation du temps de séchage en fonction de la température. Le temps de séchage à des températures de 18°C et 12°C ont été déterminé respectivement par interpolation et extrapolation de la courbe de tendance.

L'essai à 16,5°C entre dans la gamme 10-18°C de la colle testée. A cette température, le temps de séchage de la colle est de 29 heures. D'autre part, l'extrapolation de la courbe de tendance fournit une estimation de 50 heures pour le temps de séchage à une température de 12°C, (température du terrain sur le site de Tournemire lors de la campagne de 2008). Ces valeurs sont largement supérieures aux préconisations du fournisseur (16 heures).

4.2.2 ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA COLLE EN FONCTION DU TEMPS DE SECHAGE PAR ESSAIS « SHORE A »

4.2.2.1 OBJECTIF

L'objectif de ce travail était de déterminer le « temps de séchage mécanique » de la colle utilisée, c'est-à-dire la durée nécessaire pour qu'elle atteigne ses caractéristiques mécaniques optimales et de le comparer au « temps de séchage chimique » déterminé au § 4.2.1. Nous souhaitions ainsi voir si le temps de séchage préconisé par le fournisseur était suffisant ou non pour que la colle atteigne ses qualités mécaniques optimales dans les conditions du site de Tournemire.

Pour déterminer le temps de séchage mécanique de la colle nous avons utilisé un essai de dureté connu sous le nom d'essai « Shore A ». Une campagne d'essai a donc été réalisée en collaboration avec le laboratoire LMP de l'Institut Jean Lamour de Nancy du 10/03/2010 au 12/03/2010.

4.2.2.2 PROTOCOLE ET INTERPRETATION DE L'ESSAI

L'essai « Shore A » est un essai de micro-pénétration. Il consiste à enfoncer sous une force constante une aiguille dans un échantillon précédemment conservé à une température constante (Figure 64 et Figure 65). L'enfoncement total de l'aiguille dans l'échantillon à l'essai « Shore A » indique une polymérisation incomplète de la colle (colle encore liquide). A l'inverse, une absence d'enfoncement de l'aiguille à l'essai « Shore A » traduit la polymérisation complète de la colle (colle durcie). Or l'état de la colle dépend fortement de la durée de chaque essai puisque la polymérisation se poursuit durant celui-ci. La valeur lue sur le cadran du « Shore A » indiquant le niveau de pénétration de l'aiguille dépend donc de la durée de l'essai. C'est pourquoi nous nous sommes fixés une durée d'une demi-heure en moyenne pour chaque essai.

Figure 64 : Déroulement de l'essai de pénétration « Shore A »

Figure 65 : Plaques d'aluminium contenant les échantillons de colle testé lors des essais « Shore A »

Les essais « Shore A » ont été réalisés pour différentes durées de séchage sur des échantillons conservés à une température constante de 20°C. À partir de ces essais, nous avons pu tracer la courbe de variation de l'enfoncement de l'aiguille à partir de la lecture de l'afficheur du « Shore A » en fonction du temps de séchage (Figure 64). La valeur « 100 » correspond sur la Figure 66 à l'enfoncement total de l'aiguille total de l'aiguille dans l'échantillon et indique donc une colle totalement polymérisée. La valeur « 0 » correspond sur la Figure 66 à un enfoncement nul de l'aiguille dans l'échantillon et indique alors une colle totalement « molle ». Nous rappelons que chaque essai a duré une demi-heure en moyenne. Cependant, pour s'assurer de la qualité des résultats des derniers essais (significatifs pour la détermination exacte du temps de séchage de la colle à l'essai « Shore A »), la durée de l'essai réalisé après 19 heures de temps de séchage a été d'une heure (Figure 66). L'essai réalisé après 20 heures de temps de séchage a duré 3 heures et l'essai réalisé après 24 heures de temps de séchage a duré 12 heures.

Tant que la colle n'est pas totalement polymérisée, l'aiguille laisse dans les échantillons une empreinte qui ne se résorbe pas, ce qui met en évidence une déformation permanente de la colle (comportement non purement élastique). À partir d'un certain temps de séchage (19 heures dans le cadre de notre expérience, voir Figure 66) l'aiguille ne s'enfonce presque plus dans l'échantillon de colle et n'y laisse pas de marque définitive, ce qui traduit un comportement réversible. D'autre part, la taille de l'empreinte dans l'échantillon diminue en fonction du temps de séchage, ce qui traduit un enfoncement de plus en plus limité de l'aiguille.

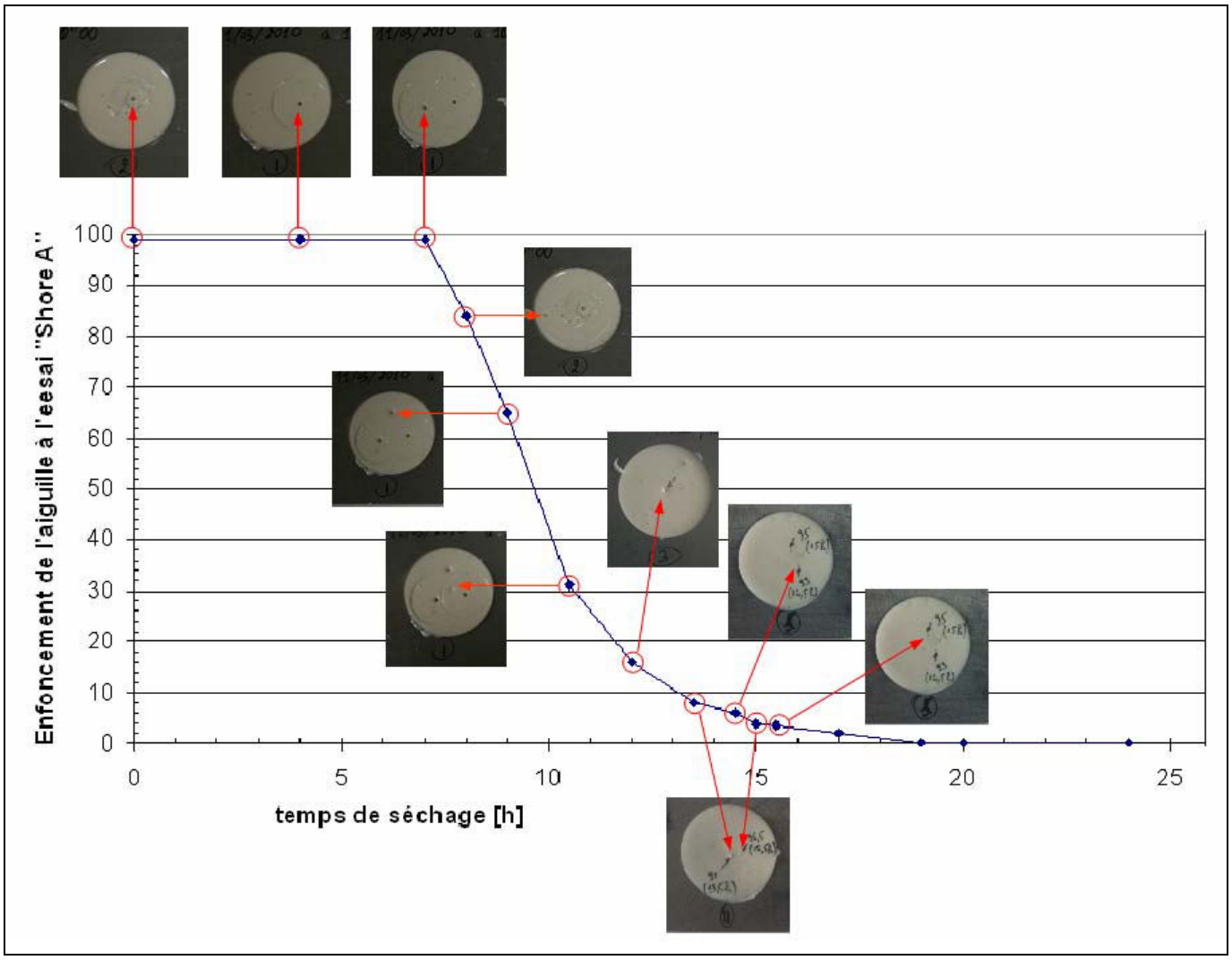


Figure 66 : Courbe de variation de l'enfoncement de l'aiguille dans l'échantillon de colle lors de l'essai « Shore A » (gradué de 0 à 100 : la valeur 0 pour un polymère « mou » et la valeur 100 pour un polymère « dur ») en fonction du temps de séchage, pour une température constante T = 20°C.
Les photographies montrent la trace de l'aiguille lors de chaque essai.

4.2.2.3 RESULTATS

L'essai « Shore A » permet d'estimer à 19 heures environ le temps de séchage mécanique de la colle [Brown, 1996] à une température de 20°C (Figure 66). Comme le montre la Figure 67, le temps de séchage mécanique déterminé à cette température est en bon accord avec le temps de séchage chimique déterminé par l'essai DSC (voir § 4.2.1).

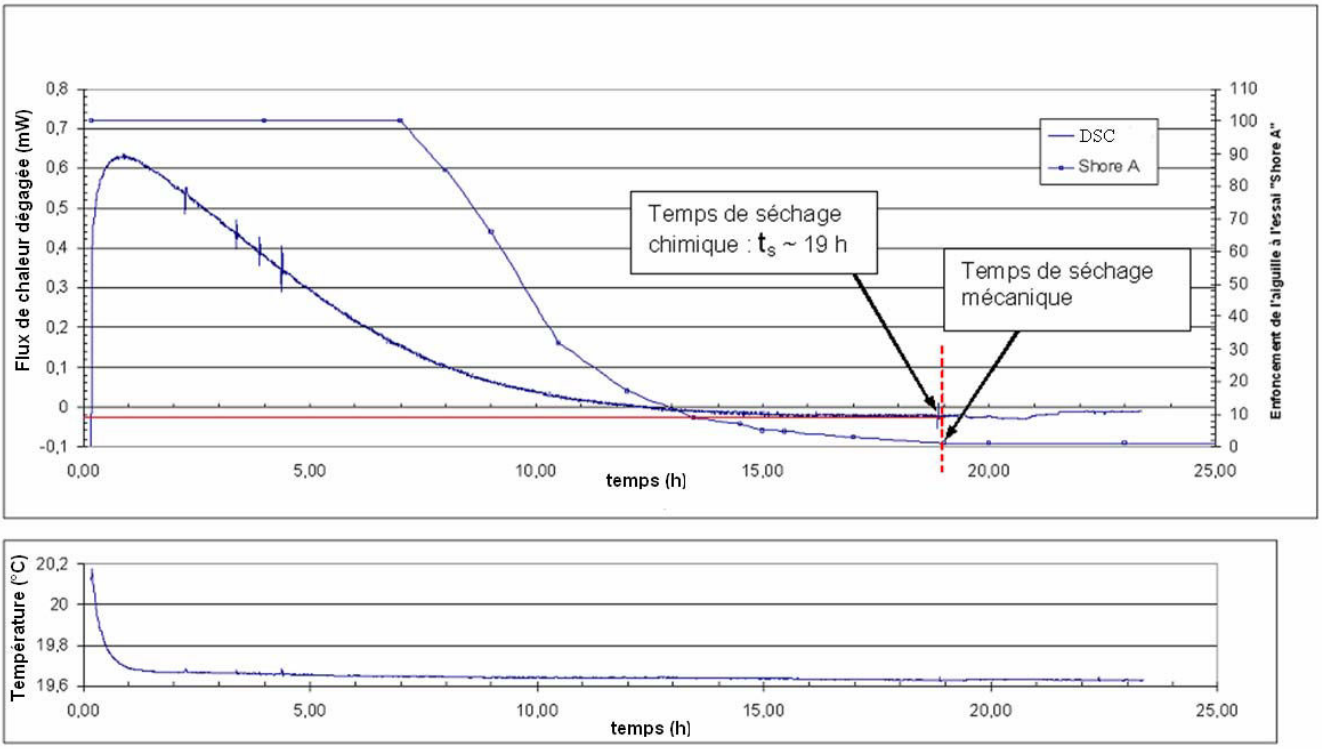


Figure 67 : Corrélation entre le temps de séchage chimique déterminé à partir de l'essai « DSC » et du temps de séchage mécanique approché à partir de l'essai « Shore A », pour une température T = 20°C

Nous concluons de cette étude que, dans le cas des essais réalisés sur le site Tournemire à une température T = 12°C, la durée de séchage de 16 heures préconisée par le fournisseur est largement insuffisante pour que la colle atteigne ses qualités mécaniques optimales. D'après les expériences que nous avons menées (essais DSC et Shore A) et la bonne correspondance obtenues entre le temps de séchage chimique et le temps de séchage mécanique, il paraît nécessaire de respecter au minimum 50 heures de temps de séchage dans le cadre du site de Tournemire (T = 12°C).

Cependant le protocole adopté lors de cette campagne est imparfait puisqu'on ne mesure pas la valeur initiale au début de l'essai « Shore A ». Cette valeur, pouvant varier entre 90 et 100, rend les résultats imprécis.

Une nouvelle campagne d'essais « Shore A » a été réalisée récemment au sein de l'INERIS en collaboration avec le laboratoire LPM de l'institut Jean Lamour. Durant cette campagne un nouveau protocole a été mis en place permettant, non seulement de la prise en compte de la valeur initiale au « Shore A », mais aussi de prendre des mesures tous les 30 secondes durant les cinq premières minutes. Ces essais ont permis donc de mesurer la vitesse de l'enfoncement de l'aiguille dans l'échantillon de colle à différents états de séchage et de déterminer avec plus d'exactitude le temps de séchage mécanique pour les deux températures 20°C et 12°C (température du terrain sur le site de Tournemire lors de la campagne de 2008). Le temps de séchage mécanique de la colle déterminé par cette campagne est d'environ 72 heures à une température de 12°C et de l'ordre de 48 heures à une température de 20°C.

4.2.3 ESSAIS BIAXIAUX SUR CAROTTES CREUSES EN CIMENT

4.2.3.1 OBJECTIF

L'intérêt de ce travail était de vérifier s'il est possible de reproduire le pic à l'essai biaxial sur un matériau simple (élastique, homogène et isotrope) et si on peut observer dans ces conditions l'atténuation du pic et sa disparition totale avec l'augmentation du temps de séchage. L'objectif était donc de s'assurer que le pic est bien corrélé seulement à la colle, sans qu'intervienne le comportement différé de l'argilite de Tournemire. Il est intéressant aussi de s'assurer définitivement que l'endommagement (lors du forage du trou Ex ou de la saignée de surcarottage) et la désaturation (lors de l'injection de l'air au cours du surcarottage) ne sont pas responsable du pic à l'essai biaxial. En effet les carottes creuses testées sont toutes moulées. Un deuxième objectif de cette campagne était de comparer les caractéristiques élastiques déterminées par deux types d'essais (essai biaxial et essai uniaxial-triaxial) réalisés sur un matériau non endommagé a priori simple (homogène et isotrope). Cependant les résultats de cette étude seront présentés plus loin, dans le § 5.4.3.

Une campagne d'essais biaxiaux sur carottes creuses en ciment a donc été programmée du 01/06/2010 au 04/06/2010.

4.2.3.2 PROTOCOLE

Nous avons moulé deux carottes creuses en ciment (Figure 68) dont les dimensions sont identiques aux carottes obtenues lors de la campagne de surcarottage sur le site de Tournemire en 2008. Le coffrage des carottes creuses a été fabriqué spécifiquement à cette occasion dans l'atelier mécanique de l'Ecole des Mines de Nancy. Nous avons utilisé un mélange de ciment à prise rapide « Mortier à prise rapide » de marque « Décia » avec une concentration d'eau de 0,16 l/kg et une prise qui débute en 10 mm à 20°C. Nous avons attendu par la suite plus de 28 jours de séchage pour que le ciment atteigne l'optimum de ses caractéristiques mécaniques.

Les dimensions de la carotte sont les suivantes :

- Diamètre intérieur : ϕ_{int} = 38,25 ± 0,25 mm
- Diamètre extérieur : ϕ_{ext} = 121,5 ± 0,5 mm
- Longueur de la carotte : l = 500 mm

Figure 68 : Fabrication des carottes creuses en ciment et déroulement des essais biaxiaux.

Pour la réalisation des essais biaxiaux, nous avons placé une carotte creuse en ciment dans la cellule de Hoek-Franklin et nous avons collé sur la paroi interne de la carotte une cellule de mesure de déformations de type CSIRO Hi12 (voir Figure 68) en utilisant une résine d'époxy de type 4-10°C.

Nous avons réalisé des essais biaxiaux à différents temps de séchage : 8,5 h, 11 h, 15 h, 20,5 h, 34 h, 58 h et 228 h (Figure 69 et ANNEXE P).

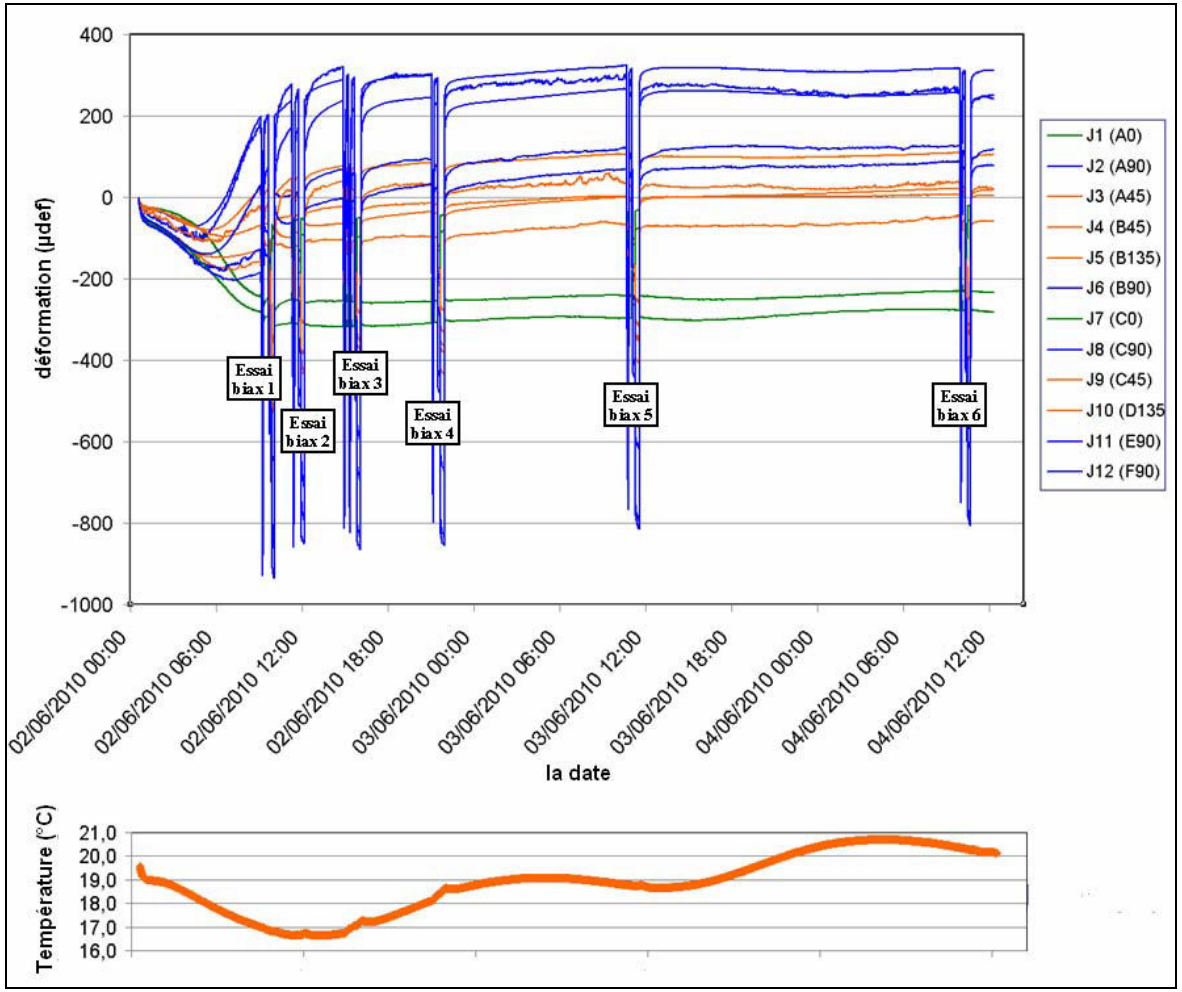


Figure 69 : Evolution des courbes des déformations en fonction du temps durant le séchage de la colle : stabilisation des déformations sur un plateau.

4.2.3.3 INTERPRETATION DES ESSAIS

Lors du premier essai réalisé au bout de 8,5 h de temps de séchage, un pic peut être observé en fin de décharge (Figure 70). Au cours des essais suivants, correspondants à un temps de séchage plus long, ce pic diminue progressivement jusqu'à disparaître totalement à partir de l'essai 5 (temps de séchage de 34 h). Ceci confirme donc le rôle de la colle dans le phénomène de pic.

On note toutefois qu'aucun essai n'a permis de reproduire un pic avec l'amplitude observée lors de la campagne 2005-2006 à Tournemire (Figure 26 § 3). Ceci s'explique par le fait que nous avons utilisé lors de ces essais une colle 4-10°C à la place d'une colle 10-18°C (pour des raisons d'approvisionnement en colle), ce qui a conduit à une prise plus rapide de la colle par rapport à ce que nous avions anticipé. Le premier essai a ainsi été réalisé après un temps de séchage déjà trop grand pour que l'amplitude maximale du pic puisse être observée.

La détermination des caractéristiques élastiques des carottes en ciment sera étudiée plus loin, dans le § 5.4.3

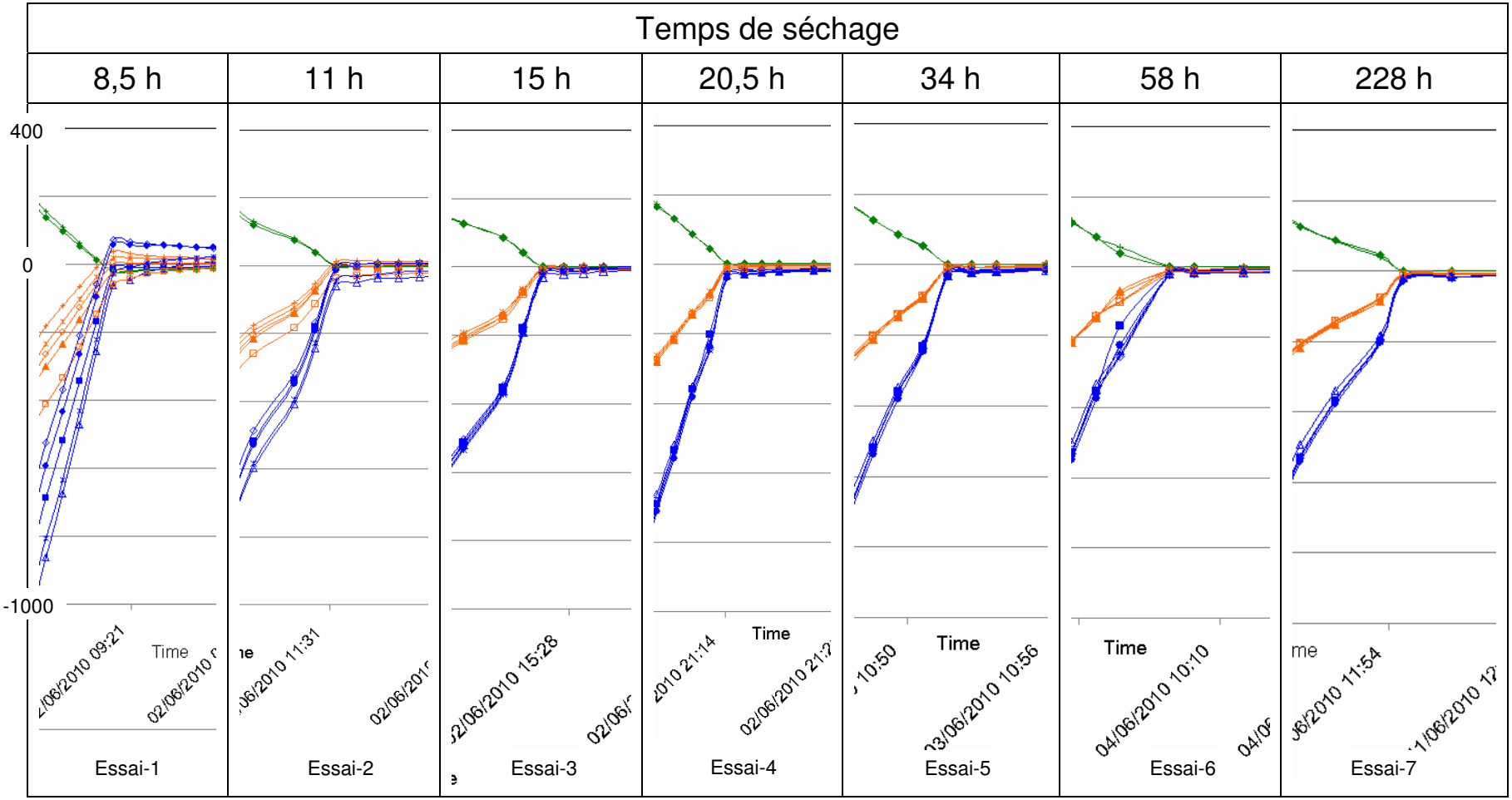


Figure 70 : Impact du temps de séchage sur le pic à l'essai biaxial lors des essais sur carottes en ciment.

4.3 SYNTHESE

La campagne d'essais géomécaniques à caractère méthodologique menée en 2008 dans la station expérimentale de Tournemire avait pour but d'identifier l'origine de phénomènes inhabituels qui ont été observés lors de la précédente campagne menée sur ce site en 2005-2006. Les 4 phénomènes inhabituels que cette campagne visait à étudier et le cas échéant, éliminer étaient : (1) le saut initial des mesures au début du surcarottage, (2) le « pic » des déformations lors du surcarottage, (3) la dérive thermique des mesures après le passage du carottier au niveau des jauges et (4) le pic des déformations lors de l'essai biaxial (voir Figure 25 et Figure 26).

Pour cela, six essais de surcarottage ont été réalisés à partir du tunnel, dans un même forage et à 1 m de distance les uns des autres, afin de s'affranchir au mieux de toute variabilité liée à la géologie ou à l'état de contraintes. Différents paramètres liés au protocole d'essai, suspectés de pouvoir avoir une influence sur la présence des phénomènes incriminés, ont alors été testés : la vitesse d'avancement au surcarottage, la vitesse de rotation du carottier, le fluide de forage utilisé ainsi que le temps de séchage de la colle avant la réalisation du surcarottage.

En ce qui concerne tout d'abord la dérive des mesures après le passage des jauges (phénomène 3), cette campagne a confirmé que celle-ci pouvait être éliminée en réduisant les variations de température au niveau de la cellule en cours de surcarottage. Dans le contexte de Tournemire, le protocole qui consiste à réduire au maximum la vitesse de rotation du carottier (autour de 16-20 tours/min) et à forer en injectant un air (en l'occurrence celui du tunnel) légèrement plus froid que le massif, s'est avéré tout à fait efficace pour éviter tout échauffement sur la cellule en cours de surcarottage. L'utilisation de l'huile comme fluide de forage (au lieu de l'air) n'a pas montré d'avantage particulier, ni pour éliminer les phénomènes de pic, ni pour réduire la dérive thermique.

En ce qui concerne ensuite les phénomènes de saut initial des mesures, de pic au surcarottage et de pic à l'essai biaxial (Figure 25 et Figure 26), la présente campagne a démontré que ceux-ci ont pour origine commune un temps de séchage insuffisant de la colle utilisée pour fixer la cellule CSIRO à la roche. En effet, les essais réalisés mettent en évidence une corrélation claire entre l'existence (et l'amplitude) de ces phénomènes et le temps de séchage de la colle avant la réalisation du surcarottage (pour les phénomènes 1 et 2) ou de l'essai biaxial (pour le phénomène 4).

L'examen des courbes d'évolution de l'amplitude de chaque phénomène en fonction du temps de séchage permet d'estimer, à la résolution près du nombre d'essais réalisés (6 essais), que :

- le temps de séchage nécessaire pour obtenir la disparition du pic au surcarottage est de l'ordre de 80 h (voir Figure 51) ;
- le temps de séchage nécessaire pour obtenir la disparition du pic à l'essai biaxial est de l'ordre de 24 h (voir Figure 53) ;
- le temps de séchage nécessaire pour obtenir la disparition du saut de mesures initial au début du surcarottage est de l'ordre de 40 h (voir Figure 55).

Nous avons poursuivis cette étude par des essais complémentaires en laboratoire sur la colle en résine d'époxy. Nous avons réalisé, dans un premier temps, des essais en utilisant la technique de la calorimétrie différentielle « DSC » dans l'objectif de vérifier que le temps de polymérisation nécessaire pour la colle 10-18°C n'est pas conforme à celui recommandé par le fournisseur (16 heures). Dans un second temps, nous avons réalisé des essais en utilisant la technique du « shore A » dans le but d'étudier d'une part le comportement mécanique de la colle en fonction du temps de séchage et d'autre part de corréler le temps de séchage chimique au temps de séchage mécanique pour ce polymère.

Les essais « DSC » ont permis de mettre en évidence l'influence directe de la température du site expérimental sur la polymérisation de la colle (Figure 63). Ce travail nous a permis de conclure que les 16 heures de temps de séchage préconisés par le fournisseur pour la colle 10-18°C sont très insuffisantes. En effet, pour ce type de colle nous avons montré (Figure 63) que pour :

- une température de 18°C le temps de séchage nécessaire est de 23 heures ;
- une température de 12°C (conditions des essais géomécaniques réalisés à Tournemire en 2005-2006 et 2008) le temps de séchage minimum à respecter est de 50 heures.

Les essais « shore A » nous ont permis de déterminer le temps de séchage mécanique de la colle à une température donnée et de le corréler au temps de séchage chimique (Figure 67). Ce travail montre que les caractéristiques élastiques optimales de la colle (attendues pour ce type de résine lorsqu'elle durcit complètement) ne seront jamais atteintes tant que le temps de séchage chimique (polymérisation complète de la colle) de la colle n'a pas été respecté.

Nous avons approfondi notre étude en réalisant des essais biaxiaux en laboratoire sur des carottes en ciment (matériau simple : homogène, élastique isotrope) en s'affranchissant des conditions du site (endommagement et désaturation) dans l'objectif de s'assurer que le temps de séchage de la colle est bien le seul responsable du pic des déformations à l'essai biaxial. Nous avons pu reproduire au cours de ces essais le pic des déformations à l'essai biaxial et nous avons pu observer sa disparition totale au court du temps (Figure 70). Ce travail nous a permis de confirmer par la suite la nécessité d'utiliser des essais biaxiaux réalisés à des temps de séchage suffisants pour pouvoir déterminer les caractéristiques élastiques intrinsèques du matériau expérimenté.

Au-delà de la mise en évidence d'une corrélation entre un paramètre expérimental (le temps de séchage) et des observables de mesure (saut, pics, stabilisation), nous avons tenté, dans ce mémoire, d'avancer des hypothèses explicatives sur l'origine physique de cette corrélation.

Ainsi, nous interprétons le pic au surcarottage comme la manifestation d'un couplage imparfait entre les jauges et la paroi du trou Ex (du fait d'une colle non totalement polymérisée). De même, nous interprétons le saut initial des mesures comme une déformation axiale significative de la cellule sous l'effet de la pression d'air injecté, du fait d'un couplage imparfait avec le terrain. En ce qui concerne les courbes de séchage, nous interprétons l'évolution des déformations comme la marque du rétreint de la colle et l'évolution de la température comme le résultat de la réaction (exothermique) de polymérisation de la colle. Enfin, le pic à l'essai biaxial est plus difficile à interpréter. Néanmoins, l'essai de fluage réalisé sur une

des carottes a permis de mettre en lien ce pic avec un éventuel comportement viscoélastique (ou viscoplastique) de la colle lorsque celle-ci n'est pas correctement durcie. Il serait intéressant d'explorer/valider cette piste à travers la modélisation numérique. Se pose alors le problème de la loi de comportement de la colle et des paramètres qui la caractérisent.

Quelle qu'en soit l'origine physique, si l'on admet que ces phénomènes (saut, pics, non-stabilisation des courbes de séchage) sont des manifestations observables de la polymérisation incomplète de la colle, alors les résultats de cette campagne montrent qu'il faut attendre au moins 80 h (et non 16 heures comme le préconise le fournisseur) pour que toutes ces manifestations disparaissent, c'est-à-dire pour pouvoir commencer à considérer que la colle est suffisamment prise.

Dans le cadre d'une autre campagne de surcarottage réalisée récemment par l'INERIS au barrage du Chambon [Nadim, 2010] sur le béton cyclopéen (béton complété par des blocs de gneiss de plusieurs décimètres de diamètre), des problèmes liés à la polymérisation de la colle ont été observés. La cellule utilisée lors de cette campagne est la cellule CSIRO et la température du terrain lors des essais de surcarottage est d'environ 10°C. Cette campagne a démontré que les problèmes liés à la polymérisation de colle n'étaient pas propres à Tournemire et a confirmé que la polymérisation de la colle dépend de la température du milieu investigué.

Nous avons tenu informé le fournisseur de la cellule CSIRO (société ES&S, Australie) de cette controverse. En effet, il est surprenant que le fournisseur garantisse qu'un temps de séchage de 16h est suffisant (dans la gamme de température appropriée à cette colle, en l'occurrence 10-18°C) pour obtenir sa polymérisation complète. Nous lui avons donc transmit les résultats de la campagne de surcarottage de 2008 ainsi que la campagne d'essais de calorimétrie différentielle « DSC » et d'essais mécaniques « shore A » sur échantillons de colle dans l'objectif d'obtenir des explications.

5. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DE L'ARGILITE DE TOURNEMIRE DETERMINEES PAR ESSAI BIAXIAL

5.1 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DE L'ARGILITE DE TOURNEMIRE

5.1.1 INTRODUCTION

Dans cette partie, nous dressons un état des connaissances sur le comportement élastique de l'argilite de Tournemire. Pour ce faire, nous avons rassemblé l'ensemble des études fournissant, de manière directe ou indirecte, des valeurs ou des indications sur le comportement élastique de ce matériau : essais mécaniques sur échantillons en laboratoire, mesures de vitesses de propagation des ondes sur échantillons en laboratoire, mesures de vitesses de propagation des ondes par diagraphies ultrasoniques *in situ*, mesures de convergence des galeries, etc.

Nous présentons plus en détail la campagne d'essais mécaniques en laboratoire sur éprouvettes réalisée par Rejeb *et al.*, [1999], qui est la plus souvent citée pour caractériser le comportement élastique de l'argilite de Tournemire dans différents travaux de recherche et d'expertise et sur la base de laquelle ce matériau est connu pour être fortement anisotrope.

5.1.2 VALEURS FOURNIES PAR LES ESSAIS MECANIQUES SUR ECHANTILLONS

5.1.2.1 METHODES D'INTERPRETATION DE LA COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION POUR LA DETERMINATION DES MODULES DE YOUNG

La Figure 71 présente un exemple de courbe contrainte-déformation obtenu lors d'un essai de compression triaxiale sur l'argilite de Tournemire. Le domaine élastique est souvent assimilé à la zone linéaire de la courbe contrainte-déformation alors qu'en toute rigueur, il faudrait vérifier la réversibilité du comportement par cycle déchargement-rechargement. La pente de la courbe contrainte-déformation en chargement continu, correspond à un module enveloppe $E_{enveloppe}$ défini sur la Figure 71 (ou module tangent à la courbe). Elle est différente de la pente du cycle déchargement-rechargement qui permet de déterminer le module de Young $E_{recharge}$ défini sur la Figure 71 et qui est propre à chaque cycle. Dans le cas où la courbe « enveloppe » ou la courbe du cycle décharge-recharge ne présenterait pas de partie linéaire (absence rarement observée et mentionnée par les auteurs lors des essais réalisés sur l'argilite de Tournemire), les modules de Young sont déterminés à partir d'une droite sécante à la courbe.

Nous nous intéresserons dans la suite de notre étude aux modules de Young déterminés à partir des cycles de décharge-recharge. Chaque cycle permet de vérifier la réversibilité du comportement lors de l'essai. En effet, l'allure de la courbe obtenue lors d'un cycle déchargement-rechargement est un indicateur de l'élasticité et/ou de la linéarité du comportement (Figure 71)

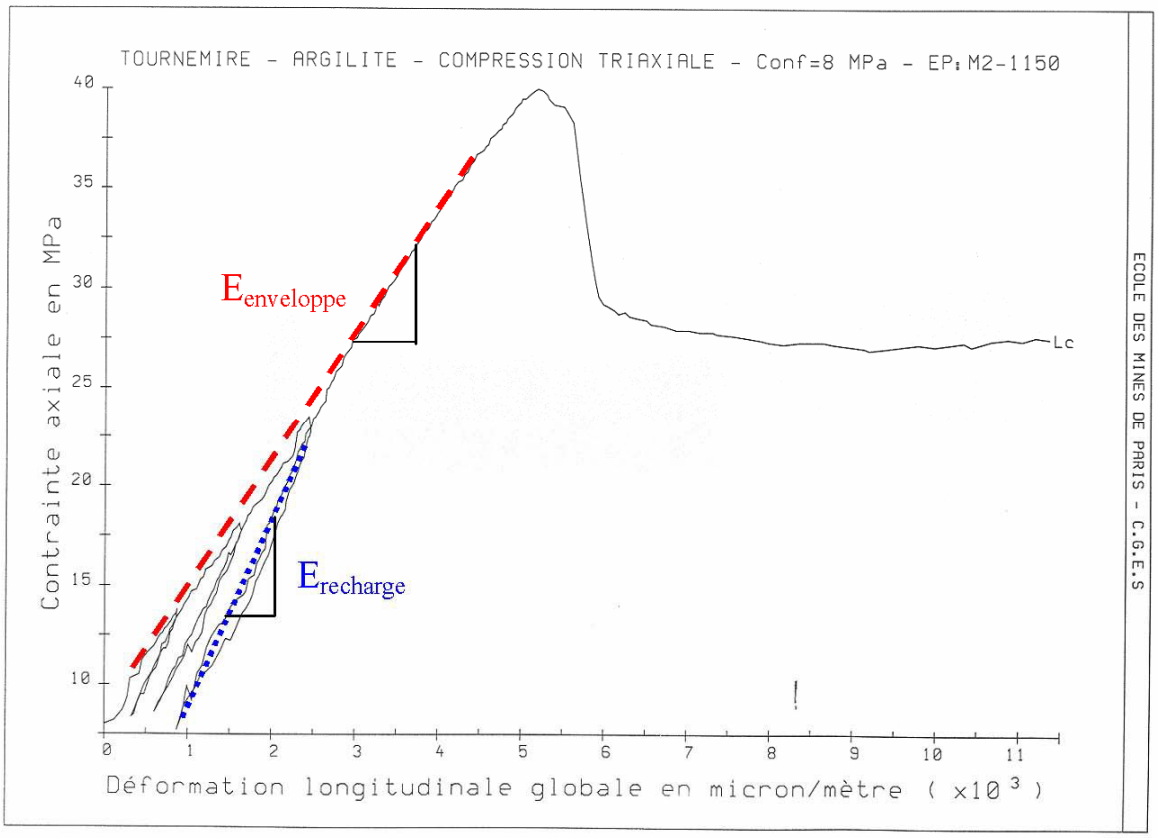


Figure 71 : Exemple de courbe contrainte-déformation obtenu lors d'un essai de compression triaxial sur l'argilite de Tournemire

5.1.2.2 RESULTATS OBTENUS PAR CUXAC (1991)

Des essais mécaniques en laboratoire sur des éprouvettes d'argilite de Tournemire ont été réalisés par Cuxac dans le cadre d'une collaboration entre le LAEGO et le laboratoire de mécanique de l'EUDIL. Il s'agit d'essais de compression simple et de compression triaxiale sur des échantillons cylindriques de 38 ou 50mm de diamètre, avec un élancement voisin de 2. Ces échantillons proviennent de forages dont l'axe est parallèle ou perpendiculaire à la stratification ou incliné par rapport à celle-ci de 20°, 45° ou 60°. Les essais de compression triaxiale ont été réalisés avec des pressions de confinement 5, 10, 20, 30, 40 et 50 MPa. La provenance des échantillons n'est pas mentionnée par Cuxac dans son rapport.

La mesure des déformations en cours d'essai a été réalisée à l'aide de jauges d'extensométrie qui permettent de mesurer des déformations locales et des capteurs de déplacement relatif des plateaux de la presse (mesure des déformations globales). La vitesse de déformation a été maintenue constante au cours des essais ($2{,}0.10^{-6}\ s^{-1}$).

Les résultats des essais de compression simple sont présentés dans le Tableau 5. L'auteur n'a fourni dans son rapport que les résultats des essais de compression simple. Malheureusement, concernant la détermination des modules de Young, l'auteur n'a fourni aucune information sur le choix des déformations utilisées

(déformations locales ou déformations globales), ni sur la méthode d'interprétation utilisée pour déterminer les modules de Young à partir des courbes contrainte-déformation ($E_{enveloppe}$ ou $E_{recharge}$ voir Figure 71). Il ne commente pas non plus le fort rapport d'anisotropie (A_E = 4,94) auquel il aboutit.

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
	$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Cuxac [1991]	2630	13000	0,12	0,1	2000 ~ 4000	4,94

Tableau 5 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire proposées par Cuxac [1991] à partir d'une campagne d'essais mécaniques en laboratoire

5.1.2.3 RESULTATS OBTENUS PAR NIANDOU (1994)

Des essais mécaniques en laboratoire sur des éprouvettes d'argilite de Tournemire ont été également réalisés par Niandou [1994] au sein du Laboratoire de Mécanique de Lille (URA CNRS n°1441). Nous nous intéressons ici aux essais de compression triaxiale réalisés sur des échantillons cylindriques ayant un diamètre de 37 mm et un élancement voisin de 2. Ces échantillons proviennent de forages dont l'axe est parallèle ou perpendiculaire à la stratification ou incliné par rapport à celle-ci de 15°, 20°, 30°, 45°, 60° et 75°. Les essais de compression triaxiale ont été réalisés avec des pressions de confinement 1, 5, 10, 20, 25, 30, 40 et 50 MPa. L'auteur ne mentionne pas dans son rapport la provenance des échantillons.

La mesure des déformations en cours d'essai a été réalisée à l'aide de jauges d'extensométrie qui permettent de mesurer des déformations locales et des capteurs de déplacement (de type LVDT) relatif des plateaux de la presse (mesure de la déformation axiale globale). La vitesse de déformation est de $2{,}0.10^{-6}$ /s en chargement monotone et de $4{,}5.10^{-6}$ /s en cycle de chargement – déchargement.

Les résultats obtenus à partir des cycles de charge-décharge sont présentés dans le Tableau 6. Les paramètres déterminés à partir des déformations locales (jauges d'extensométrie) et ceux déterminés à partir des déformations globales (capteurs de type LVDT) montrent une légère différence que l'auteur explique par la simple différence entre les deux types de capteurs de déformations utilisés : la jauge d'extensométrie mesure la déformation locale, le capteur type LVDT mesure le déplacement de la presse suite à la déformation globale de l'échantillon. Niandou ne présente aucun jeu de caractéristiques élastiques définitives et complètes caractérisant le comportement élastique de l'argilite de Tournemire. Il a retenu en revanche quatre valeurs pour chaque caractéristique élastique, il les a présentées sous forme d'étude de la variation des cinq caractéristiques élastiques anisotropes en fonction de la pression de confinement pour les valeurs 1, 5, 10 et 20 MPa uniquement (voir ANNEXE Q).

Nous proposons dans le Tableau 6 une moyenne (puisque certaines caractéristiques élastiques varient considérablement en fonction de la pression de confinement) calculée à partir des valeurs présentées par Niandou dans son

rapport. Pour sa part, l'auteur conclut à un rapport d'anisotropie des modules élastiques de 2,44, qui est différent de celui présenté dans le Tableau 6, sans donner plus de détail sur la détermination de ce rapport.

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
	$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Niandou [1994]	7317 ± 2157	21878 ± 1470	0,15 ± 0,07	0,13 ± 0,02	4640 ± 847	3,17 ± 0,75*

Tableau 6 : Synthèse personnelle des caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire déterminées à partir des essais mécaniques sur échantillons réalisés en laboratoire par Niandou [1994]
** valeur moyenne des rapports d'anisotropie*

5.1.2.4 RESULTATS OBTENUS PAR REJEB *ET AL.* [1999]

5.1.2.4.1 CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DE L'ARGILITE DE TOURNEMIRE PROPOSEES PAR REJEB *ET AL.* [1999]

Ces résultats proviennent d'une campagne d'essais en laboratoire menée à l'Ecole des Mines de Paris sur des échantillons d'argilite. Nous nous intéressons ici aux essais de compression simple et de compression triaxiale réalisés sur des échantillons dont l'axe est parallèle ou perpendiculaire à la stratification ou incliné de 30° ou 45° par rapport à celle-ci [Rejeb *et al.*, 1999]. Les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire proposées par Rejeb *et al.*, [1999] sont présentées dans le Tableau 7.

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
	$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Rejeb *et al.*, [1999]	9270	24190	0,2	0,15	3940	2,61

Tableau 7 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire selon Rejeb et al., [1999] au cours d'une campagne d'essais mécaniques en laboratoire.

5.1.2.4.2 PRESENTATION DES ESSAIS REALISES LORS DE CETTE CAMPAGNE

Cette campagne peut être séparée en deux sous-campagnes puisque les éprouvettes destinées aux essais en laboratoire proviennent de deux zones différentes de la station expérimentale :

- De la galerie Est (cf. Figure 72 et Figure 14) et plus particulièrement du forage C1, de 72 mm de diamètre, parallèle à la stratification, et du sondage VF4, de 64 mm de diamètre, perpendiculaire à la stratification. La localisation exacte du forage C1 n'a pas été mentionnée par l'auteur.

- Du tunnel (cf. Figure 72 et Figure 14) et plus particulièrement de 3 forages de 65 mm de diamètre, à savoir M1 (parallèle à la stratification), M2 et M3 (respectivement à 30 et 45 degrés du plan de stratification).

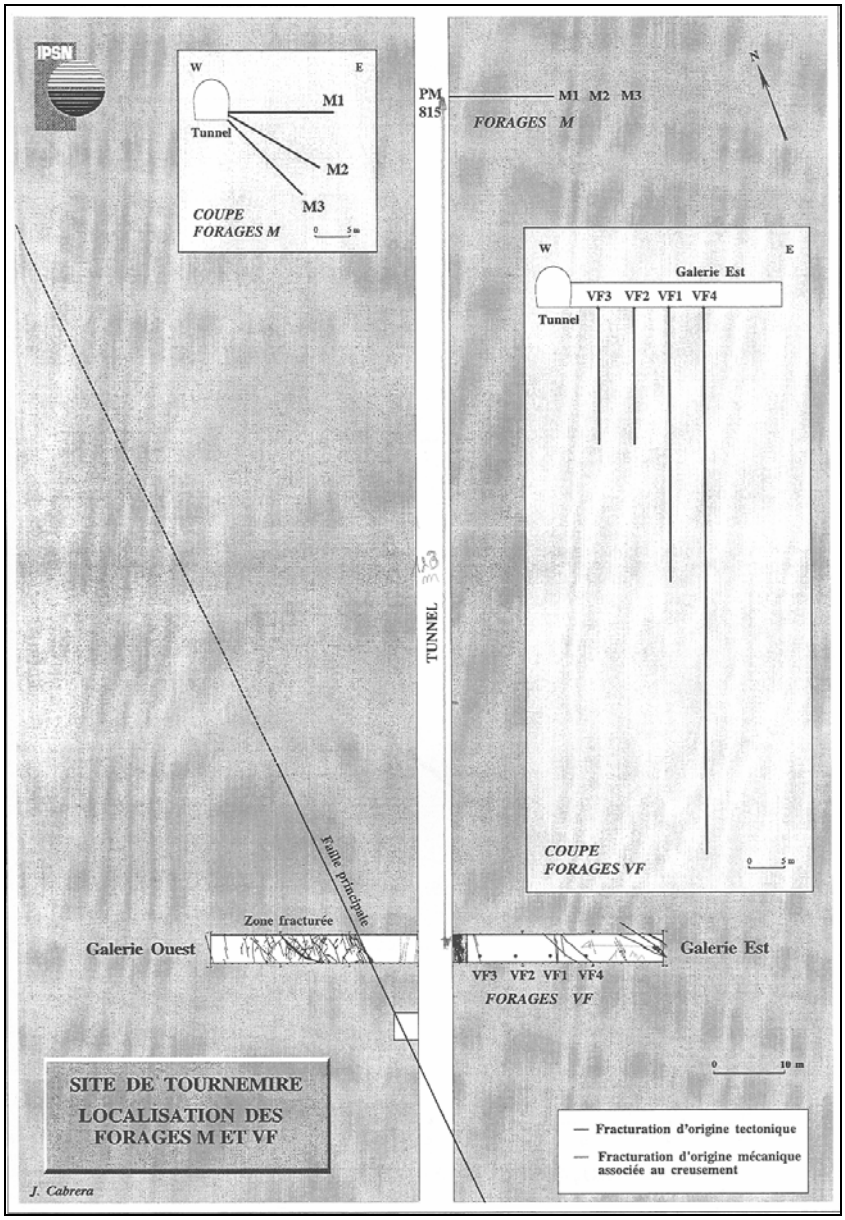


Figure 72 : Localisation des forages VF, C et M dans la station expérimentale de Tournemire [Rejeb et al., 1999]

La localisation des forages est importante puisque du fait de la géologie, nous nous attendons à de fortes différences d'un endroit à un autre. En effet, les forages de la galerie Est se trouvent dans une zone à endommagement très intense à proximité d'un faille d'origine tectonique (voir Figure 72 et Figure 73), alors que les forages localisés dans le tunnel se trouvent dans une zone non perturbée qui échappe à l'influence de cette faille.

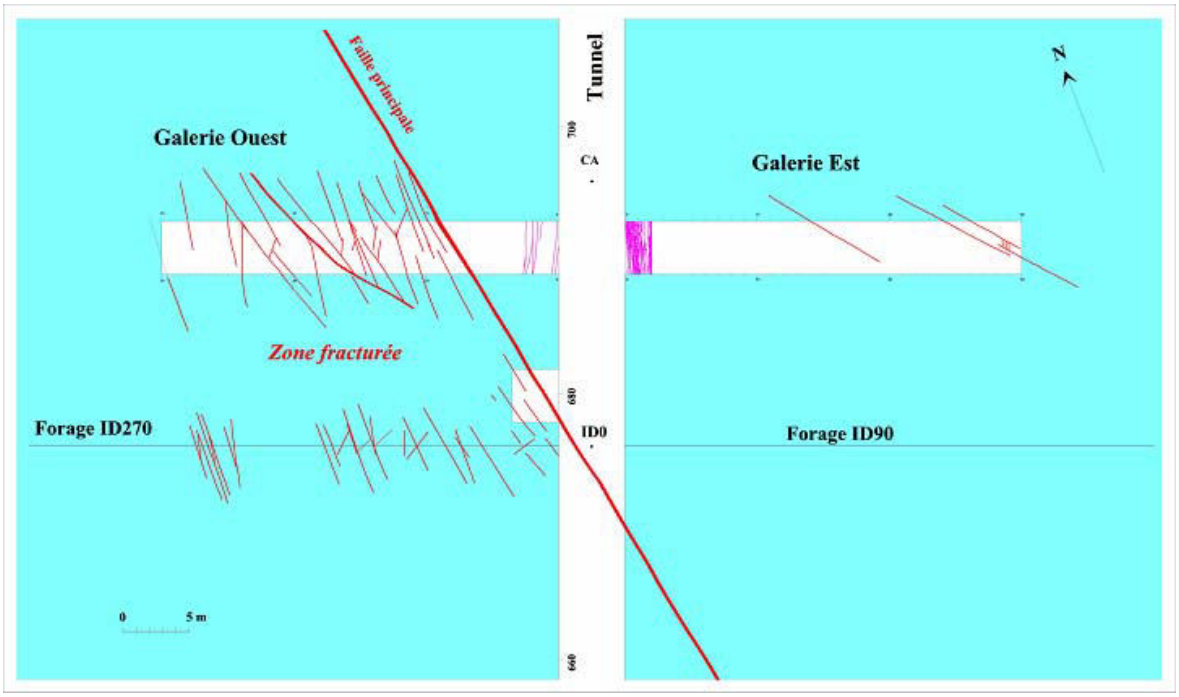


Figure 73 : schéma structural de la tectonique dans le site de Tournemire [Cabrera et al., 1999]

Les déformations lors des cycles charge-décharge ont été mesurées par deux types de capteurs : un capteur à induction qui mesure le déplacement entre les plateaux de la presse (mesure de déformations globales) et des jauges de déformation classiques (mesure de déformations locales).

Nous présentons d'abord les résultats de Rejeb *et al.* [1999], basés sur les déformations locales. Nous donnerons ensuite un aperçu des modules élastiques calculés à partir des déformations globales.

Les essais réalisés sur les éprouvettes provenant de la galerie Est ont été réalisés dans le but de déterminer les modules de Young perpendiculaire E_1 et parallèle E_2 au plan de stratification, ainsi que les coefficients de Poisson ν_{12} et ν_{23} (voir ANNEXE R et ANNEXE S).

- Les essais de compression simple à 3 cycles charge-décharge (5, 10 et 15 MPa) sur les éprouvettes du forage C1 ont permis la mesure de la résistance de la roche parallèlement à l'anisotropie, la détermination de E_2 et de ν_{23}. Nous avons jugé bon de ne pas intégrer dans notre analyse les résultats de l'essai C1-140, pour lequel les courbes présentent une morphologie inhabituelle (voir ANNEXE R).
- Les essais de compression triaxiale sur des éprouvettes du forage VF4 à différentes pressions de confinement (1, 2, 5, 8 et 10 MPa) ont permis de déterminer la variation de la résistance de la roche perpendiculairement à l'anisotropie, de E_1 et de ν_{12} en fonction du confinement en réalisant à chaque fois trois cycles de charge-décharges pour différentes valeurs du déviateur de contrainte (5, 10 et 15 MPa). Aucun essai de compression simple n'a été

réalisé sur les éprouvettes en provenance de l'unique forage perpendiculaire au plan d'anisotropie de cette campagne.

- Des essais de compression triaxiale à différentes pressions de confinement (1, 2, 5, 8 et 10 MPa) et en adoptant à chaque fois trois cycles de charge-décharge pour trois valeurs du déviateur de contrainte (10, 15 et 20 MPa) sur des éprouvettes du forage C1 qui ont permis de mesurer la variation de E_2 et du coefficient de poisson ν_{23} en fonction du confinement dans l'entourage de la galerie Est

Les essais réalisés sur les éprouvettes provenant du tunnel ont été réalisés dans le but de déterminer E_2, ν_{23} et le module de cisaillement G de la roche dans cette zone (voir ANNEXE R et ANNEXE S).

- Les essais de compression simple sur les éprouvettes du forage M1 avec 3 cycles charge-décharge (5, 10 et 15 MPa) ont permis d'une part de mesurer la résistance à la rupture de la roche dans le sens parallèle à l'anisotropie et d'autre part, de déterminer le module de Young dans la direction parallèle au plan d'anisotropie E_2 ainsi que du coefficient de Poisson ν_{23}.
- Des essais de compression triaxiale à différentes pressions de confinement (1, 2, 5, 8 et 10 MPa) ont été mis en place en adoptant à chaque fois trois cycles de charges-décharges pour trois valeurs du déviateur de contrainte (10, 15 et 20 MPa) sur des éprouvettes du forage M2 et M3, dans le but de déterminer le module de cisaillement de la roche et de vérifier les valeurs de E_1 et E_2 déterminées par Rejeb *et al.*, [1999].

5.1.2.4.3 INTERPRETATION DES RESULTATS ET CONCLUSION

Dans l'interprétation des résultats, Rejeb *et al.*, [1999] n'ont utilisé que les déformations locales, bien que ces dernières soient largement inférieures aux déformations globales. Donc les modules d'élasticité déterminés à partir des déformations globales de l'échantillon testé sont largement inférieurs à ceux déterminés à partir des déformations locales. Notons de plus que ces résultats sont en contradiction avec les résultats de Niandou [1994] qui montrent que les déformations mesurées localement sont presque identiques à celles mesurées globalement.

Pour les essais réalisés sur des échantillons en provenance de la galerie Est :

- Les résultats des essais de compression triaxiale réalisés à partir des échantillons en provenance du forage perpendiculaire au plan d'anisotropie VF4, montrent que E_1 ne varie pas ou très peu en fonction du confinement (ANNEXE S), ce qui est contradictoire avec les résultats de Niandou [1994].
- Les résultats des essais de compression triaxiale réalisés sur les échantillons en provenance du forage parallèle au plan d'anisotropie C1 ont montré que E_2 est indépendant de la pression de confinement, ce qui est cohérent avec l'interprétation de Niandou [1994].

Pour les essais réalisés sur des échantillons en provenance du tunnel :

- Les résultats des essais de compression simple réalisés sur des éprouvettes en provenance du forage parallèle au plan d'anisotropie M1 montrent que E_2 est légèrement supérieur à ceux réalisés sur des éprouvettes en provenance de la galerie Est (ANNEXE S).
- Les résultats des essais de compression triaxiale sur des éprouvettes en provenance des forages inclinés M2 et M3 montrent que le module de cisaillement est invariant en fonction du confinement (ANNEXE S). Cependant, les résultats de ces essais n'ont pas pu être utilisé pour la détermination des modules d'élasticité [Rejeb *et al.*, 1999].

Nous retenons à partir de cette synthèse détaillée les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire mentionnées dans le Tableau 8. Les moyennes et les écart-types présentés dans ce tableau sont calculés sur la base des 51 essais (ANNEXE S) sélectionnés à partir de la campagne réalisée par Rejeb *et al.*, [1999] dont nous avons détaillé les protocoles et les résultats précédemment. Comme nous pouvons le constater, ces paramètres sont cohérents avec ceux que nous avons interprétés à partir des essais réalisés par Niandou et qui figurent dans le Tableau 6. Cependant le rapport d'anisotropie déterminé par les deux auteurs est différent : A_E = 1,92 pour Rejeb *et al.*, [1999] alors que A_E = 3,17 (Tableau 6) pour Niandou [1994].

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
	$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Gal. Est	9266 ± 564	17765 ± 1568	0,22 ± 0,08	0,20 ± 0,05	-	1,92 ± 0,18
Tunnel	-	20251 ± 1448	-	0,19 ± 0,08	3942 ± 575	-
Moyenne	9266	19008	0,220	0,195	3942	1,92*

*Tableau 8 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire déterminées à partir des essais réalisés en laboratoire par Rejeb et al., [1999] sur des carottes provenant de deux ouvrages distants de plus de 120 m : la Galerie Est et le tunnel (interprétation personnelle d'après Rejeb et al., [1999]), * rapport calculé à partir des résultats des essais réalisés sur les échantillons en provenance de la galerie Est*

5.1.3 VALEURS FOURNIES PAR LES MESURES DE VITESSES SUR ECHANTILLONS

Cuxac [1991] a réalisé des mesures de vitesse de propagation d'ondes de compression ou ondes longitudinales P (V_p) et de vitesse de propagation d'ondes de cisaillement ou ondes S (V_s) sur des échantillons cubiques de 50 mm d'arrêtes (V_{p1}, V_{p2}, V_{p45}, V_{s31} et V_{s32}). Les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire sont déterminées à partir des vitesses en utilisant l'équation de Christoffel qui prend en considération le caractère isotrope transverse de la roche [Cuxac, 1991]. Les résultats de cette campagne sont présentés dans le Tableau 9.

L'influence de la contrainte de confinement sur les caractéristiques élastiques isotropes transverses n'a pas été évaluée dans le cadre de cette étude.

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
	$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Cuxac (1991)	7885	29290	0,05	0,08	5995	3,71

Tableau 9 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire déterminées à partir de la mesure de vitesses de propagation d'ondes ultrasoniques dans des échantillons [Cuxac, 1991]

Cuxac compare les modules élastiques obtenus à partir des essais de propagation d'ondes ultrasoniques sur échantillon (présentés ci-dessus) et des essais mécaniques en laboratoire sur des éprouvettes (§5.1.2.2). Il propose un rapport entre le module de Young statique et le module de Young dynamique de 0,33 dans le sens perpendiculaire au plan d'anisotropie (E_{1sat}/E_{1dyn}) et de 0,44 dans le sens parallèle au plan d'anisotropie (E_{2sat}/E_{2dyn}). Cuxac considère que la différence très importante entre les modules de Young calculés à partir des essais mécaniques sur des échantillons en laboratoire (voir Tableau 5) et ceux déterminés à partir de mesures de vitesses sur des échantillons en laboratoire (voir Tableau 9) est due à la mauvaise qualité des échantillons d'argilite et leur nombre limité, sans pour autant fournir dans son rapport les photos des échantillons testés ainsi que leur nombre.

5.1.4 VALEURS FOURNIES PAR LES MESURES DE VITESSES *IN SITU*

En novembre et décembre 2005, l'INERIS a mené une campagne de mesure de vitesse de propagation des ondes P et S dans des forages radiaux autour de la galerie principale, de la galerie Est et du tunnel [Contrucci, 2006]. Ces forages présentent différentes orientations par rapport à la verticale (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° et 315°) et pénètrent dans le massif jusqu'à une profondeur de 6 m à partir de la paroi des galeries.

Les caractéristiques élastiques isotropes transverses ont été déterminées au niveau du tunnel (Tableau 10) en utilisant les forages réalisés parallèlement et perpendiculairement au plan d'anisotropie. L'auteur a employé des formules habituellement utilisées dans le cas d'une roche isotrope [Homand *et al.*, 1993 et Deliormanli *et al.*, 2007], en faisant l'hypothèse que dans le sens du forage perpendiculaire et le forage parallèle au plan d'anisotropie, chacun d'eux considérés séparément, le comportement de la roche était isotrope (voir ANNEXE T).

Cette méthode n'a pas pu être appliquée dans la galerie Est et la galerie principale, faute de mesures de propagation des ondes de compression dans les forages de ces zones.

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
	$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Contrucci [2006]	14457 ± 1594	17444 ± 1185	0,330 ± 0,01	0,32 ± 0,02	5420 ± 613	1,21

Tableau 10 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire déterminées à partir des diagraphies ultrasoniques in situ (interprétation personnelle d'après Contrucci [2006])

La comparaison des résultats des mesures de vitesse réalisées par Cuxac (Tableau 9) en laboratoire avec ceux des essais menés par Contrucci (Tableau 10) conduit à des valeurs allant du simple au double. En effet le module E_2 mesuré *in situ* est presque deux fois plus faible que celui mesuré en laboratoire, tandis que le module E_1 mesuré *in situ*, est une fois et demie plus grand que celui mesuré en laboratoire. Le rapport A_E mesuré *in situ* est donc trois plus faible que celui déterminé en laboratoire.

5.1.5 VALEURS FOURNIES PAR LES MESURES DE CONVERGENCE EN GALERIE

Des mesures de convergence ont été réalisées par Rejeb [2002] lors du creusement des galeries Est et Ouest (Figure 74) et ensuite pendant 2000 jours. Afin de reproduire par simulation numérique les mesures de convergence, un premier travail a été réalisé par Rejeb [1999], montrant qu'une loi de comportement linéaire élastique isotrope transverse ne suffit pas à reproduire les mesures. Il était donc nécessaire selon Rejeb d'implanter dans ce modèle une loi de comportement visco-élastoplastique du type de Lemaître étendu au cas orthotrope [Rejeb, 2006] pour pouvoir reproduire le comportement différé.

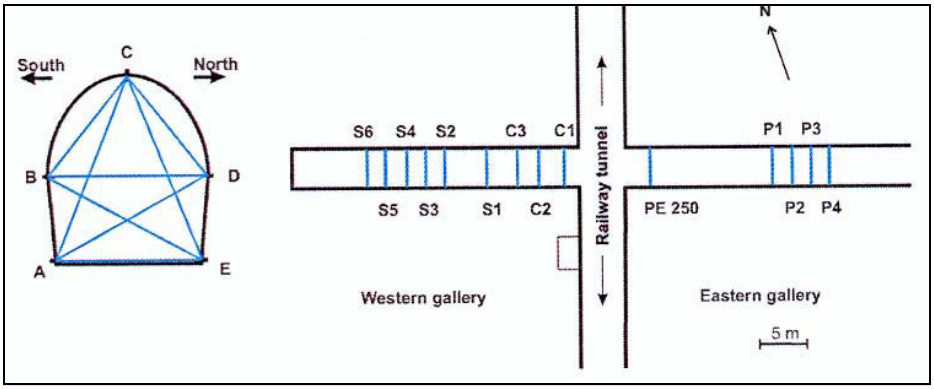


Figure 74 : Localisation des sections de mesure ainsi que la disposition des cordes de convergence [Armand et Rejeb, 2002]

A court terme, le modèle numérique a pu reproduire les mesures de convergence dans les différents profils de la Figure 75, à partir d'une loi de comportement élastique orthotrope. Cependant les caractéristiques élastiques isotropes transverses (voir Tableau 11) utilisées pour l'argilite de Tournemire lors de ce

travail de modélisation [Rejeb, 2006] diffèrent de ceux obtenus lors de la campagne d'essais mécanique sur carottes en laboratoire réalisé par Rejeb *et al.*, (voir Tableau 7). Nous avons remarqué aussi que le modélisateur fait l'hypothèse d'un état de contrainte isotrope ce qui est contradictoire avec les mesures réalisés par GEOSTRESS (voir § 3.1.3.2) qui montre un état de contrainte anisotrope dans le site expérimental de Tournemire. Par contre à long terme, selon Rejeb [2003] la modélisation permet de reproduire quantitativement les mesures de convergence du profil P2 dans la galerie Est. Cette conclusion est correcte pour les cordes AC, BC, AD et AE (Figure 75), mais en ce qui concerne les cordes BD, CD et BE (Figure 75), nous remarquons une dispersion dans les mesures de convergences que l'auteur ne discute pas dans son document.

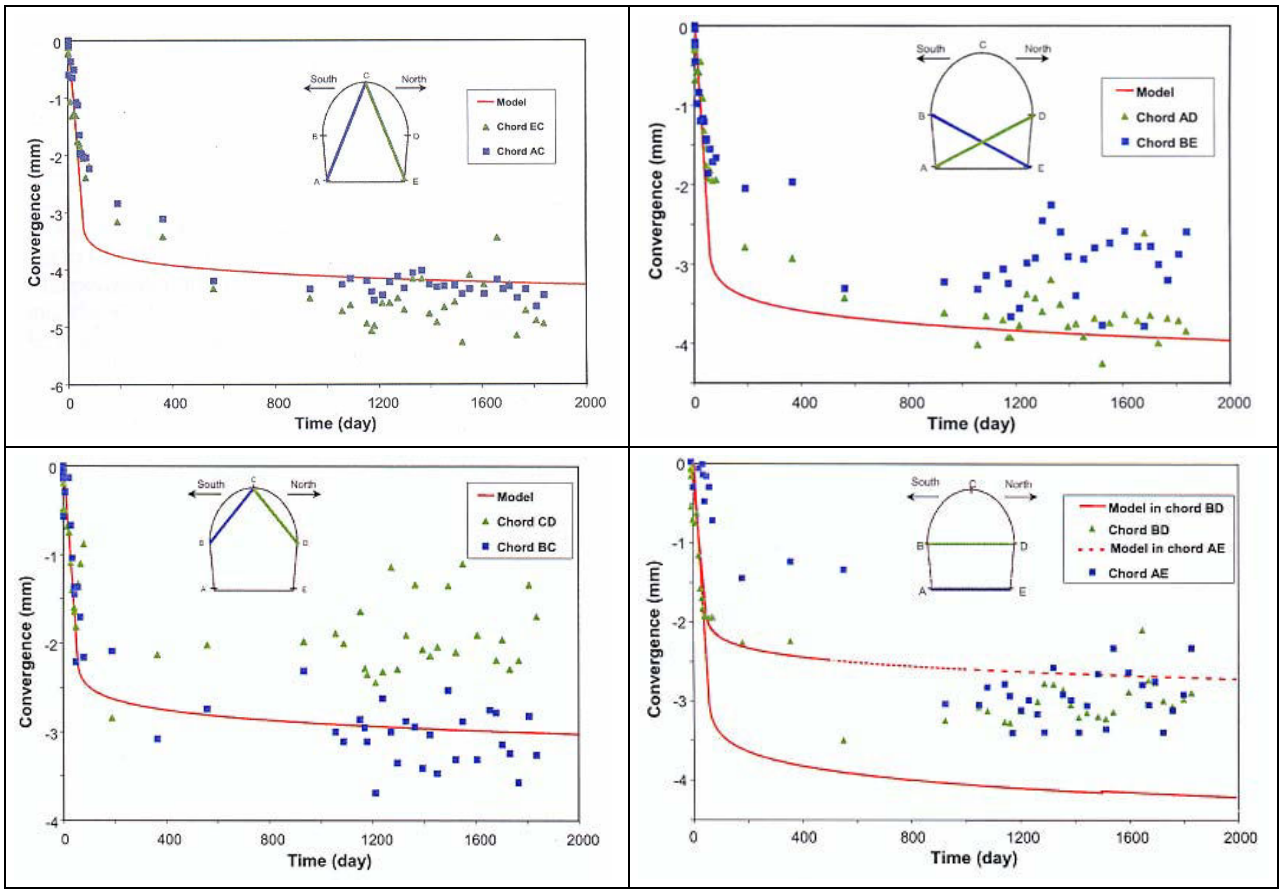


Figure 75 : Comparaison entre les convergences mesurées et calculées dans le profil P2-galerie EST [Rejeb, 2006]

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
	$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Rejeb [2006]	9270 ± 490	27680 ± 4040	0,17 ± 0,03	0,20 ± 0,03	3940 ± 480	2,98

Tableau 11 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire selon Rejeb, [2006] utilisés lors de la modélisation numérique des mesures de convergence

5.1.6 SYNTHESE

Nous présentons dans le Tableau 12, une synthèse des modules de Young E_1 et E_2 ainsi que le rapport d'anisotropie A_E de l'argilite de Tournemire déterminées à partir des différentes campagnes de mesures en laboratoire et *in situ* cités précédemment. Nous n'avons proposé dans ce tableau que les campagnes ayant fourni des détails sur le déroulement ainsi que les résultats des essais. Nous remarquons dans ce tableau que le rapport d'anisotropie diffère d'une campagne à une autre. Cependant ce rapport est plus élevé lorsqu'il est déterminé à partir d'essais en laboratoire qu'à partir d'essais *in situ*. En effet, le module E_2 déterminé par les essais *in situ* [Contrucci, 2006] est similaire à celui déterminé par des essais en laboratoire [Rejeb *et al.*, 1999 et Niandou, 1994]. Par contre, le module E_1, déterminé à partir des essais *in situ*, est deux fois supérieur à celui déterminé par les essais en laboratoire.

	Conditions Expérimentales	Méthode utilisée	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
			$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	
Rejeb *et al.*, [1999]	En laboratoire	Essai uniaxial-triaxial	9266	19008	2,05
Niandou [1994]	En laboratoire	Essai uniaxial-triaxial	7317	21878	2,99
Cuxac [1991]	En laboratoire	Mesure de vitesse	7885	29290	3,71
Contrucci [2006]	*In situ*	diagraphie ultrasonique	14457	17444	1,21

Tableau 12 : Synthèse des modules de Young ainsi que le rapport d'anisotropie de l'argilite de Tournemire déterminés à partir des différentes campagnes

La comparaison entre les résultats de deux campagnes d'essai de mesure de vitesse l'un *in situ* [Contrucci, 2006] et l'autre en laboratoire [Cuxac, 1991] montre des modules de Young dynamiques E_1 et E_2 très différents, allant du simple au double. Le rapport d'anisotropie déterminé par les essais en laboratoire est très élevé, il est trois fois supérieur à celui déterminé par des essais *in situ*. Pour vérifier ces constatations, nous nous sommes intéressés à comparer les résultats des essais mécaniques réalisés en laboratoire en caractérisant mécaniquement les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire à partir des essais *in situ* en utilisant la technique de l'essai biaxial (voir § 2.3 et § 5.2). Nous comparerons par la suite ces résultats à ceux obtenus par les essais en laboratoire. Nous avons donc considéré la campagne réalisée par Rejeb *et al.* [1999] comme étant la campagne de référence, pour la caractérisation mécanique des caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire en laboratoire. En effet, cette campagne a été définie en se basant sur les études réalisées par Niandou *et al.* [1997] (publication des travaux de thèse de Niandou [1994]). Elle contient encore plus de détails sur l'état des échantillons expérimentés ainsi que leur provenance, la prise en compte de la géologie de Tournemire dans l'étude, les différents types d'essais mis en œuvre ainsi que leurs nombres élevés et les résultats obtenus à partir de chaque essai. Les paramètres que nous avons sélectionnés sont regroupés dans le Tableau 13, ils représentent des valeurs moyennes calculées à partir des résultats de tous les essais réalisés dans le tunnel et la galerie EST par Rejeb *et*

al. [1999]. Le rapport d'anisotropie A_E qui figure dans ce tableau est celui-ci calculé à partir des résultats des essais réalisés sur les échantillons en provenance de la galerie Est lors de cette campagne. Un tel rapport n'a pu être calculé à partir des résultats des essais réalisés lors de cette même campagne sur les échantillons en provenance du tunnel puisque le module E_1 n'a pas pu être déterminé (voir Tableau 8)

Nous appellerons par la suite « les caractéristiques élastiques déterminées en laboratoire », les valeurs qui découlent de l'interprétation personnelle des travaux de Rejeb *et al.* [1999] et qui figurent dans le Tableau 13.

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
	$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Interprétation personnelle d'après Rejeb *et al.*, [1999]	9266 ± 564	19505 ± 1840	0,22 ± 0,08	0,20 ± 0,07	3942 ± 575	1,92 ± 0,18*

Tableau 13 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire déterminées à partir de l'interprétation personnelle des essais réalisés Rejeb et al., [1999]
** rapport calculé à partir des résultats des essais réalisés sur les échantillons en provenance de la galerie Est (Tableau 8).*

5.2 VALEURS DEDUITES DES ESSAIS BIAXIAUX DE 2005-2006 ET 2008 EN UTILISANT DES FORMULATIONS ANALYTIQUES

5.2.1 PRESENTATION DES COURBES TYPIQUES DES ESSAIS BIAXIAUX

L'étude réalisée dans le chapitre 4 a permis de mettre en évidence l'effet du temps de séchage de la colle sur le bon déroulement de l'essai de surcarottage et l'essai biaxial. En effet, un temps de séchage insuffisant est responsable de différents phénomènes atypiques observés lors de ces essais. La synthèse du chapitre 4 (§ 4.3) a permis d'identifier l'effet du temps de séchage sur le pic à l'essai biaxial ainsi que son origine lors des essais biaxiaux réalisés durant la campagne d'essais géomécanique 2008. Les essais réalisés sur des carottes en ciment ont permis de reproduire le pic à l'essai biaxial et de confirmer le rôle prépondérant de la colle sur ce phénomène (§ 4.3). Pour pouvoir déterminer avec exactitude les caractéristiques élastiques isotropes transverses de l'argilite de Tournemire à partir de l'interprétation des courbes d'essais biaxiaux, nous avons sélectionné les courbes n'ayant pas montré de pic et qui donc s'affranchissent de l'effet du temps de séchage insuffisant sur la qualité des résultats (ANNEXE L). Les essais sélectionnés pour la détermination des caractéristiques élastiques isotropes transverses de l'argilite de Tournemire à partir de l'interprétation des courbes d'essais biaxiaux sont donc les essais TC35 et TC36 (Figure 76). Nous n'avons choisi aucun essai de la campagne de 2005-2006 lors de cette étude puisque tous les essais de surcarottage (précédant les essais biaxiaux) ont été réalisés avec un temps de séchage insuffisant. Lors de l'essai de surcarottage TC34, un problème technique a rendu inopérantes les jauges inclinées J4, J5 et J9 et les jauges

orthoradiales J8 et J12 (en pointillé sur la Figure 76), ce qui a rendu l'interprétation de l'essai biaxial TC34 partielle (à partir des jauges axiales et des jauges orthoradiales J2, J6 et J11) malgré un temps de séchage suffisant.

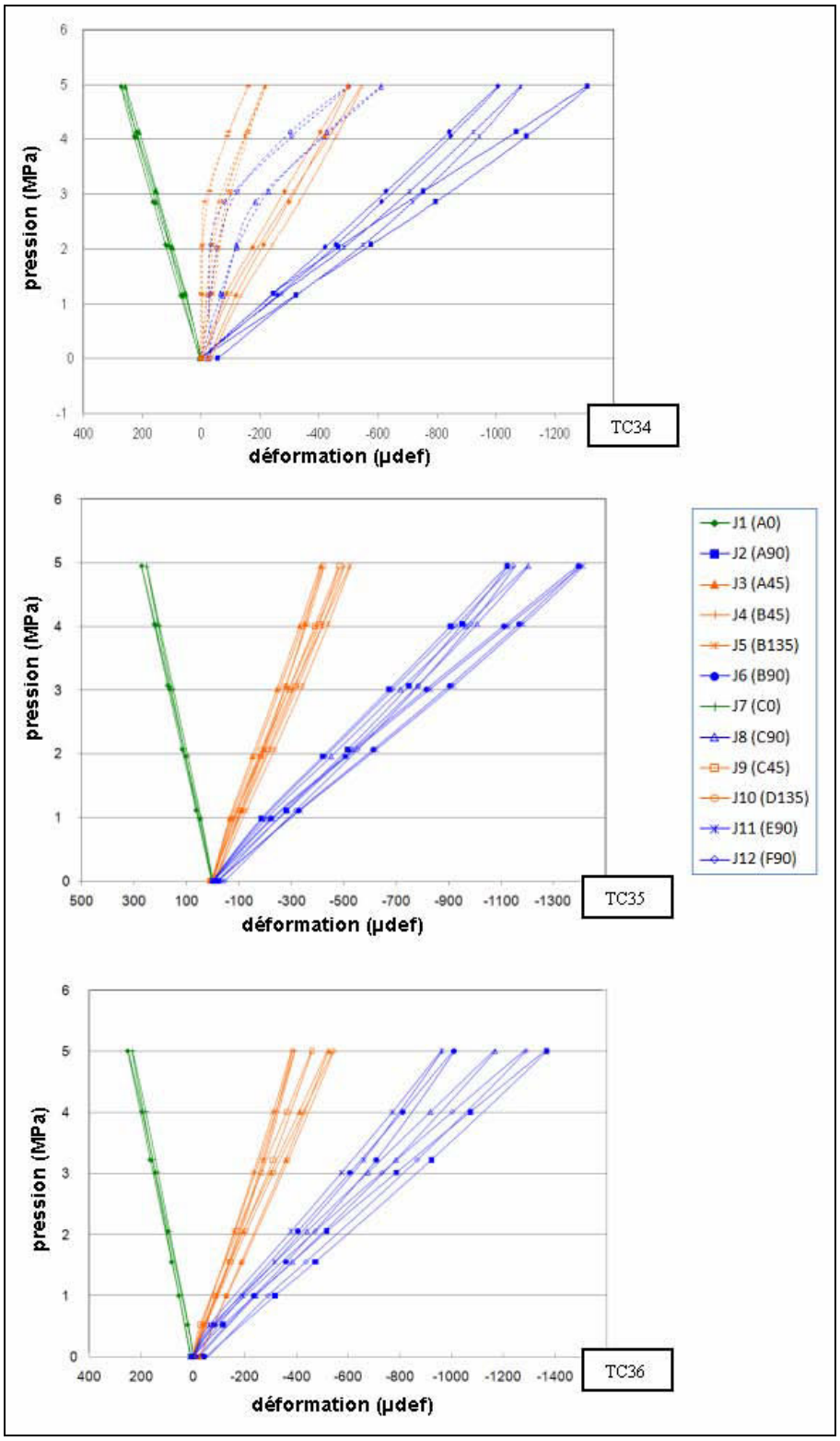


Figure 76 : Courbes contraintes-déformations – essais biaxiaux – Campagne 2008

5.2.2 METHODE EMPIRIQUE REPOSANT SUR L'UTILISATION « JAUGE PAR JAUGE » DE LA FORMULATION ISOTROPE DE WOROTNICKI [1993]

5.2.2.1 CAS D'UN MATERIAU ISOTROPE [WOROTNICKI, 1993]

Worotnicki [1993] propose des formules analytiques permettant de déterminer les caractéristiques élastiques isotropes d'une carotte creuse à partir des valeurs de déformations enregistrées sur les 12 jauges de la cellule CSIRO HI 12 lors d'un essai biaxial.

Ces formules reposent sur les hypothèses suivantes :

i. La carotte creuse et l'inclusion sont homogènes, avec un comportement élastique linéaire isotrope ;

ii. Le corps de la cellule et la colle ont les mêmes propriétés ;

iii. La carotte de roche creuse et l'inclusion creuse ont chacun une forme cylindrique et sont concentriques ;

iv. La pression radiale générée par la cellule de Hoek-Franklin (cellule biaxiale) est uniformément répartie sur toute la surface externe du cylindre creux en roche.

Les formules proposées par Worotnicki [1993] consistent en un système de deux équations à deux inconnues. La résolution de ces équations permet de déterminer les caractéristiques élastiques de la roche E_r et ν_r. Ces équations font appel aux déformations orthoradiales et à la déformation axiale. Au cours d'un essai biaxial idéal, les déformations enregistrées sur les deux jauges axiales sont toujours identiques (ε_{zz}). Lorsque la roche est isotrope, les cinq jauges orthoradiales de la cellule CSIRO donnent la même valeur de déformation ($\varepsilon_{\theta\theta}$). Les déformations enregistrées sur les jauges inclinées donnent aussi des valeurs identiques ($\varepsilon_{\pm 45}$). Nous rappelons que dans ce cas, la déformation mesurée sur une jauge inclinée s'écrit en fonction de la déformation axiale et de la déformation axiale orthoradiale. Ceci est illustré par l'équation *(4)* (§ 2.4.5) : $\varepsilon_{\pm 45°} = (\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz})/2$.

Nous reprenons ici l'équation *(5)* citée dans le § 2.4.5

$$\begin{cases} \boldsymbol{E_r} = 2\boldsymbol{K}\dfrac{\boldsymbol{R_{ext}^2}}{\boldsymbol{R_{ext}^2} - \boldsymbol{R_{sep}^2}}\dfrac{\boldsymbol{P}}{\varepsilon_{\theta\theta}} \\ \nu_{\boldsymbol{r}} = -\boldsymbol{K}\dfrac{\varepsilon_{\boldsymbol{zz}}}{\varepsilon_{\theta\theta}} \end{cases}$$

P : la pression radiale uniforme appliquée sur la surface externe de la carotte ;

R_{ext} : rayon externe de la carotte de roche (voir Figure 4, § 2) ;

R_{sep} : position radiale de l'interface roche-inclusion (voir Figure 4, § 2);

K : coefficient correcteur qui tient compte de la présence de l'inclusion.

$$\boldsymbol{K} = \frac{\mu\boldsymbol{n} + 1 - 2\nu_c}{\left[\boldsymbol{e}(1-\boldsymbol{n})(\boldsymbol{M} + 1 - 2\nu_r)/(\boldsymbol{M} - 1)\right] + \boldsymbol{n} + 1 - 2\nu_c} \qquad (10)$$

E_c = 2600 MPa : module de Young de l'inclusion ;

ν_c = 0,4 : coefficient de Poisson de l'inclusion ;

$$\mu = \frac{R_{sep}^2}{R_{jge}^2} \qquad (11)$$

R_{jge} : position radiale des jauges (voir Figure 4, § 2) ;

$$n = \frac{R_{\text{int}}^2}{R_{sep}^2} \qquad (12)$$

R_{int} : rayon intérieur de l'inclusion (voir Figure 4, § 2) ;

$$e = \frac{G_c}{G_r} = \frac{E_c\left[2 + (1 + \nu_r)\right]}{E_r\left[2 + (1 + \nu_c)\right]} \qquad (13)$$

G_r : module de cisaillement de la roche ;

G_c : module de cisaillement de l'inclusion ;

$$M = \frac{R_{ext}^2}{R_{sep}^2} \qquad (14)$$

5.2.2.2 TENTATIVE DE GENERALISATION AU CAS D'UN MATERIAU ANISOTROPE LORSQUE L'AXE DE LA CAROTTE CREUSE SE TROUVE DANS LE PLAN D'ANISOTROPIE : METHODE JAUGE PAR JAUGE

Dans le cas où l'axe de la carotte creuse est orienté dans le plan d'anisotropie, les jauges axiales de la cellule CSIRO sont toutes orientées dans ce même plan. Deux des jauges orthoradiales se trouvent orientées de telle sorte que l'une est quasiment parallèle au plan d'anisotropie alors que l'autre lui est quasiment perpendiculaire (Figure 77). L'écart angulaire avec la position réelle est au maximum de 11°. Dans ce cas, une manière d'estimer les caractéristiques élastiques isotropes transverses de la roche consiste à faire l'hypothèse que la jauge dans la direction parallèle et la jauge dans la direction perpendiculaire au plan d'anisotropie, chacune d'elles considérés séparément, le comportement de la roche était isotrope. Nous appliquons ainsi les formules (5) et (10) aux jauges orthoradiales correspondantes. Par la suite, nous pouvons déterminer le module de cisaillement à partir de la formule de St-Venant.

Nous reprenons ici l'équation *(6)* citée dans le § 2.4.5 :

$$\begin{cases} \boldsymbol{E}_1 = 2\boldsymbol{K}\dfrac{\boldsymbol{R}_{ext}^2}{\boldsymbol{R}_{ext}^2 - \boldsymbol{R}_{sep}^2}\dfrac{\boldsymbol{P}}{\varepsilon_{\theta\theta}^{\perp}} \\ \boldsymbol{E}_2 = 2\boldsymbol{K}\dfrac{\boldsymbol{R}_{ext}^2}{\boldsymbol{R}_{ext}^2 - \boldsymbol{R}_{sep}^2}\dfrac{\boldsymbol{P}}{\varepsilon_{\theta\theta}^{//}} \\ \nu_{12} = -\boldsymbol{K}\dfrac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{\theta\theta}^{//}} \\ \nu_{23} = -\boldsymbol{K}\dfrac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{\theta\theta}^{\perp}} \\ \boldsymbol{G}_{12} = \dfrac{\boldsymbol{E}_1\boldsymbol{E}_2}{\boldsymbol{E}_1 + \boldsymbol{E}_2(1+2\nu_{12})} \end{cases}$$

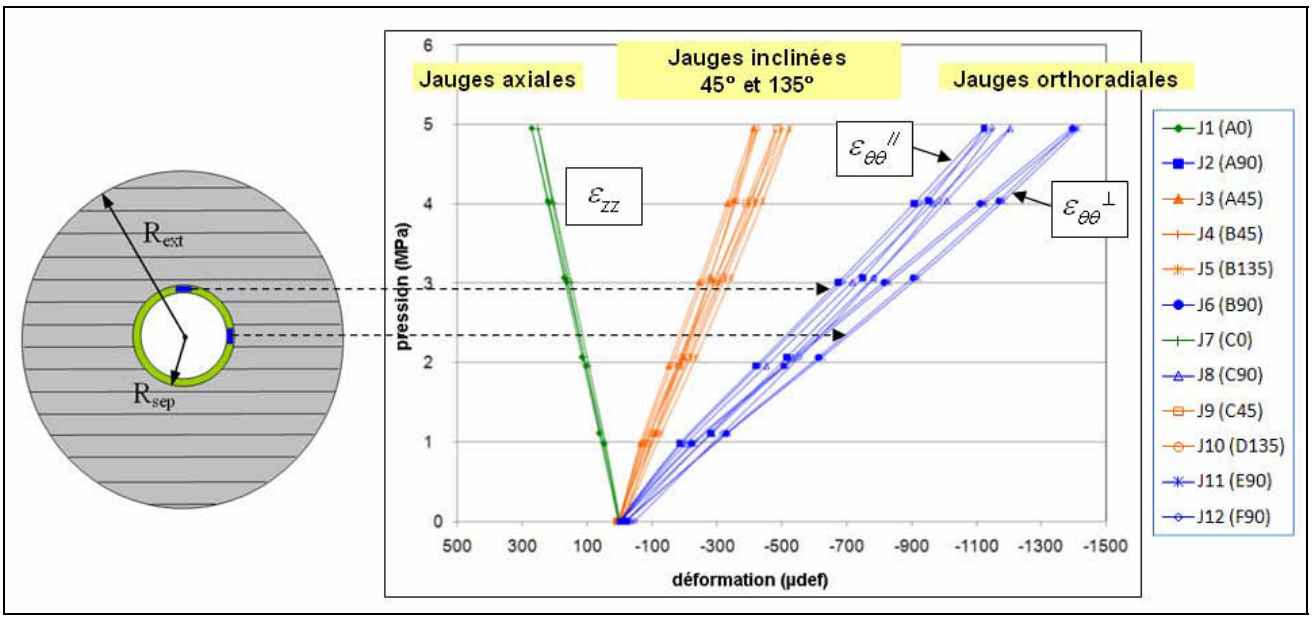


Figure 77 : Coupe transversale de la carotte au niveau du plan de mesure - Jauge parallèle & jauge perpendiculaire à la stratification - Courbes contraintes-déformations obtenues lors de l'essai biaxial. Cas particulier d'un forage orienté dans le plan d'anisotropie, de la jauge J11 dans la direction parallèle et la jauge J2 dans la direction perpendiculaire au plan d'anisotropie

A partir de ces formules et en utilisant les courbes obtenues lors de l'essai biaxial (Figure 77) nous pouvons déterminer en première approximation les caractéristiques élastiques isotropes transverses de l'argilite de Tournemire (Tableau 14). Les courbes des jauges orthoradiales (Figure 77) nous renseignent sur le niveau d'anisotropie de la roche. En effet, dans le cas d'une roche homogène, plus les courbes sont écartées les unes des autres, plus la roche est

anisotrope. Dans le cas particulier d'une roche isotrope, ces courbes se superposent.

La comparaison entre les caractéristiques élastiques isotropes transverses de l'argilite de Tournemire déterminées à partir de l'interprétation de deux essais biaxiaux (réalisés dans les conditions du site) en utilisant la méthode citée précédemment (méthode jauge par jauge) et celles déterminées par essais mécaniques sur échantillons en laboratoire [Rejeb *et al.*,, 1999] montre une différence entre le rapport d'anisotropie A_E (Tableau 14). Nous constatons que le module de Young E_1 pour les deux types d'essais est similaire. La différence réside au niveau du module de Young E_2. A ce stade du rapport, il est possible que la différence entre les résultats des deux types d'essai soit due à la méthode d'interprétation simplifiée (hypothèses simplificatrices critiquables) utilisée pour l'interprétation des courbes de l'essai biaxial.

	Réf.	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
		$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Méthode « jauge par jauge »	TC35	8600	10900	0,25	0,2	3757	1,27
	TC36	9400	12800	0,26	0,19	4170	1,36
Interprétation personnelle d'après Rejeb *et al.*, [1999]		9266 ± 564	19505 ± 1840	0,22 ± 0,08	0,20 ± 0,07	3942 ± 575	1,92 ± 0,18*

Tableau 14 : Comparaison entre les caractéristiques élastiques déterminées à partir de l'essai biaxial (formulation isotrope « jauge par jauge ») et celles déterminées par les essais en laboratoire

5.2.3 METHODE D'INVERSION ANALYTIQUE-ITERATIVE PROPOSEE PAR SOULEY [2008] DANS LE CAS ISOTROPE TRANSVERSE

Dans le cas particulier d'un forage parallèle au plan d'anisotropie, Souley a pu déterminer un jeu de caractéristiques élastiques pour l'argilite de Tournemire à partir de l'interprétation de l'essai biaxial en utilisant les formulations analytiques de Worotnicki [1999] « corrigées » [Souley, 2008] pour les roches isotropes transverses adaptées à une telle orientation du forage. En effet cet auteur a apporté des corrections sur les formules proposées par Worotnicki [1999] par analogie avec la formulation de Berry [1968] (carotte isotrope transverse, sans inclusion) et Duncan-Fama et Pender (carotte isotrope avec inclusion).

Cependant ces formules reposent sur certaines hypothèses :

I. La colle et le corps de la cellule ont les mêmes propriétés ;
II. La carotte creuse en roche et l'inclusion creuse ont chacun une forme cylindrique et sont concentriques ;
III. La carotte soumise à l'essai biaxial est assimilée à un cylindre creux épais de longueur infinie

IV. La pression radiale générée par la cellule de Hoek-Franklin (cellule biaxiale) est uniformément répartie sur toute la surface externe du corps de la roche.

V. La carotte se déforme en condition de déformations planes généralisées ;

VI. La distribution des contraintes dans la carotte est en condition de contraintes planes

VII. La résolution du système d'équation se fait :

- en considérant 5 paramètres indépendants et en ajoutant l'hypothèse d'un rayon externe infini ;
- ou bien, en considérant seulement 4 paramètres indépendants (G12 s'écrit en fonction des 4 autres en utilisant l'hypothèse de St-Venant) et en gardant le rayon externe fini pour la carotte.

En plus de ces hypothèses, les formules contiennent des coefficients correcteurs pour la prise en compte de l'inclusion K_1, K_2, K_3 et K_4. Ces coefficients intègrent dans leurs expressions le module de Young de la roche et ne sont explicités que pour le cas des roches isotropes [Souley, 2008]. Pour surmonter ce problème, Worotnicki [1999] propose de considérer dans l'expression des coefficients correcteurs, la valeur moyenne des modules de Young lorsque la roche est anisotrope. Cette dernière remarque rend impossible la résolution analytique du système d'équations. L'auteur propose donc des itérations pour déterminer le jeu de paramètres, en essayant de minimiser l'écart (inférieur à 10%) entre les déformations calculées et celles mesurées, d'où l'appellation d'une méthode analytique-itérative. Ce travail est en cours.

D'autres formulations et méthodes de résolutions ont été proposées par différents auteurs (ANNEXE C) pour la détermination des caractéristiques élastiques d'une roche anisotrope. Cependant cette méthode reste la plus appropriée dans le cas particulier d'un forage parallèle au plan d'anisotropie.

Un travail de modélisation de l'essai (voir § 5.3) montre que la distribution des contraintes dans l'annulaire de l'inclusion n'est pas en contrainte plane. En effet, s'il est vrai que la contrainte axiale (σ_{zz}) dans l'annulaire roche est nulle, en revanche elle est différente de zéro dans l'inclusion (ANNEXE U-2, Figure 183). Cette constatation rend encore une fois de plus les formulations analytiques de Worotnicki [1993] ainsi que celles d'autres auteurs (ANNEXE C) très critiquables puisque l'hypothèse des contraintes planes dans l'inclusion est utilisée dans un grand nombre des travaux qui figurent dans la littérature.

Souley propose dans le Tableau 15 les jeux de paramètres pour chacun des essais TC35 et TC36, avec un écart entre les déformations mesurées et celles calculées en utilisant ces paramètres pouvant atteindre 7,2% pour l'essai TC35 et 9,6% pour l'essai TC36. Nous remarquons que ces jeux de paramètres sont identiques à ceux déterminés par la méthode jauge par jauge (voir § 5.2.2.2), encore une fois le rapport d'anisotropie proposé par cette nouvelle méthode d'interprétation de l'essai biaxial reste inférieur à celui déterminé par les essais en laboratoire. Ceci conduit à mettre en doute la méthode d'interprétation simplifiée de Worotnicki. Nous avons donc développé une méthode d'interprétation reposant sur des hypothèses moins fortes.

	Ref	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
		$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Méthode « jauge par jauge »	TC35	8600	10900	0,25	0,2	3757	1,27
	TC36	9400	12800	0,26	0,19	4170	1,36
Souley (2008)	TC35	7954	10199	0,29	0,18	3327	1,28
	TC36	8893	12769	0,29	0,18	3917	1,44
Interprétation personnelle d'après Rejeb *et al.*, [1999]		9266 ± 564	19505 ± 1840	0,22 ± 0,08	0,20 ± 0,07	3942 ± 575	1,92 ± 0,18*

Tableau 15 : Comparaison entre les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire déterminées à partir de l'essai biaxial (formulation isotrope jauge par jauge et inversion analytique-itérative isotrope transverse) et celles déterminées par les essais en laboratoire

5.3 VALEURS DEDUITES DES ESSAIS BIAXIAUX DE 2005-2006 ET 2008 EN UTILISANT UNE MODELISATION NUMERIQUE PRENANT EN COMPTE L'ANISOTROPIE DE LA CAROTTE

5.3.1 PRINCIPE DE LA METHODE

Pour vérifier si le faible rapport d'anisotropie obtenu lors des essais biaxiaux est dû ou non aux hypothèses simplificatrices des méthodes présentées au § 5.2, nous avons abordé différemment le problème en recourant à la modélisation numérique de l'essai biaxial sous l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire isotrope transverse de la roche. Nous avons utilisé pour cela le code de calcul aux éléments finis CESAR_LCPC et son pré-processeur CLEO.

Nous avons cherché à reproduire au mieux par modélisation les courbes de déformations orthoradiales et axiales obtenues lors des essais biaxiaux (Figure 76) en procédant à une exploration « manuelle » mais systématique de l'espace des caractéristiques élastiques isotropes transverses. Nous avons pu dresser des abaques qui nous ont permis de cibler notre recherche des caractéristiques élastiques isotropes transverses optimales à partir de la modélisation de l'essai biaxial [Ben Ouanas *et al.*, 2010]. Ce travail nous a permis d'éviter une exploration aléatoire de l'espace des paramètres (5 paramètres indépendants) de type Monte-Carlo.

Comme valeurs de départ, nous utiliserons les caractéristiques élastiques anisotropes obtenues par des essais en laboratoire (voir § 5.1.6), puis l'inversion des essais biaxiaux réalisés pendant la campagne de 2008. Les déformations calculées numériquement pour un chargement de 5 MPa seront comparées à celles mesurées au cours des essais biaxiaux. Dans un second temps, à partir de l'exploration de l'espace des caractéristiques élastiques isotropes transverses,

nous essayerons d'en déduire le jeu de paramètres qui décrit au mieux le comportement de l'argilite au cours de l'essai biaxial.

Nous avons utilisé dans l'exploration des caractéristiques élastiques des abaques numériques pour identifier le jeu de paramètres le plus approprié d'une manière systématique. A chaque étape et pour chaque jeu de paramètres nous avons calculé l'indice d'écart ξ, définit par :

$$\xi = \max_{i=1...12} \left| \frac{\varepsilon_i^{\text{model}} - \varepsilon_i^{\text{mesure}}}{\varepsilon_i^{\text{mesure}}} \right| \qquad (15)$$

$\varepsilon_i^{\text{model}}$: déformation obtenue par la modélisation ;

$\varepsilon_i^{\text{mesure}}$: déformation mesurée.

Le principe de cette méthode est de trouver le jeu de paramètres élastiques qui minimise au mieux l'indice d'écart ξ [Ben Ouanas *et al.*, 2010].

5.3.2 PRESENTATION DU MODELE NUMERIQUE

La Figure 78 présente le modèle que nous avons adopté pour reproduire l'essai biaxial.

- Diamètre du trou pilote (diamètre interne) : ϕ_1 = 38 mm ;
- Diamètre externe : ϕ_2 = 122 mm ;
- Longueur du modèle : L = 400 mm

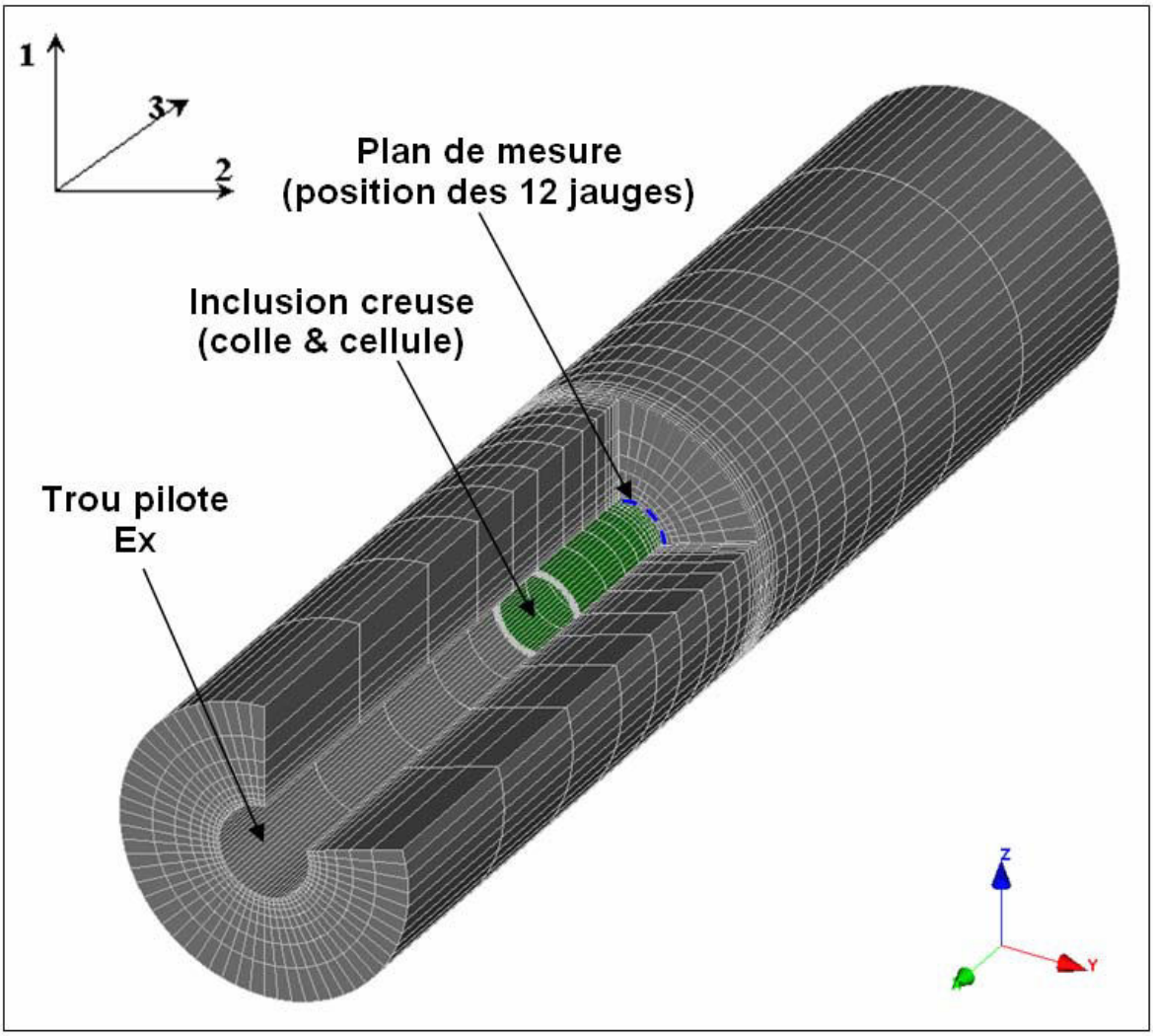


Figure 78 : Représentation du modèle 3D de l'essai biaxial

Les différentes techniques adoptées pour générer le modèle 3D de l'essai biaxial sont détaillées dans l'ANNEXE U-1.

L'étude se voulant essentiellement phénoménologique dans un premier temps, l'inclusion creuse n'a pas été prises en compte dans la modélisation. Nous montrons que cette simplification est justifiée dans la mesure où l'effet de l'inclusion (voir Figure 79) ne dépasse pas 7% sur les déformations enregistrées sur les jauges orthoradiales et 1% sur les jauges axiales dans le cas des essais TC35 et TC36 (voir § 5.3.4).

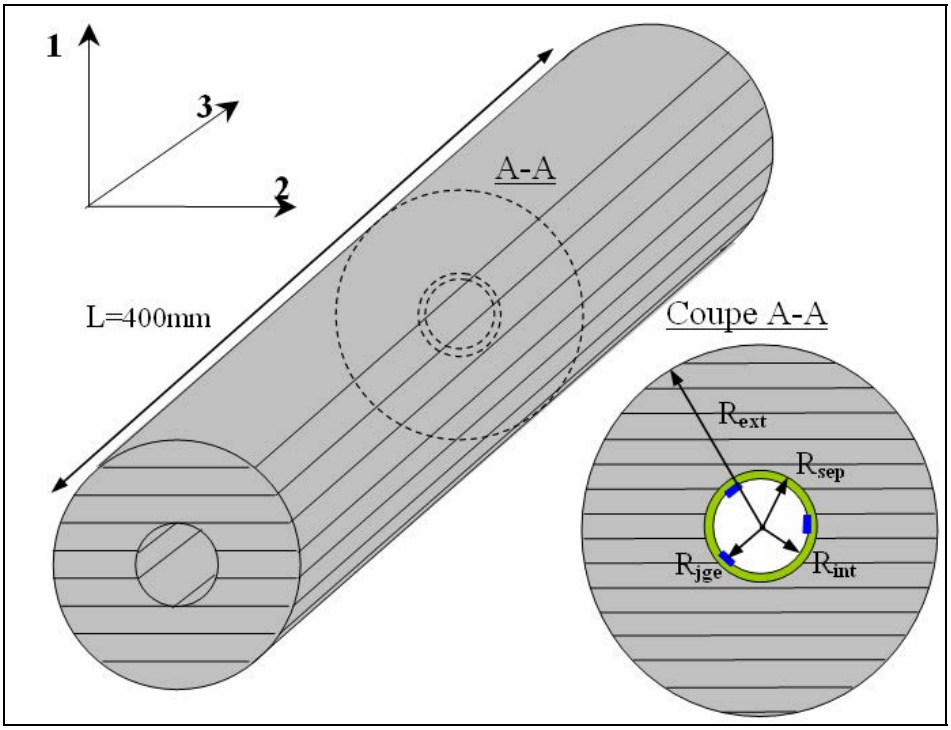


Figure 79 : (a) schéma 3D du modèle avec inclusion, (b) section transversale du modèle en présence des deux corps concentriques : roche – inclusion [Ben Ouanas et al., 2010].

Les vérifications du modèle et les différentes étapes de calcul sont exposées en ANNEXE U-2.

5.3.3 UTILISATION DU MODELE POUR DETERMINER LES CARACTERISTIQUES ELASTIQUES ISOTROPES TRANSVERSES A L'AIDE D'ABAQUES

En partant d'un jeu de paramètres initial, nous déterminons les modules d'élasticité E_1 et E_2 à partir des déformations orthoradiales $\varepsilon_{\theta\theta}$ et les coefficients de poisson ν_{12} et ν_{23} à partir des déformations orthoradiales et axiales ε_{zz} en utilisant des abaques tracés à l'aide de modèles numériques. Enfin, nous ajustons le module de cisaillement G en nous basant sur les essais biaxiaux TC35-1440 et TC36-1530.

Nous avons utilisé dans la détermination des caractéristiques élastiques de la roche seulement les déformations des jauges orthoradiales et axiales (Tableau 17). En effet, dans le cas d'un forage parallèle au plan d'anisotropie et selon Worotnicki [1993] les déformations des jauges inclinées s'écrivent en fonctions des autres déformations, selon la formule *(4)* : $\varepsilon_{\pm 45°} = (\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz})/2$.

Cependant, dans le calcul de l'indice d'écart nous avons considéré la totalité des douze jauges.

	$\varepsilon_{\theta\theta}$ (max) *[µdef]*				
	J2 (A90)	*J6 (B90)*	*J8 (C90)*	*J11 (E90)*	*J12 (F90)*
TC35-1440	**-1123**	**-1394**	**-1204**	**-1411**	**-1149**

	ε_{zz} (max) *[µdef]*	
	J1 (A0)	*J7 (C0)*
TC35-1440	**271**	**252**

Tableau 16 : Valeurs des déformations maximales enregistrées lors de l'essai biaxial, carotte TC35 (Pression = 5 MPa)

	$\varepsilon_{\theta\theta}$ (max) *[µdef]*				
	J2 (A90)	*J6 (B90)*	*J8 (C90)*	*J11 (E90)*	*J12 (F90)*
TC36-1530	**-1367**	**-1009**	**-1168**	**-962**	**-1286**

	ε_{zz} (max) *[µdef]*	
	J1 (A0)	*J7 (C0)*
TC36-1530	***235***	***252***

Tableau 17 : Valeurs des déformations maximales enregistrées lors de l'essai biaxial, carotte TC35 (Pression = 5 MPa)

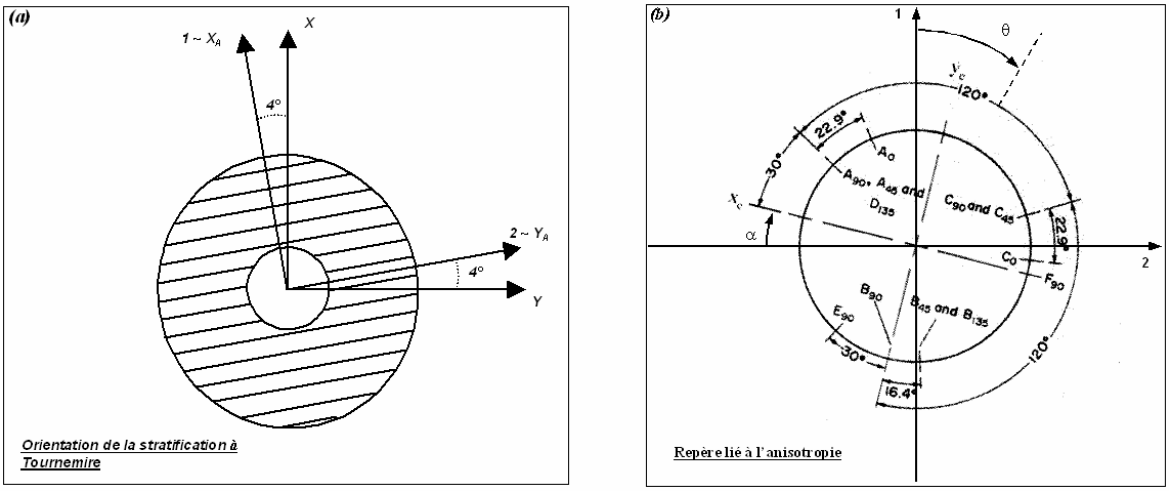


Figure 80 : (a) Orientation de la stratification à Tournemire ; (b) Repérage des jauges de mesure de la cellule CSIRO dans le repère lié à l'anisotropie

TC35-1440 α = 72°

N° de jauge		$\theta_{(anisotropie)}$
1	**A0**	38,9
2	**A90**	16
3	**A45**	16
4	**B45**	239,6
5	**B135**	239,6
6	**B90**	256
7	**C0**	158,9
8	**C90**	136
9	**C45**	136
10	**D135**	16
11	**E90**	286
12	**F90**	166

TC36-1530 α = 162°

N° de jauge		$\theta_{(anisotropie)}$
1	**A0**	128,9
2	**A90**	106
3	**A45**	106
4	**B45**	329,6
5	**B135**	329,6
6	**B90**	346
7	**C0**	248,9
8	**C90**	226
9	**C45**	226
10	**D135**	106
11	**E90**	16
12	**F90**	256

Tableau 18 : Position des jauges (orthoradiales, axiales et inclinées 45° et 135°) dans le repère lié à l'anisotropie

5.3.3.1 INITIALISATION DES PARAMETRES ELASTIQUES

Avec les caractéristiques élastiques déterminées à partir des essais en laboratoire (§ 5.1.6), la comparaison entre les déformations calculées et celles mesurées donne une valeur de ξ de 44% (ANNEXE V). Ceci montre que la détermination des caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire à partir d'essais uniaxiaux-triaxiaux sur des petites éprouvettes en laboratoire, ne suffit pas pour reproduire le comportement de cette roche lors d'un essai biaxial.

En utilisant les caractéristiques élastiques déterminées à partir de l'interprétation « jauge par jauge », l'erreur est de 25% seulement. L'objectif a été par la suite de diminuer encore cette erreur (jusqu'à ce qu'elle soit inférieure à 5%) en ajustant les caractéristiques élastiques.

5.3.3.2 ESTIMATION DES MODULES DE YOUNG E_2 ET E_1 PAR AJUSTEMENT DES DEFORMATIONS ORTHORADIALES

Pour commencer, nous nous sommes intéressés aux mesures de deux jauges orthoradiales respectivement la plus parallèle (mesure $\varepsilon_{\theta\theta}^{//}$) et la plus perpendiculaire (mesure $\varepsilon_{\theta\theta}^{\perp}$) au plan d'anisotropie (voir Figure 77). Un grand nombre de simulations numériques nous montre que dans le cas d'un forage parallèle au plan d'anisotropie, ces mesures sont essentiellement contrôlées par les modules de Young et permettent donc de déterminer ces paramètres. Nous avons utilisé pour cela un abaque (Figure 81) que nous avons construit en réalisant des modélisations numériques pour différentes valeurs de E_1 et E_2, en ayant fixé les coefficients de Poisson et le module de cisaillement du jeu de paramètres initial (§ 5.3.3.1). A partir de cet abaque et comme le montre la Figure 81, nous déterminons E_1 et E_2 pour chaque essai TC35 et TC36 en utilisant $\varepsilon_{\theta\theta}^{//}$ et $\varepsilon_{\theta\theta}^{\perp}$ correspondant.

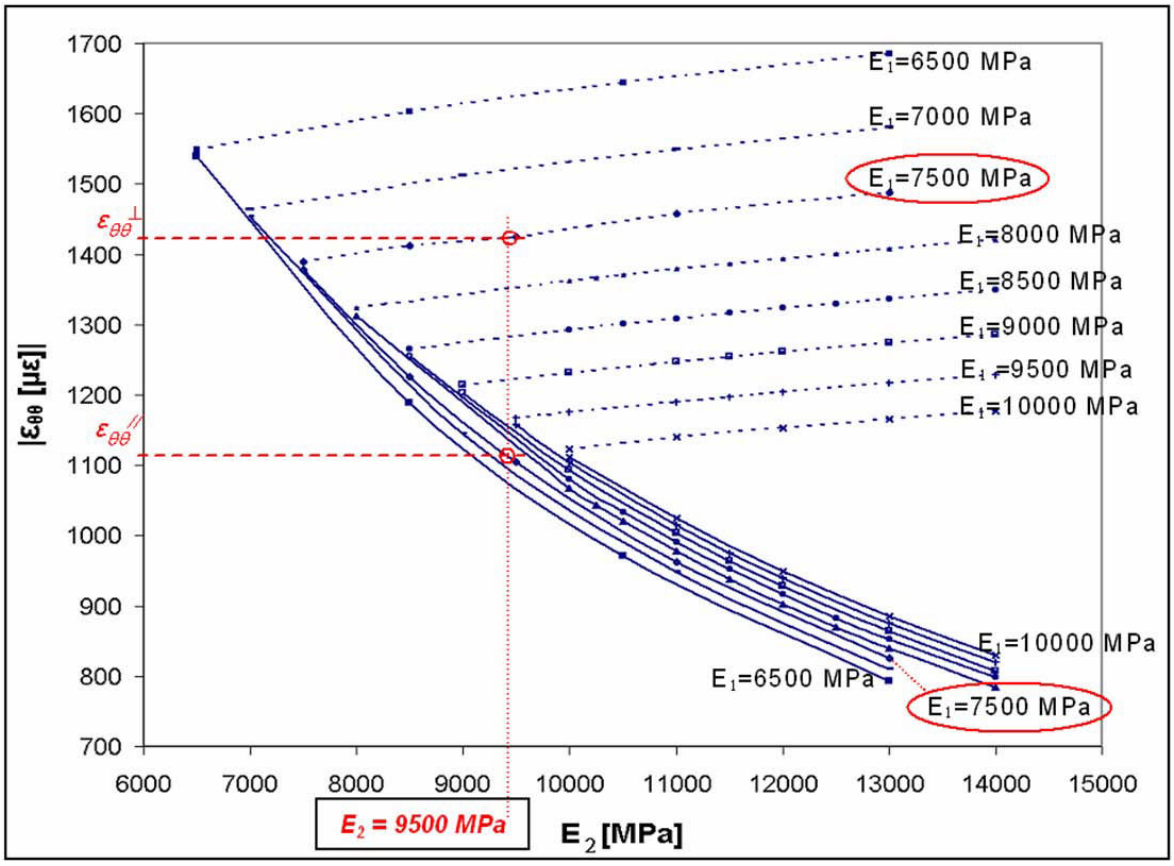


Figure 81 : Abaque numérique pour la détermination des modules de Young E_2 ($E_{//}$) et E_1 ($E_{\perp}$) à partir des déformations des jauges orthoradiale ($\varepsilon_{\theta\theta}^{//}$ et $\varepsilon_{\theta\theta}^{\perp}$). Cet abaque représente les déformations orthoradiales ($\varepsilon_{\theta\theta}^{//}$ en continue et $\varepsilon_{\theta\theta}^{\perp}$ en pointillés) en fonction du module de Young E_2 ($E_{//}$) pour un module de Young E_1 ($E_{\perp}$) donné [Ben Ouanas et al., 2010]

5.3.3.3 ESTIMATION DES COEFFICIENTS DE POISSON ν_{12} ET ν_{23} PAR AJUSTEMENT DES DEFORMATIONS AXIALES

La deuxième étape de ce travail a consisté à déterminer les coefficients de Poisson ν_{12} et ν_{23} à partir des déformations des deux jauges axiales en utilisant un autre abaque numérique. Nous avons donc construit un autre abaque numérique (voir Figure 82) en fixant les modules de Young E_1 et E_2 déterminés à partir de l'étape précédente (§ 5.3.3.2) et le module de cisaillement du jeu de paramètres initial (§ 5.3.3.1). A partir de cet abaque et en utilisant les déformations enregistrées sur les deux jauges axiales $\varepsilon_{zz}(J1)$ et $\varepsilon_{zz}(J7)$ nous déterminons ν_{12} et ν_{23}. Cependant, lors d'un essai biaxial les déformations enregistrées sur les jauges axiales sont identiques $\varepsilon_{zz}(J1) = \varepsilon_{zz}(J7) = \varepsilon_{zz}$ (voir Figure 76), ce qui fait apparaître une indétermination au niveau de la recherche du couple (ν_{12} ; ν_{23}) comme le montre la Figure 82.

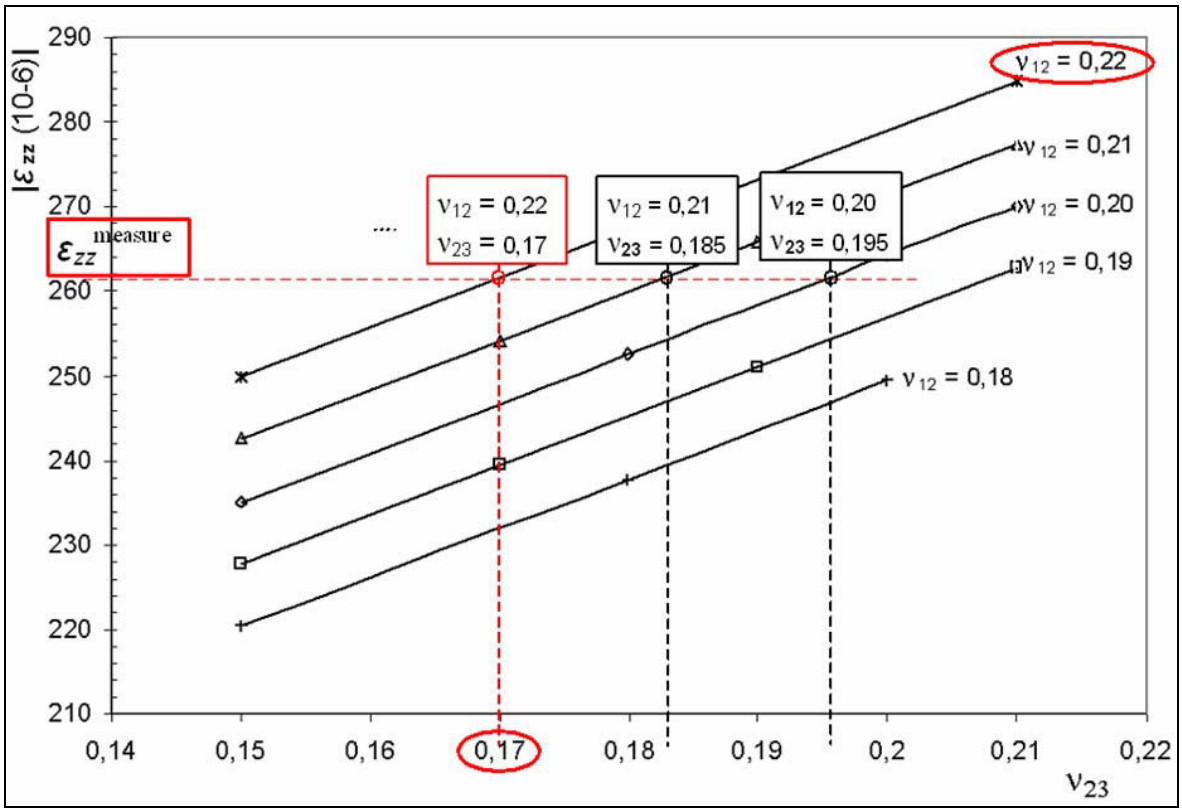


Figure 82 : Abaque numérique pour la détermination des coefficients de Poisson ν_{12}, ν_{23} à partir de la déformation axiale (ε_{zz}). Cet abaque représente la variation de la déformation axiale (ε_{zz}) en fonction du coefficient de Poisson ν_{23} pour un coefficient de Poisson ν_{12} donné [Ben Ouanas et al., 2010a]

Cette indétermination n'a pu être anticipée puisque Worotnicki [1993] confirme qu'il peut déterminer analytiquement (en émettant différentes hypothèses, voir § 5.2.3) les 5 caractéristiques élastiques isotropes transverses en utilisant la cellule CSIRO dans le cas particulier d'un forage parallèle au plan d'anisotropie. Par contre, il affirme que dans le cas d'un forage perpendiculaire au plan

d'anisotropie seuls trois des cinq paramètres (E_1, E_2 et ν_{12}) peuvent être déterminés. Il préconise pour déterminer ν_{23} et G_{12} soit des essais biaxiaux supplémentaires à différentes orientations, soit des essais de laboratoire. Notre travail numérique (Figure 82) montre cependant que dans le cas particulier d'un forage parallèle au plan d'anisotropie, il demeure une indétermination sur les deux coefficients de Poisson ν_{12} et ν_{23}. Contrairement aux notes de Worotnicki [1993] et met en doute encore une fois la pertinence de ses équations (corrigées par Souley [2008]).

Pour surmonter cette indétermination nous avons sélectionné à partir de la Figure 82 les couples (ν_{12} ; ν_{23}) les plus proches de ceux déterminés à partir de l'étape d'initialisation des paramètres (§5.3.3.1).

5.3.3.4 AJUSTEMENT FINAL A L'AIDE DU MODULE DE CISAILLEMENT

La dernière étape de ce travail consiste à réévaluer l'écart ξ (§5.3.1) en ajustant le module de cisaillement G_{12}, tout en ayant fixé les caractéristiques élastiques déterminées précédemment E_1, E_2 (§5.3.3.2) ν_{12}, ν_{23} (§5.3.3.3). L'objectif de cette dernière étape est d'obtenir un écart ξ inférieur à 5% (voir § 5.3.4).

5.3.4 RESULTATS

Nous obtenons à la fin de ce travail numérique le jeu de paramètres présenté dans le Tableau 19. Nous injectons par la suite ces paramètres dans un modèle qui contient la couche d'inclusion (§5.2.1). La comparaison entre les déformations mesurées et celles obtenues par modélisation (ANNEXE W, Tableau 37) en utilisant les paramètres du Tableau 19 montre un indice d'écart ξ de 4% pour l'essai TC35 (avec des écarts qui varient de 0% à 4%) et de 5% pour l'essai TC36 (avec des écarts qui varient de 1% à 5%).

	Ref	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
		$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Ben Ouanas *et al.*, [2010]	TC35	7500	9500	0,22	0,17	4050	1,27
	TC36	8000	11000	0,23	0,18	4300	1,38

Tableau 19 : Caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire déterminées à partir de la méthode d'interprétation numérique de l'essai biaxial [Ben Ouanas et al., 2010]

Nous avons comparé les déformations obtenues par un modèle avec inclusion avec celles obtenues par un modèle sans inclusion en utilisant les paramètres du Tableau 19. La comparaison de ces deux modèles pour l'essai TC35 et TC36 montre un écart qui ne dépasse pas 7% au niveau des jauges orthoradiales et 1% au niveau des jauges axiales (ANNEXE W, Tableau 38).

Nous remarquons que ces jeux de paramètres sont similaires à ceux déterminés par la méthode jauge par jauge et la méthode semi-analytique de Souley [2008], et que le module de Young E_2 reste faible par rapport à celui déterminé par les

essais de laboratoire (Tableau 20). Le rapport d'anisotropie déduit de cette nouvelle méthode numérique d'interprétation de l'essai biaxial reste inférieur à celui déterminé par les essais en laboratoire (Tableau 20).

	Ref	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
		$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Méthode « jauge par jauge »	TC35	8600	10900	0,25	0,2	3757	1,27
	TC36	9400	12800	0,26	0,19	4170	1,36
Souley (2008)	TC35	7954	10199	0,29	0,18	3327	1,28
	TC36	8893	12769	0,29	0,18	3917	1,44
Ben Ouanas *et al.*, [2010]	TC35	7500	9500	0,22	0,17	4050	1,27
	TC36	8000	11000	0,23	0,18	4300	1,38
Interprétation personnelle d'après Rejeb *et al.*, [1999]		9266 ± 564	19505 ± 1840	0,22 ± 0,08	0,20 ± 0,07	3942 ± 575	1,92 ± 0,18*

Tableau 20 : Comparaison entre les caractéristiques élastiques de l'argilite de Tournemire déterminées à partir de l'essai biaxial (formulation isotrope jauge par jauge, formulation analytique isotrope transverse et méthode numérique) et celles déterminées par les essais en laboratoire

A ce stade, et après avoir expérimenté trois méthodes d'interprétation de l'essai biaxial, nous avons orienté notre recherche d'explications sur l'origine de l'écart entre les résultats d'essais en laboratoire et ceux des essais biaxiaux, vers l'aspect méthodologie de l'essai biaxial et des conditions de mise en œuvre *in situ* des cellules CSIRO lors de l'essai de surcarottage (qui précède l'essai biaxial). En d'autres termes, il apparait légitime de se demander si une différence entre le rapport d'anisotropie déterminé à partir de l'essai biaxial et celui déterminé par des essais en laboratoire n'a pas déjà été observée sur des matériaux autres que l'argilite de Tournemire (schistes, grès, argilites d'autres sites, calcaires, marnes…) ?

5.4 HYPOTHESES EXPLICATIVES POSSIBLES DES ECARTS OBSERVES

5.4.1 RECHERCHE D'HYPOTHESES EXPLICATIVES

Nous avons recherché, à travers une revue de la littérature existante (campagnes INERIS et littérature internationale), si une différence entre le rapport d'anisotropie (et les modules de Young) déterminé à partir de l'essai biaxial et celui déterminé par des essais en laboratoire avait déjà été observés sur des matériaux autres que l'argilite de Tournemire.

Une revue des différentes campagnes d'essais géomécaniques (essais de surcarottage et essais biaxiaux) réalisés par l'INERIS (voir ANNEXE X) montre que dans seulement certaines campagnes les deux types d'essais (biaxiaux *in situ*

et uniaxiaux-triaxiaux en laboratoire) ont été réalisés. Ces campagnes ont montré que les modules de Young ainsi que le rapport d'anisotropie déterminés par les essais biaxiaux sont différents de ceux déterminés par des essais en laboratoire. Il s'agit des calcaires de Gardanne, des grès de Merlebarch et des gneiss de Valabre. Les modules de Young déterminés par des essais uniaxiaux-triaxiaux (en laboratoire) sont largement supérieurs à ceux déterminés par des essais biaxiaux (*in situ*), cette différence pouvant dépasser le double, résultat que nous avons nous aussi obtenu dans notre étude (voir Tableau 20).

Les auteurs ayant observé ce phénomène ont pour la plupart soupçonné l'effet d'échelle : différence importante entre les dimensions de la carotte creuse expérimentée lors de l'essai biaxial est ceux de l'éprouvette expérimentée lors des essais mécaniques en laboratoire. Certain d'entre eux ont mentionné un comportement plastique de la roche lors du passage du carottier au cours de l'essai de surcarottage précédant l'essai biaxial, sans pour autant fournir plus de détails. La méthodologie de l'essai de surcarottage et de l'essai biaxial n'a, à notre connaissance, jamais été mise en doute.

Nous retenons pour la suite de notre travail les hypothèses suivantes dans la recherche d'une explication sur ce phénomène :

1 Problème méthodologique (effet du temps de séchage de la colle, désaturation de la roche lors du forage du trou Ex ou réalisation du surcarottage avec injection d'air) ;

2 Effet d'échelle ;

3 Effet de l'endommagement lié au forage du trou Ex ;

5.4.2 MISE EN EVIDENCE *IN SITU* DE L'IMPACT DU TEMPS DE SECHAGE DE LA COLLE SUR LA VALEUR DES CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DETERMINEES PAR ESSAI BIAXIAL

Nous étudions ici l'effet du temps de séchage sur les modules de Young lors de l'essai biaxial. Nous avons tracé sur la Figure 83 la variation des modules E_2 et E_1 (déterminés à partir de la méthode d'interprétation « jauge par jauge » § 5.2.2.2) en fonction du temps de séchage. Les courbes de tendance reportées sur la Figure 83 sont incomplètes en raison de l'absence de données entre 38 heures et 96 heures de séchage. Nous remarquons que le temps de séchage a un effet considérable sur la détermination des modules de Young. En effet à faible temps de séchage, les résultats ont tendance à montrer une roche isotrope (Tableau 21).

Nous remarquons que les modules de Young varient en fonction du temps (Tableau 21) de séchage et ne se stabilisent sur un plateau qu'après un temps de séchage minimum de 95 heures (Figure 83). Or durant toutes les anciennes campagnes de surcarottage et d'essais biaxiaux en utilisant la cellule CSIRO HI-12 et la colle (résine époxy), les expérimentateurs ont pris l'habitude d'attendre le temps de séchage préconisé par le fournisseur (16 heures). Donc que ce soit en présence d'une roche isotrope ou anisotrope, les modules de Young déterminés à partir de l'essai biaxial dans ces conditions ne peuvent être considérés comme intrinsèques et représentatifs du comportement mécanique de la roche testée.

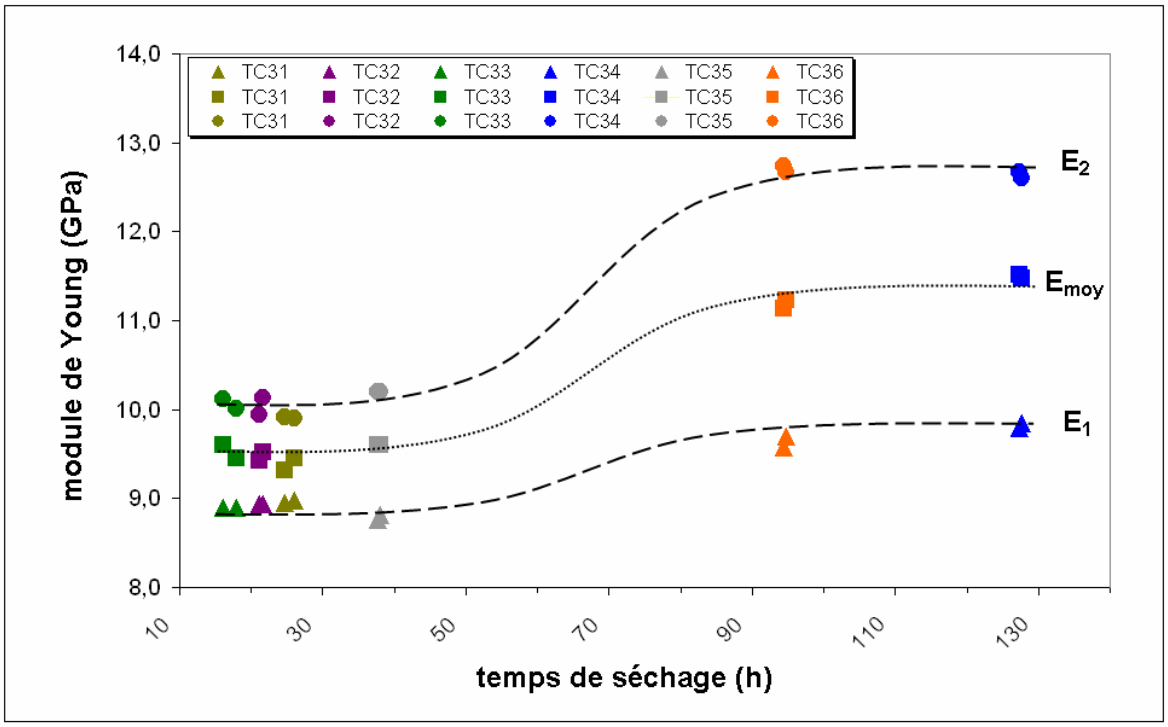


Figure 83 : Impact du temps de séchage sur la détermination des modules de Young de l'argilite de Tournemire à partir de l'essai biaxial [Ben Ouanas et al., 2010 b]

	réf	ts (h)	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	$A_E = E_2/E_1$
Essais biaxiaux	**TC31**	27	8850	9900	1,1
	TC32	22	8900	9850	1,1
	TC33	21	8800	10100	1,2
	TC35	38	8600	10900	1,3
	TC36	96	9400	12800	1,4
	TC34	127	9450	12770	1,4
Essais en Laboratoire			9266	19505	1,9*

Tableau 21 : Evolution des modules de Young et du rapport d'anisotropie en fonction du temps de séchage (ts = temps de séchage).

Il est donc nécessaire d'attendre au minimum 95 heures de temps de séchage de la colle à une température de 12°C (température du terrain sur le site de Tournemire lors de la campagne de 2008) pour pouvoir déterminer les caractéristiques élastiques exactes de la roche à partir de l'essai biaxial. Notons que 95 heures d'attente pour le séchage de la colle suivit d'un forage par injection d'air lors de l'essai de surcarottage peuvent induire une désaturation de la roche

sur la paroi du trou Ex. En effet c'est au niveau de cette paroi que les jauges de déformations sont collées. Cette désaturation peut donc être responsable de la modification locale du comportement mécanique de la roche à proximité des jauges et donc modifier les caractéristiques élastiques déterminées à partir de l'essai biaxial.

Nous remarquons enfin, que même après un temps de séchage suffisant (supérieur à 95 heures) le rapport d'anisotropie déterminé à partir de l'essai biaxial reste faible par rapport à celui déterminé par des essais en laboratoire (Tableau 21).

5.4.3 APPORTS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS EN LABORATOIRE SUR CAROTTES EN CIMENT

5.4.3.1 OBJECTIF

L'objectif de ce travail est de comparer les résultats fournis par deux types d'essais (essai biaxial et essai uniaxial-triaxial) réalisés sur un matériau a priori simple (homogène et isotrope), en s'affranchissant d'un endommagement ou une désaturation éventuels de la roche lors du creusement du trou Ex ou réalisation du surcarottage. Les résultats de ces essais permettront notamment de vérifier si l'essai de chargement biaxial sur une carotte cylindrique creuse équipée d'une cellule CSIRO permet d'obtenir des caractéristiques élastiques cohérentes avec celles déterminées en laboratoire (essais uniaxiaux ou triaxiaux) ou bien alors de confirmer l'écart entre les deux types d'essais.

5.4.3.2 DEMARCHE

Ce travail consiste à réaliser des essais biaxiaux (effectués habituellement dans les conditions du site, voir § 2.5.2) à l'aide de la cellule de Hoek-Franklin (voir § 4.2.3) et des essais uniaxiaux-triaxiaux (essais en laboratoire) sur respectivement des carottes creuses et des carottes pleines en ciment, dans le but de déterminer les caractéristiques élastiques isotropes (le module de Young E et le coefficient de Poisson ν).

5.4.3.3 PROTOCOLE

Nous reprenons dans cette partie les essais biaxiaux sur carotte creuse réalisés dans le §4.2.3 auxquels nous ajoutons les essais uniaxiaux-triaxiaux réalisés sur des éprouvettes en ciment du même mélange (voir Figure 84) dont la géométrie est représentée sur la Figure 85.

A cette occasion et dans le but d'avoir des carottes creuses et des éprouvettes pleines constitués d'un même mélange, nous avons simultanément fabriqué les éprouvettes et les carottes creuses (voir § 4.2.3.3).

Les essais uniaxiaux-triaxiaux ont été réalisés au sein du LAEGO par l'équipe de mécanique des roches.

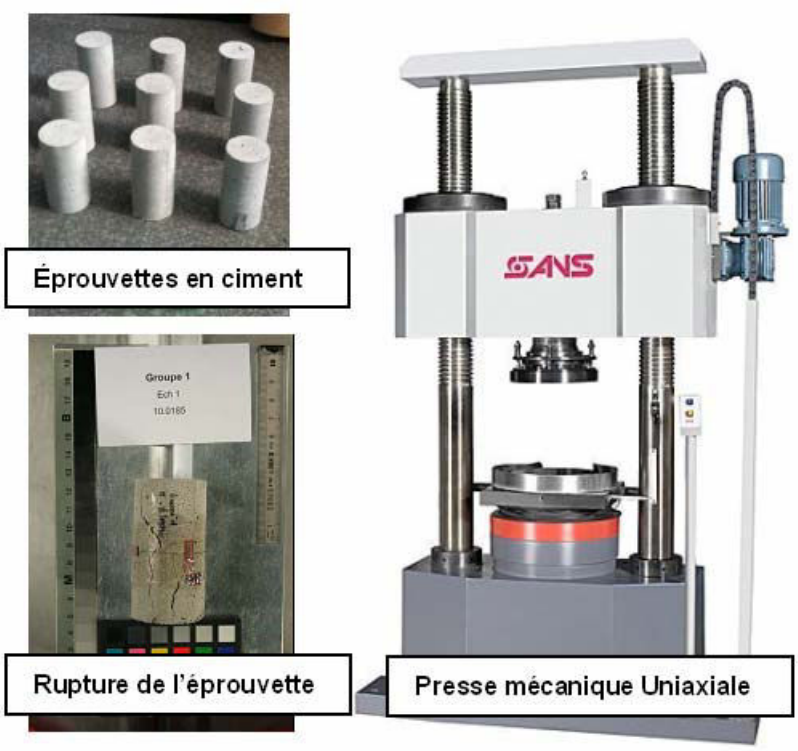


Figure 84 : Essais uniaxiaux-triaxiaux sur éprouvettes en ciment

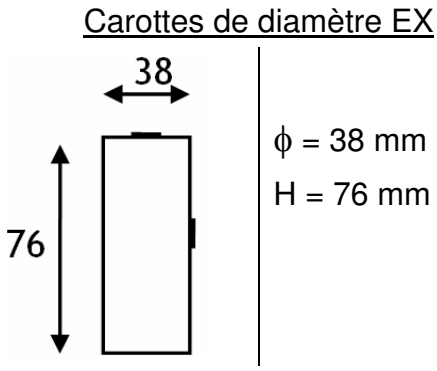


Figure 85 : Géométrie et dimensions des éprouvettes en ciment

5.4.3.4 RESULTATS DES ESSAIS SUR EPROUVETTES DE CIMENT EN LABORATOIRE

Les résultats des essais uniaxiaux et triaxiaux réalisés lors de cette campagne sur des éprouvettes en ciments en laboratoire sont regroupés en ANNEXE Y.

Les résultats des essais uniaxiaux montrent que le module de Young et les coefficients de Poisson sont presque identiques pour toutes les éprouvettes testées (à part celle du Mélange 1 – Echantillon 1) et pour les différents cycles de charge-décharge réalisés (ANNEXE Z-1, Tableau 40). Cependant, les essais triaxiaux montrent que les carottes en ciment sont sensibles au confinement : le module d'élasticité devient sensible aux différents cycles de charge-décharge sous une pression de confinement de 5 MPa (ANNEXE Z, Tableau 41).

Nous proposons dans le Tableau 22 les caractéristiques élastiques du ciment déterminées à partir de 23 essais uniaxiaux et triaxiaux réalisés sur des éprouvettes en laboratoire.

E [MPa]	ν
13930 ± 3690	0,21 ± 0,02

Tableau 22 : Caractéristiques élastiques du ciment déterminées à partir d'essais uniaxiaux-triaxiaux en laboratoire sur éprouvettes

5.4.3.5 RESULTATS DES ESSAIS BIAXIAUX SUR CAROTTES CREUSES EN CIMENT

A partir des courbes de déformations obtenues lors des essais biaxiaux réalisés sur des carottes creuses en ciment dans le § 4.2.3.3, nous avons déterminé les caractéristiques élastiques isotropes de chaque essai biaxial en utilisant les formulations analytiques de Worotnicki [1993] en isotrope. Nous remarquons sur la Figure 86 l'impact du temps de séchage sur la détermination du module de Young du ciment. En effet pour les premiers essais biaxiaux (temps de séchage insuffisant), les 5 jauges orthoradiales de la cellule CSIRO donnent des résultats dispersés, ce qui est peu cohérent pour un matériau isotrope tel que le ciment. Cependant, cette dispersion diminue jusqu'à un temps de séchage déterminé (ts = 34 heures) à partir duquel toutes les jauges orthoradiales (à part la jauge 8 qui est défectueuse) donnent les mêmes valeurs du module d'élasticité, et ce jusqu'à temps de séchage égal à 228 heures. Les caractéristiques élastiques du ciment déterminées à partir de l'essai biaxial sur carotte creuse (voir Tableau 23) sont donc celles déterminées pour un essai dont le temps de séchage est suffisant (ts ≥ 34 heures, voir Figure 86).

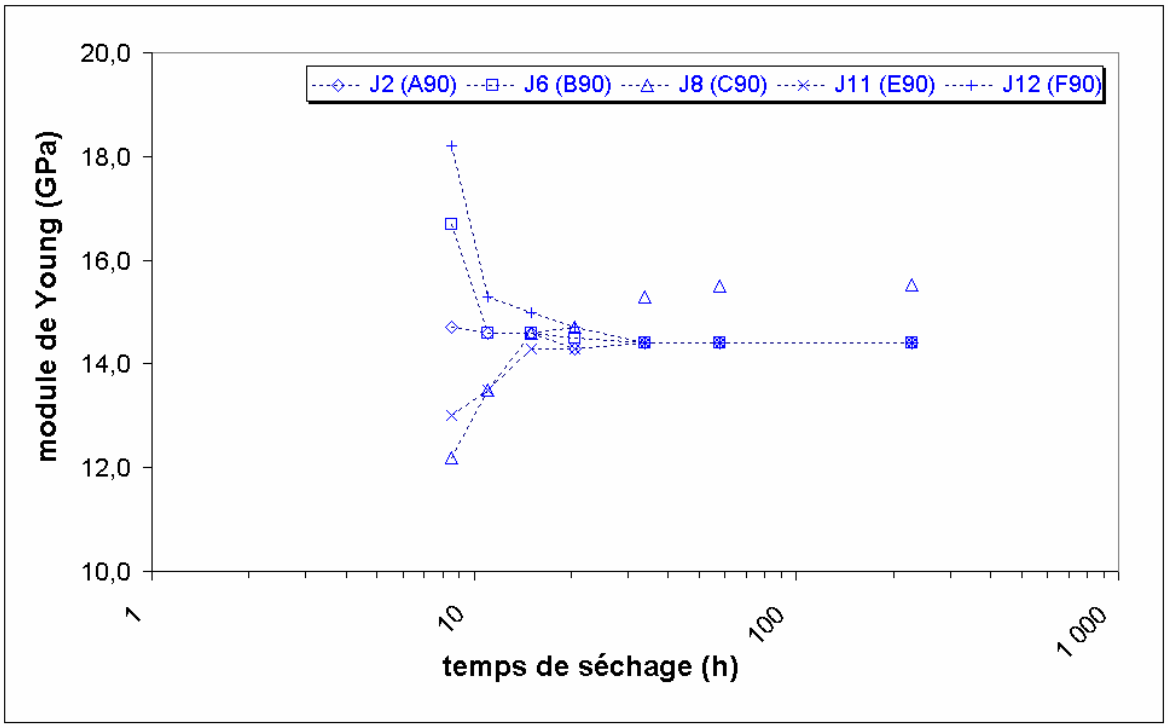


Figure 86 : Impact du temps de séchage de la colle sur la détermination du module de Young du ciment à partir de l'essai biaxial sur cylindre creux équipé d'une cellule CSIRO

E [MPa]	ν
14500	0,27

Tableau 23 : Caractéristiques élastiques du ciment déterminées à partir de l'essai biaxial en laboratoire sur cylindre creux équipé d'une cellule CSIRO

5.4.3.6 CONCLUSION

Le Tableau 24 montre que les caractéristiques élastiques du ciment déterminées par des essais uniaxiaux-triaxiaux sur des éprouvettes sont similaires à celles déterminées à partir d'essais biaxiaux sur cylindre creux muni d'une cellule CSIRO. Les résultats de cette campagne d'essais ainsi que la tenue excellente des carottes creuses de l'argilite de Tournemire (absence visible de fissure, voir Figure 24) rendent non pertinent l'implication de l'effet d'échelle ou de la méthodologie de l'essai biaxial, dans la différence entre le rapport d'anisotropie déterminé à partir des essais en laboratoire et celui déterminé à partir des essais biaxiaux.

	E [MPa]	ν
Essais uniaxiaux-triaxiaux	13930 ± 3690	0,21 ± 0,02
Essai biaxial	14500	0,27

Tableau 24 : Comparaison entre les caractéristiques élastiques du ciment déterminées à partir de l'essai biaxial sur cylindre creux et celles déterminées à partir d'essais uniaxiaux-triaxiaux sur éprouvettes

5.5 SYNTHESE

Dans l'objectif de comparer le rapport d'anisotropie A_E de l'argilite de Tournemire déterminé par des essais en laboratoire à celui déterminé par des essais *in situ*, nous avons réalisé une étude synthétique sur tous les essais de caractérisation mécanique et de mesure de vitesse réalisés jusqu'à nos jour sur ce matériau. Cette synthèse a montré que le rapport A_E est plus faible lorsqu'il est déterminé par des essais de mesure de vitesses *in situ* que lorsqu'il est caractérisé par le même type d'essai en laboratoire (Tableau 12).

Dans le but de poursuivre la recherche d'explications sur cet écart, nous nous sommes concentrés sur la caractérisation mécanique de l'argilite de Tournemire. Nous avons proposé, tout d'abord à partir de la synthèse réalisée à cette occasion, un jeu de caractéristiques élastiques isotropes transverses (Tableau 13) que nous avons jugé les plus représentatifs du comportement élastique de l'argilite de Tournemire lors d'essais mécaniques en laboratoire (essais uniaxiaux et triaxiaux sur éprouvettes). Par la suite nous nous sommes orientés vers la détermination de ces mêmes caractéristiques élastiques par des essais biaxiaux sur cylindre creux (essais réalisés dans les conditions du site) lors de la campagne d'essais de surcarottages en 2008 sur le site de Tournemire.

Dans le but de déterminer les caractéristiques élastiques isotropes transverses à partir de l'interprétation de l'essai biaxial, nous avons utilisé trois méthodes :

- Une méthode analytique simplifiée appelée « méthode jauge par jauge » ;
- Une méthode analytique-itérative qui prend en compte l'anisotropie de la roche ;
- Une méthode numérique basée sur la détermination d'abaques à partir de la modélisation 3D de l'essai biaxial.

Les caractéristiques élastiques isotropes transverses déterminées à partir de l'interprétation de deux essais TC35 et TC36 (réalisés à temps de séchage suffisant de la colle, voir § 4.3) par ces trois méthodes sont similaires (Tableau 20). Cependant le rapport d'anisotropie déterminé par l'interprétation de l'essai biaxial que ce soit par les méthodes analytiques ou la méthode numérique, reste faible par rapport à celui déterminé par des essais en laboratoire (Tableau 20).

Dans la recherche d'hypothèse explicative sur l'origine de cet écart, la consultation de la littérature a montré que cet écart a été observé sur des matériaux autres que les argilites de Tournemire. Il a été observé que les modules de Young déterminés

par des essais en laboratoire sont deux fois supérieur à ceux déterminés par des essais biaxiaux lors de campagnes réalisés sur des matériaux autres que l'argilite de Tournemire. Cette étude nous a permis de s'apercevoir que cet écart n'est pas spécifique à l'argilite de Tournemire. Notre recherche s'est alors orientée vers l'aspect méthodologique de l'essai de surcarottage (qui précède l'essai biaxial) et de l'essai biaxial, qui, à notre connaissance, n'ont jamais été mis en question :

- Problème méthodologique (effet de temps de séchage de la colle, désaturation de la roche lors du forage du trou Ex ou réalisation du surcarottage avec injection d'air) ;
- Effet d'échelle ;
- Effet de l'endommagement lié au forage du trou Ex ;

Pour répondre à ces questions, nous avons testé dans un premier temps l'effet du temps de séchage sur la détermination des modules de Young. Nous avons remarqué que les modules de Young varient en fonction du temps (Tableau 21) de séchage et ne se stabilisent sur un plateau qu'après un temps de séchage minimum de 95 heures (Figure 83). Ceci prouve que toute détermination des caractéristiques à partir de l'interprétation d'un essai biaxial réalisé à un temps de séchage insuffisant pour la colle, peut aboutir à des résultats faussés et non représentatifs du comportement du matériau expérimenté. Cependant, même après un temps de séchage suffisant (supérieur à 95 heures), le rapport d'anisotropie déterminé à partir de l'essai biaxial reste faible par rapport à celui déterminé par des essais en laboratoire (Tableau 21).

Nous nous sommes intéressés par la suite à comparer les résultats fournis par deux types d'essais (essai biaxial et essai uniaxial-triaxial) réalisés sur un matériau a priori simple (homogène et isotrope), en s'affranchissant d'un endommagement ou une désaturation éventuels de la roche lors du creusement du trou Ex ou réalisation du surcarottage. Nous avons observé une fois de plus, à partir des résultats des essais (Figure 86) l'impact du temps de séchage sur la détermination du module de Young. En effet, la colle non suffisamment sèche a tendance à « anisotropiser » le comportement d'un matériau isotrope (Figure 86), et « isotropiser » le comportement d'une roche anisotrope (Figure 83). Les caractéristiques élastiques du ciment déterminées par des essais uniaxiaux-triaxiaux sur des éprouvettes sont similaires à ceux déterminés à partir d'essais biaxiaux sur cylindre creux muni d'une cellule CSIRO. Cette campagne d'essais a donc permis d'écarter définitivement l'implication éventuelle de l'effet d'échelle ou de la méthodologie de l'essai biaxial (à condition que le temps de séchage soit suffisant) dans la différence entre le rapport d'anisotropie déterminé à partir des essais en laboratoire et celui déterminé à partir des essais biaxiaux dans le cas de l'étude de l'argilite de Tournemire.

A ce stade de l'étude deux piste restent à évoquer : endommagement de la roche lors du forage du trou Ex ou désaturation de la paroi de la roche par injection d'air lors du surcarottage. Cependant, l'analyse d'un essai réalisé à l'air (essai TC35) et d'un autre réalisé à l'huile (essai TC36) tous deux à temps de séchage suffisant (voir, § 4.1.3.2), n'a montré aucun écart significatif dans la mesure des déformations lors de l'essai de surcarottage (Figure 50) et lors de la détermination des caractéristiques élastiques lors de l'essai biaxial (Tableau 20). Un autre élément important consiste dans le protocole de foration adopté à Tournemire. En

effet, l'INERIS adopte dans les campagnes de surcarottage une foration à l'eau. Cependant, dans le cas particulier de la mauvaise tenue de l'argilite de Tournemire à l'injection d'eau, l'INERIS a adopté un protocole de surcarottage à l'air. La désaturation donc de la roche par injection d'air ne peut pas donc justifier l'écart déjà observé dans les autres campagnes (surcarottage par injection d'eau).

Donc l'hypothèse de la désaturation de la roche par injection d'air est à écarter. La piste qui reste à évoquer est celle de l'effet éventuel de l'endommagement de la roche lors du forage du trou Ex. Cette hypothèse est d'autant plus plausible que lorsque l'on détermine les caractéristiques élastiques d'une carotte creuse en ciment moulée (c'est-à-dire sans endommagement), à partir de l'essai biaxial, on retrouve bien les mêmes que ceux déterminés par des essais mécaniques (uniaxiaux et triaxiaux) en laboratoire sur des éprouvettes du même mélange.

L'endommagement éventuel de la surface de la paroi du trou Ex, sur laquelle viendront se coller les jauges, modifie localement le comportement de la roche et donc les mesures des déformations. Les micro-fissures qui apparaissent localement sur la surface du trou Ex diminuent la rigidité de la roche (et donc les modules de Young) dans cette zone et tendent donc à rendre la roche de moins au moins anisotrope. En ANNEXE Z-2 trois configurations possibles du réseau d'endommagement pouvant être détecté sur la paroi du trou Ex : réseau d'endommagement horizontal, vertical et en étoile. Des investigations sous forme de mesure de vitesse ultrasonique ou de diffractométrie de rayons X peuvent être entrepris pour identifier la configuration exacte du réseau d'endommagement responsable éventuellement de la modification des modules de Young. Ce travail n'étant pas encore réalisé et peut être cité en perspective, notre analyse favorise un réseau d'endommagement horizontal (Figure 191, ANNEXE Z-2). D'une part, ce type de réseau se concorde avec le réseau d'endommagement observé dans la paroi de la galerie EST et principale du site expérimental de Tournemire (Figure 21). D'autre part, les ouvertures horizontales apparentes sur ce type de réseau pourront être responsables, lors du chargement des carottes creuses au cours de l'essai biaxial, de la modification des modules de Young. En effet, l'apparition de contraintes orthoradiales sur la paroi interne de la carotte creuse lors de son chargement externe au cours de l'essai biaxial, aura tendance a ouvrir d'avantage les fissures au niveau de la jauge orthoradiale parallèle au plan d'anisotropie et fermer celles se trouvant au niveau de la jauge orthoradiale perpendiculaire au plan d'anisotropie. Ce phénomène pourrait donc être à l'origine de l'importante diminution du module de Young mesuré sur la jauge parallèle au plan d'anisotropie et l'invariance de ce dernier lors de sa mesure sur la jauge perpendiculaire au plan d'anisotropie au cours de l'essai biaxial comparés à ceux déterminés à partir des essais en laboratoire (voir Tableau 20).

La piste de l'endommagement de la roche lors du forage du trou Ex responsable de la modification des modules de Young est en accord avec les propos de Martin & Stimpson [1994]. En effet, selon une étude qu'ils ont mené au sein du laboratoire de recherche souterrain dans le cadre du programme « The *in situ* Stress Program at AECL's », le cylindre de roche peut être endommagé durant l'essai de surcarottage. Les déformations mesurées durant l'essai de surcarottage et le module de Young déterminé à partir de l'essai biaxial seront affectés par l'endommagement. Ils ajoutent que le modules de Young déterminé à partir de la carotte endommagée sera plus faible que celui de la roche non-endommagée représentatif du site.

6. CONCLUSION

La recherche réalisée dans le cadre de cette thèse a concerné la mesure en forage des déformations d'un massif rocheux anisotrope par l'intermédiaire de cellules CSIRO. La caractérisation tridimensionnelle des déformations était nécessaire pour déterminer l'état de contraintes *in situ* par la méthode de surcarottage et pour déterminer les caractéristiques élastiques de la roche par essai biaxial.

Entre novembre 2005 et janvier 2006, une campagne de mesures de ce type a été menée dans l'argilite de Tournemire. Les déformations enregistrées ont révélé 5 phénomènes inhabituels rendant délicate la détermination des paramètres élastiques de la roche et impossible l'estimation des contraintes naturelles du site. Parmi ceux-ci, 4 ont été identifiés directement sur les courbes de déformation par comparaison avec des courbes « typiques » :

1. Un saut initial des déformations lors du surcarottage;
2. Un pic des déformations lors du surcarottage ;
3. Une dérive des mesures après le passage du carottier, corrélée à l'augmentation de température de la roche ;
4. Un pic des déformations lors de l'essai biaxial.

Le cinquième phénomène découle de l'interprétation des essais biaxiaux et concerne le fait que ceux-ci conduisent à un rapport d'anisotropie des modules d'élasticité nettement plus faible que le rapport déduit d'essais en laboratoire « traditionnels » sur éprouvettes.

Le souhait de comprendre l'origine de ces phénomènes atypiques, afin de pouvoir mieux les maîtriser et éventuellement les corriger dans les études futures, a constitué le point de départ de la présente thèse. L'objectif annoncé était d'améliorer le protocole de mesure et d'interprétation des déformations. Chemin faisant, nous avons été amené à proposer, en complément des méthodes analytiques existantes, une nouvelle méthode d'interprétation des essais biaxiaux sur roches anisotropes basée sur des abaques construits par modélisation numérique.

Les principaux résultats et conclusions de notre travail sont les suivants :

- **Explications des phénomènes atypiques**

Une recherche bibliographique concernant le pic au surcarottage a tout d'abord montré que celui-ci avait déjà été observé sur des matériaux autres que l'argilite de Tournemire, tels que des marnes, des granites, de l'aluminium, etc. Cependant, les interprétations fournies par les auteurs concernant l'origine de ce phénomène sont très diverses et peu argumentées.

Nous avons ensuite montré qu'une modélisation 3D de l'essai de surcarottage en élasticité linéaire permet de reproduire un pic de morphologie semblable au pic observé *in situ*, mais d'une amplitude nettement inférieure, même en faisant varier les paramètres d'entrée du modèle (coefficient de Poisson, anisotropie des propriétés élastiques, anisotropie des contraintes initiales). Nous en avons déduit que le pic mesuré était possiblement d'origine instrumentale.

En 2008, cette hypothèse a effectivement été confirmée par une nouvelle campagne de mesures, au cours de laquelle différents paramètres techniques du protocole d'essai (vitesse d'avancement et vitesse de rotation du carottier, nature du fluide de foration, temps de séchage de la colle, etc.) ont été modifiés. Ainsi :

- La dérive des mesures après le passage du carottier (phénomène 3) a été éliminée en réduisant l'échauffement induit par les opérations de forage ;
- Le saut initial des mesures (phénomène 1), le pic au surcarottage (phénomène 2) et le pic lors de l'essai biaxial (phénomène 4) ont été éliminés en augmentant le temps de séchage de la colle (résine époxy) utilisée pour fixer la cellule CSIRO à la roche.

Des essais complémentaires en laboratoire sur la colle ont alors été entrepris :

- Les essais chimiques de type « calorimétrie différentielle » ont mis en évidence l'influence directe de la température du site sur le temps de séchage, expliquant ainsi que la durée requise dans une roche froide, telle que l'argilite de Tournemire, soit très supérieure à celle préconisée par le fournisseur ;
- Les essais mécaniques du type « shore A » ont montré que les caractéristiques mécaniques optimales de la colle ne sont atteintes qu'à partir du moment où le temps de séchage complet est respecté.

Afin de vérifier que le temps de séchage de la colle est bien le seul responsable du pic des déformations à l'essai biaxial, et que les conditions particulières du site (endommagement et désaturation de la roche lors du carottage par exemple) ne sont pas impliquées, nous avons réalisé des essais biaxiaux en laboratoire sur des carottes en ciment (matériau simple, homogène, élastique isotrope et non endommagé). Nous avons effectivement pu reproduire le pic et observer sa disparition progressive avec l'augmentation du temps de séchage.

En définitive, nous interprétons le pic au surcarottage (phénomène 2) et à l'essai biaxial (phénomène 4) comme la manifestation d'un accouplement mécanique

imparfait entre la cellule de mesure et la paroi du forage, résultant de la polymérisation incomplète de la colle. Le comportement de la colle présente alors une composante visqueuse (ou visco-plastique) significative. Le saut initial des mesures (phénomène 1) provient, quant à lui, de la déformation axiale de la cellule de mesure sous l'effet de la pression de l'air injecté lors de l'opération de carottage.

- **Amélioration de la méthode d'interprétation des essais biaxiaux**

Nous avons tout d'abord réalisé une synthèse de toutes les campagnes de caractérisation mécanique en laboratoire de l'argilite de Tournemire. Celle-ci a abouti à un jeu de caractéristiques élastiques isotropes transverses supposé représentatif du comportement élastique du matériau.

Par la suite nous avons analysé en détail les essais biaxiaux réalisés lors de la campagne de 2008. Dans un premier temps, nous avons utilisé pour cela les méthodes d'interprétation « classiques » basées sur les formulations analytiques de Worotnicki [1993]. Celles-ci conduisent à un rapport d'anisotropie faible par comparaison avec le rapport issu des essais en laboratoire.

Comme les formulations utilisées reposent sur des hypothèses simplificatrices critiquables, nous avons été amenés à proposer une méthode plus pertinente basée sur des abaques. Ces derniers ont été construits par une modélisation numérique de l'essai biaxial sous l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire isotrope transverse de la roche. Le principe de notre méthode est de déterminer, à partir de l'exploration de l'espace des caractéristiques élastiques, le jeu de caractéristiques qui décrit au mieux le comportement de l'argilite au cours de l'essai biaxial.

Les caractéristiques ainsi déterminées par la méthode analytique « classique » et par abaques étant similaires, nous en avons déduit que les hypothèses simplificatrices utilisées initialement ne peuvent pas être responsables des écarts constatés.

- **Recherche d'explications sur l'origine de l'écart**

Nous avons remarqué que les modules de Young de l'argilite déduits des essais biaxiaux varient en fonction du temps de séchage de la colle. Cependant, même après un temps de séchage suffisamment long, le rapport d'anisotropie déterminé à partir de l'essai biaxial reste faible en comparaison avec le rapport déterminé par des essais en laboratoire. Le séchage de la colle ne suffit donc pas à expliquer cet écart.

A contrario, le même type de comparaison effectué sur des carottes creuses moulées en ciment a montré que l'écart s'atténuait jusqu'à disparaître lorsque le temps de séchage est suffisant. Cette observation tend donc à incriminer l'endommagement de l'argilite induit par les opérations de foration, mais cette hypothèse reste à vérifier dans une étude ultérieure.

- **Perspectives de recherche :**

Le travail effectué dans cette thèse peut être poursuivi. On peut classer les perspectives de cette recherche selon trois volets :

- Volet recherche d'explications sur l'origine de l'écart

Poursuivre la recherche d'explications en exploitant la piste de l'endommagement. Il serait intéressant de comparer les résultats d'essais biaxiaux réalisés sur deux carottes creuses munies de cellule CSIRO fabriquées (à partir d'un matériau simple et homogène, le ciment par exemple) avec deux protocoles différents : une moulée toute prête avec la présence du trou interne, la deuxième coulée sans le trou lequel sera réalisé par la suite par forage.

- Volet caractérisation des roches anisotropes

L'objectif est d'améliorer la nouvelle méthode d'interprétation des essais biaxiaux basée sur des abaques numériques en l'adaptant à un forage d'orientation quelconque par rapport au plan d'anisotropie.

- Volet caractérisation de l'état de contrainte

L'objectif est d'améliorer la méthodologie des mesures de contraintes par surcarottage de cellules CSIRO dans des environnements à basse température. En effet, le temps de séchage de la colle dans ces conditions peut atteindre plusieurs jours et rend la campagne de surcarottage très couteuse.

- Volet caractérisation de la colle

L'objectif est d'établir à partir du nouveau protocole de l'essai mécanique du type « shore A » (mesure de vitesse de l'enfoncement de l'aiguille dans l'échantillon de colle) une loi de comportement viscoélastique (ou viscoplastique) de la colle lorsque celle-ci n'est pas correctement durcie.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Amadei B. [1983], Rock anisotropy and the theory of stress measurements. in Bubbia CA, Orszag SA, editors. Lecture Notes in Engineering. Germany: Springer, 386 pages.

Amadei B. & Stephansson O. [1997], Rock stress and its measurement. London: Chapman & Hall, 490 pages. ISBN 0-412-44700-2.

Armand G. & Rejeb A. [2002], Effet of a fractured zone on drift behaviour in the argillaceous Tournemire site (France). Proc. of the Vith Regional Rock Mechanics Symposium, ROCKMEC'2002, Konya, Turkey, 9-11 October 2002, pages 275-282.

Ask D [2003], Evaluation of measurement rated uncertainties in the analysies of overcoring rock stress data from Äspö HRL, Sweden: a case study. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, special issue 7-8, vol. 40, pages 1173–1187.

Ask D. [2006], New developments in the integrated stress determination method and their application to rock stress data at the Äspö HRL, Sweden. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Issue 1, vol. 43, pages 107-126.

Ask D. [2006 b], Measurement-related uncertainties in overcoring data at the Äspö HRL, Sweden. Part 2: Biaxial tests of CSIRO HI overcore samples. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Issue 1, vol. 43, pages 127–138.

Barbreau A. & Boisson J.Y. [1993], Caractérisation d'une formation argileuse: synthèse des principaux résultats obtenus à partir du tunnel de Tournemire de Janvier 1992 à Juin 1993. Rapport de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire réf. IRSN SERGD 93/02

Ben Ouanas A. [2009], Développement d'une méthode de caractérisation *in situ* des propriétés rhéologiques des massifs rocheux ; Application à l'argilite de Tournemire. Rapport de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire réf. IRSN DEI/SARG/2009-001, 92 pages.

Ben Ouanas A., Gunzburger Y., Lahaie F., Piguet J-P. et Barnichon J-D. [2010], Mechanical testing of hollow cores to determine elastic parameters of anisotropic rocks using the CSIRO HI cell. Lausanne, Suisse, Proceeding of the European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2010), 15-18 Juin 2010, Zhao, Labiouse, Dult & Mathier (eds) Taylor and Francis Group, London, ISBN. 978-0-415-58654-2, pages 103-106.

Ben Ouanas A., Gunzburger Y., Lahaie F., Piguet J-P. et Barnichon J-D. [2010 b], Mechanical testing of hollow cores to determine elastic parameters of anisotropic rocks using the CSIRO HI cell – Application to the Tournemire argilite. Hammamet 2010, Tunisie, The Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics (ICAMEM2010). [article accepté le 13 octobre 2010].

Berry DS. [1968], The theory of stress determination by means of stress relief techniques in a transversely isotropic medium. Technical Report No. 5-68, Missouri River Division Corps of Engineers, Omaha, Nebraska, 1968, 36 pages.

Bertillson R. [2007], Temperature effects in overcoring stress measurements. Thèse de master à “Luleå University of Technology”, 73 pages. ISSN : 1402-1617 – ISRN : LTU-EX—07/241—SE.

Bigarré P. & Camus [1993], rapport de l’Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs réf. ANDRA 621 RP INE 93 004.

Bonin B. [1998], Deep geological disposal in argillaceous formations: studies at the Tournemire test site. Journal of Contaminant Hydrology 35, pages .315–330.

Brady B.H.G. & Brown E.T. [2004], Rock Mechanics for underground mining. Kluwer Academic Publishers Dordrecht/ Boston / London, troisième édition, ISBN 1-4020-2064-3.

Cabrera Nunez J., Beaucaire C., Bruno G., De Windt L., Genty A., Ramambasoa N., Rejeb A., Savoy S. et Volant P. [2001], Projet TOURNEMIRE, Synthèse des programmes de recherche 1995-1999. Rapport de l’Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire réf. IRSN DPRE/SERGD01-19, 202 pages.

Cai M. & Blackwood R.L. [1991], A technique for the covery and re-use of CSIRO hollow inclusion cells. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 28, pages 225-9.

Cai M., Qiao L., Li C., Vu J., Yu B. et Chen G. [1995], Application of an for an Improved Hollow Inclusion Technique for *in situ* Stress Measurement in Xincheng Gold Mine, China. International Journal of Rock Machanics & Mining Sciences, vol. 32, pages 735-739.

Cai M., Qiao L. et Yu J. [1995], Study and Tests of Techniques for Increasing Overcoring Stress Measurement Accuracy

Cazacu O. [1995], Contribution à la modélisation élasto-viscoplastique d’une roche anisotrope. Thèse de doctorat à l’Université des Sciences et Technologies de Lille.

Clément C. [2008], Auscultation d'un versant rocheux soumis aux sollicitations thermiques naturelles. Cas des Rochers de Valabres (Alpes-Maritimes). Thèse de doctorat à Nancy-Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, 220 pages.

Contrucci I. [2006], Mesures de diagraphie ultrasonique sur la station expérimentale de Tournemire. Rapport de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques réf. INERIS DRS-06-60216/RN01. 45 pages & 64 pages d'Annexes.

Cuxac P. [1991], Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans les roches fissurées et anisotrpes. Thèse de doctorat à Nancy-Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, 176 pages.

Deliormanli A.H., Burlini L. et Yavuz A.B. [2007], Anisotropic dynamic elastic properties of Triassic Milas marbles from Mugla region in Turkey. International Journal of Rock Machanics & Mining Sciences, vol. 44, pages 279-288.

Duncan Fama M.E. & Pender M.J. [1980], Analysis of the Hollow Inclusion Technique for measuring *in situ* Rock stress. International Journal of Rock Machanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstract, vol 17, pages 137-146.

Fitzpatrick J. [1962], Biaxial device for determining the modulus of elasticity of stress-relief cores. Washington, U. S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines , report of investigations, 6128, 13 pages.

Fouial K. [1997], Nouvelle méthode d'interprétation des mesures des contraintes par surcarottage adaptée aux roches à comportement non linéaire ou fracturées. Thèse de doctorat à Nancy-Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, 217 pages.

Garitty P., Irvin R.A. et Farmer I. W. [1983], Problems associated with near surface *in-situ* sress measurements by the overcoring method. 26th US symposium on rock mechanics, Rapid city SD, 26-28 june 1985.

Giot R. [2004], Interprétation des mesures de contraintes par relaxation dans les formulations argileuses profondes. Thèse de doctorat à Nancy-Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, 225 pages.

Hakala M. [2006], Quality Control for Overcoring Stress Mesurement Data. Posiva 2006-03. Posiva. 106 pages, ISBN 951-652-126-6.

Hakala M., Hudson J.A. et Christiansson R. [2003], Quality control of overcoring stress measurement data. Int. J of Rock Mech. & Min Sci, special issue 7-8, vol. 40, pages 1141-1159.

Hakala M. & Sjöberg J. [2006], A methodology of interpretation of overcoring stress measurements in anisotropic rock, Working report 2006-99.

Hast N. [1943], Measuring stress and deformations in solid materials. Centraltryckeriet, Esselte, AB, Stockholm.

Hast N. [1958], The measurement of rock pressure in mines. Sveriges Geo. Undersokning, Ser. C, No. 560.

Homand & Duffaut [2000], Manuel de mécanique des roches, Tome 1 : Fondements. 265 pages. ISBN : 2-911762-23-1.

Homand F., Morel E., Henry J-P, Cuxac P. et Hammade E. [1993], Characterization of the Moduli of Elasticity of an Anisotropic Rock Using Dynamic and Static Methods. International Journal of Rock Machanics & Mining Sciences, vol 30, No.5, pages 527-535.

Irvin R.A., Garitty P. et Farmer I. W. [1987], The effect of boundary yiel on the result of *in-situ* stress measurements using overcoring techniques. Int. J of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 24, 89-93.

Kaiser P.K., Zou D. et Lang P.A. [1990], Stress determination by back-analysis of excavation-induced stress changes – a case study. Rock Mech., Rock Eng., vol. 23, pages 185-200.

Kirsch G. [1898], Die theorie der elastizitat und die bedürfnisse der festigkeitslehre. Veit. Ver. Deu. Ing., vol. 42, pages 797-807.

Lahaie F. [2006], Détermination *in situ* du tenseur des contraintes autour du tunnel et des galeries de la station expérimentale de Tournemire par surcarottage. Déroulement et résultats préliminaires des campagnes de mesure de décembre 2005 et janvier 2006. Rapport de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques réf. INERIS DRS-06-71871/RN01. 49 pages & 100 pages d'Annexes.

Lahaie F. [2010], Campagne de surcarottage du 3 au 18 novembre 2008 dans la station expérimentale de Tournemire. Rapport de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques réf. INERIS DRS-10-97197-04334A.

Lahaie F., Gunzburger Y., Ben Ouanas A., Barnichon J-D., Bigarré P. & Piguet J-P. [2010], Impact of epoxy glue curing time on the quality of overcoring stress measurements in low-temperature environments. Beijing, China, Proceeding of the 5th International Symposium on *In-situ* Rock Stress and Earthquakes, 25-27 August 2010 Xie (ed.), Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60165-8, pages 161-166.

Leeman E.R. [1964], Absolute rock stress measurements usin a borehole trepanning stress-relieving technique. Proc. 6th US Symp. Rock Mech., Rolla University of Missouri publ., pages 407-26.

Leeman E.R & Hayes D.J. [1966], A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole. Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM), Lisbon, Lab. Nac de Eng. Civil, Lisbon, vol. II, pages 17-24.

Lekhnitskii SG. [1963], Theory of elasticity of an anisotropic elastic body. In: Brandstatter JJ, editor. Holden-day series in mathematical physics. San Francisco: Holden Day Inc., 404 pages.

Lindfors U. [2007], Overcoring rock stress measurements in borehole KFM07B. Forsmark site investigation. Rapport SKB Swedish Nuclear Waste and Management Company, réf. P-06-93. Stockholm, Sweden, 84 pages. ISSN 1651-4416.

Martin C.D. & Simpson B. [1994], The effect of sample disturbance on laboratory properties of Lac du Bonnet granite. Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, pages 692-702.

Mohr H.F. [1956], Measurement of rock pressure. Mine Quarry Eng., vol. 22, pages 178-89.

Nadim C.[2010], Mesures de contraintes par surcarottage au barrage du Chambon (38). Rapport de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques réf. INERIS DRS-10-108970-03062A.

Niandou H. [1994], Étude du comportement rhéologique et modélisation de l'argilite de Tournemire. Applications à la stabilité d'ouvrages souterrains. Thèse de doctorat à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 297 pages.

Niandou H., Shao J.F., Henry J.P. et Fourmaintraux D. [1997], Laboratory Investigation of Mechanical Behaviour of Tournemire Shale. International Journal of Rock Machanics & Mining Sciences, volume 34, No. 1, pages 3-17.

Nechnech A. [1998], Modélisation numérique du problème de surcarottage : influence de la loi de comportement de la roche. Thèse de doctorat à Nancy-Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, 228 pages.

Nunes A.L.L.S. [2002], A new method for determination of transverse isotropic orientation and the associated elastic parameters for intact rock. Int. J of Rock Mech. & Min Sci, Vol. 39, pages 257–273.

Obara Y. & Ishiguro Y. [2004], Measurements of induced stress and strength in the near-field around a tunnel and associated estimation of the Mohr–Coulomb parameters for rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, issue 5, vol. 41, pages 761–769.

Obara Y. & Sugawara K. [2003], Updating the use of the CCBO cell in Japan: overcoring case studies. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, special issue 7-8, vol. 40, pages 1189–1203.

Rejeb A. [1999], Mechanical characterisation of the argellious Tournemire site (France). Proceedings of ROCKSITE-99, Bangalore, India December 6-8, 1999. New Delhi, Cacutta : Oxford & IBH Publishing CO.PVT.LTD.

Rejeb A. [2006], De l'observation à la modélisation des zones perturbées par l'excavation des ouvrages dans le site de Tournemire. Note technique de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire réf. IRSN DEI/SARG/2006-001, 61 pages.

Rejeb A. & Cabrera J. [2006], Time-dependent evolution of the excavation damaged zone in the argelious Tournemire site. Advances on coupled thermo-hydro-mechanical-chemical. Processes in Geosystems and Engeneering GeoProc, pages 65 – 74.

Rejeb A., Humbert B. et Vouille G. [1999], Projet Tournemire, programme mécanique, caractérisation du comportement mécanique au laboratoire. Rapport de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire réf. IRSN SERGD 99/07.

Rejeb A., Millard A., Rouabhi A. et Tijani M. [2006], Modelling approaches of the excavation damaged zone (EDZ) around the old tunnel at the argillaceous Tournemire site. Advances on coupled thermo-hydro-mechanical-chemical Processes in Geosystems and Engeneering GeoProc, pages 370 – 375.

Rejeb A. & Tijani M. [2003], Champ de contrainte dans les argilites de Tournemire – Mesures *in situ* et interprétation. Revue française de géotechnique N°103, pages 75-84.

Sjöberg J. [2004], Overcoring rock stress measurements in borehole KFM01B. Forsmark site investigation. Rapport SKB Swedish Nuclear Waste and Management Company, réf. P-04-83. Stockholm, Sweden, 105 pages. ISSN 1651-4416.

Sjöberg J., Christiansson R. et Hudson J.A. [2003], ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 2 : overcoring methods. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, special issue 7-8, vol. 40, pages 999–1010.

Sjöberg J. & Klasson H. [2003], Stress measurements in deep boreholes using the Borre (SSPB) probe. Special Issue of the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, issue 7-8, volume 40, pages 1205–1223.

Sjöberg J. & Perman F. [2006], Overcoring rock stress measurements in borehole KLX04. Oskarshamn site investigation. Rapport SKB Swedish Nuclear Waste and Management Company, réf. P-05-69. Stockholm, Sweden, 104 pages. ISSN 1651-4416.

Slobodov M.A. [1958], Test application of the load relief method for investigating stresses in deep rock. Ugal, vol. 7, pages 30-35.

Souley M. [2008], Inversion des propriétés élastiques anisotropes des argilites de Tournemire à partir d'essais biaxiaux sur carottes surforées. Note technique de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques réf. INERIS DRS-08-79269-16512A du 18/12/2008.

Thompson P.M. & Chandler N.A. [2004], *in situ* rock stress determinations in deep boreholes at the Underground Research Laboratory. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 41, pages 1305–1316.

Walton R.J. & Worotnicki G. [1986], A comparison of three borehole instruments for monitoring the change of rock stress with time, Proc. International Symposium on Rock Stress Measurements, Stockholm, 1-3 september.

Worotnicki G. [1993], CSIRO triaxial stress measurement cell, in Comprehensive Rock Engineering (ed. J.A. Hudson), Pergamon Press, Oxford, Chapter 13, vol. 3, pages 329-94. ISBN 0-08-042066-4.

Worotnicki G. & Walton R.J. [1976], Triaxial « hollow inclusion » gauges for determination of rock stress *in situ*. Proc. IRSM Symp. On Investigation of Stress in Rock, Supplement, 1-8, Institution of Engineers Australia, Sydney.

I. ANNEXE A

ANNEXE A : LES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES DE DEFORMATION

Cellules bidimensionnelles de mesures en paroi

Une première méthode a été proposée en France par Berthier en [1950] et reprise par Talobre [1967]. Elle consiste à mesurer la variation du diamètre d'un forage de 38 mm de diamètre (appelé forage EX) en utilisant un système optique.

D'autres méthodes permettant une ou plusieurs mesures de variation du diamètre du forage ont été développées au sein du US Bureau of Mines (USBM). La première version de la cellule connue sous le nom de « USBM gage » a été proposée par Obert *et al.*, [1967] puis améliorée par Merrill [1967]. Par la suite d'autres améliorations ont été apportées à la cellule USBM par Hooker et Bickel [1974], Hooker *et al.*, [1974], puis par Bickel [1978]. Cette cellule est encore utilisée de nos jours et est considérée comme l'un des instruments les plus fiables et les plus précis.

Une version récente et modifiée de l'USBM a été proposée par Thomson [1990] au sein de l'AECL (Atomic Energy of Canada Limited) connue sous le nom de DBDG (Deep Borehole Deformation Gage). Cette dernière a l'avantage d'opérer dans des forages remplis d'eau jusqu'à une profondeur de l'ordre de 1000 m.

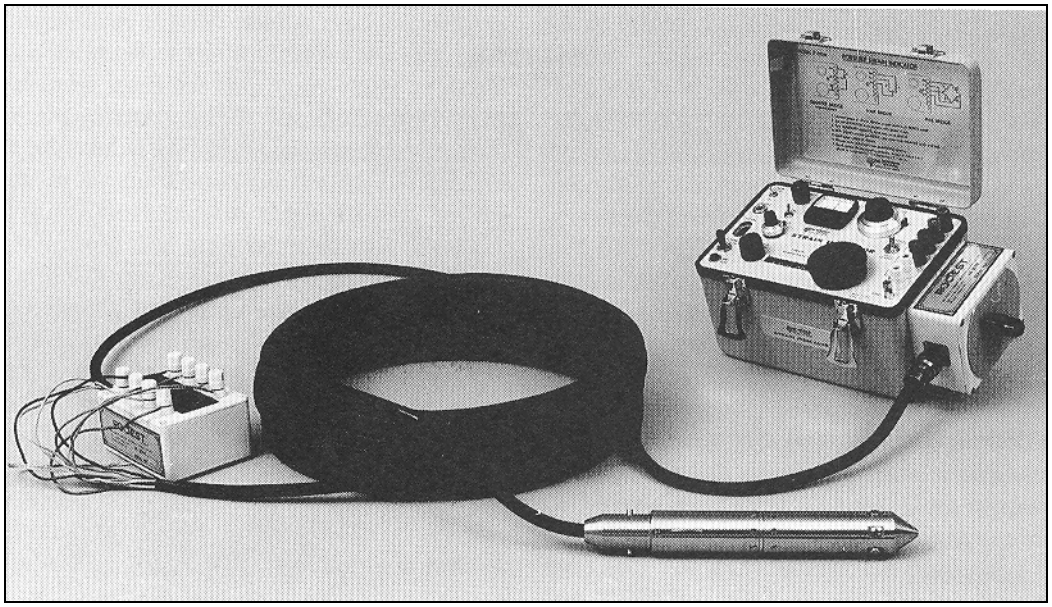


Figure 87 : la cellule USBM [Amadei & Stephanson 1997].

Cellules bidimensionnelles de mesures en fond de forage

En Afrique du Sud, Leeman [1964] a conçu et a proposé pour la première fois une cellule qui se colle au fond d'un forage de 60 mm de diamètre (appelé forage BX). Elle consiste en un bouchon de caoutchouc de silicone au fond duquel est fixée une rosette composée de trois (ou plus récemment quatre) jauges de déformation. Cette cellule a été finalement développée par Leeman [1971] et a porté le nom de CSIR (Council for Scientific and Industrial Research) Doorstopper. Parmi d'autres modèles similaires qui ont vu le jour, la Doorstopper est la seule en son genre à être utilisée jusqu'à nos jours pour la mesure de déformations en fond de forage.

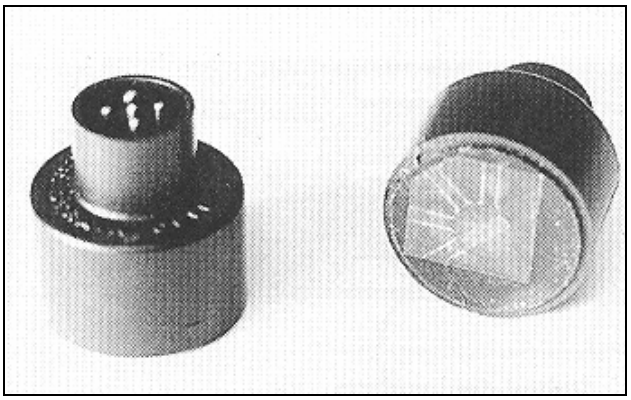


Figure 88 : la cellule Doorstopper [Amadei & Stephanson 1997].

Cellules tridimensionnelles de mesure en paroi

En 1966, Leeman et Hayes ont proposé une nouvelle cellule appelée « South African CSIR triaxial strain cell ». Cette cellule est équipée de trois rosettes contenant chacune trois jauges de déformation. Elle est collée directement sur la paroi interne d'un forage de diamètre 38 mm (forage EX). Elle permet de mesurer des déformations sur la paroi du forage à des orientations et positions connues [Leeman, 1971].

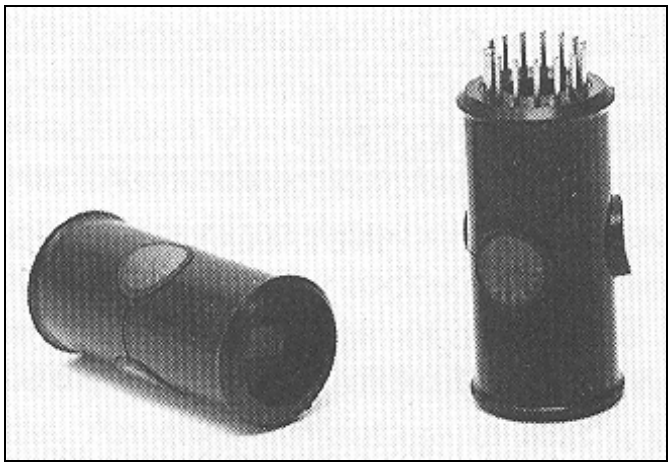


Figure 89 : la cellule CSIR [Amadei & Stephanson 1997].

D'autres cellules opérant de la même manière que le « CSIR triaxial strain » ont été proposées dans la littérature. Ces cellules ont été testées dans les Alpes par Kovari *et al.*, [1972] et Grob *et al.*, [1975], en Scandinavie par Myrvang [1976] et en Allemagne et en Europe centrale par l'entreprise INTERFELS.

Une autre version de la « CSIR triaxial strain cell » est utilisable dans des forages verticaux remplis d'eau et en grande profondeur (plus que 500 m). Cette dernière, a été développée par Vattenfall en Suède, en 1976 au sein du Swedish State Power Board sous le nom de « SSPB » et présentée pour la première fois par Hiltscher at *al.*, [1979]. Elle est actuellement connue sous le nom de « *Borre* probe » ou la « *Borre* (SSPB) probe ».

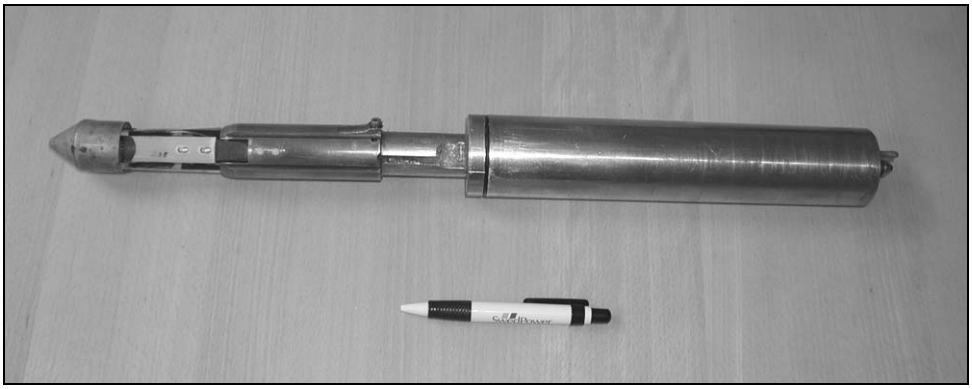


Figure 90 : la cellule « Borre *probe » [Sjöberg & Klasson, 2003]*

D'autres types de « CSIR triaxial strain cell » ont vu le jour, tels que la LuH ou LuT (Lulea University of technology) gage proposée par Leijon [1986] et Leijon & Stillborg [1986] en Suède, la « ANZI cell » proposée par Mills & Pender [1986] en Nouvelle Zélande, la « AECL-modified CSIR » cell proposée par Thompson *et al.*, [1986] qui porte de nos jours le nom de « DDGS » (Deep Doorstopper Gauge System) et Gill *et al.*, [1987] et enfin la plus récente « CSIR-type triaxial strain cell » proposée par Cai [1990] et qui s'est limitée à seulement des tests en laboratoire.

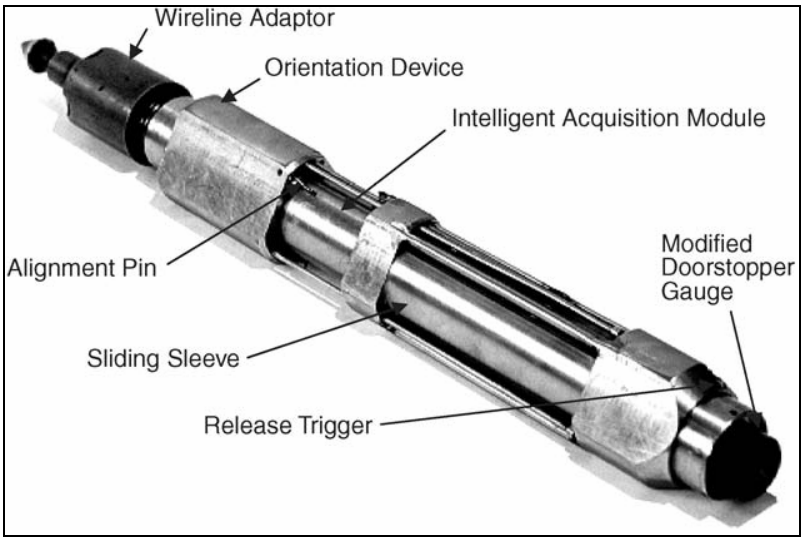


Figure 91 : la cellule DDGS [Thompson & Chandler, 2004]

<u>Cellules tridimensionnelles de mesure en fond de forage</u>

Sugawara *et al.*, [1986] ont proposé une cellule de mesure de déformation d'une forme conique qui se colle au fond d'un forage de 75 mm de diamètre. La cellule se compose d'un bouchon de forme hémisphérique en résine époxy composé de 16 jauges de déformation montées sur sa surface extérieure. Une version plus récente de cette cellule a été présentée par Kobayashi *et al.*, [1991] comportant

12 jauges et une autre par Sugawara and Obara [1995] comportant 16 jauges de déformation comme la version initiale.

Cette technique de forage conique connue sous le nom de « conical-ended borehole », est très répandue au Japon. La cellule utilisée par cette méthode est maintenant connue sous le nom de « Compact Conical-ended Borehole Overcoring (CCBO) device ». Elle a été présentée par Sugawara and Obara [1999] avec 24 jauges (8 tangentielles, 8 radiales et 8 obliques).

Figure 92 : la cellule CCBO [Kang et al., 2006]

<u>Cellules de type inclusion</u>

Une première catégorie de ce type est constituée par les cellules à inclusions rigides. La première cellule « glass inclusion stressmeter » a été développée par Robert [1964]. Un deuxième modèle plus élaboré a été proposé par Nicholas *et al.*, [1968]. Il consiste en une bille en acier (ou aluminium ou cuivre) de 25,4 mm de diamètre sur laquelle sont collées trois rosettes. La bille est fixée sur la paroi d'un forage à l'aide d'une colle époxy qui permet la transmission des déformations de la roche aux rosettes. D'autres modèles de ce type ont été proposés par la suite par Rocha et Silverio [1969], Lee *et al.*, [1976], Riley *et al.*, [1977] et enfin celui de Blackwood [1977] connu sous le nom de « University of New South Wales (UNSW) SI cell ». Cependant toutes ces cellules n'ont été que très peu employées et abandonnées par la suite, du fait de problèmes de décollement entre la roche et la colle.

Ce problème a conduit au développement de l'inclusion creuse à paroi mince ce qui a été considéré comme une technique intéressante dans le domaine du couplage entre la cellule et la roche. Les deux cellules les plus connues sont la « Portuguaise LNEC (Laboratorio National de Engenharia Civil, Lisbon) gage » proposée par Rocha *et al.*, [1974] et la « Australian CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) hollow inclusion (HI) cell" connue sous le nom de « cellule CSIRO » proposée par Worotnicki and Walton [1976].

La cellule LNEC consiste en une inclusion creuse de 31 mm de diamètre interne et 35 mm de diamètre externe, équipée de trois rosettes contenant chacune trois jauges de déformation. Cette cellule n'a été utilisée que pendant les années 70 au Portugal. A contrario, la « cellule CSIRO » est la plus largement connue et a été utilisée dans une grande variété de roches au cours des 30 dernières années. La cellule possède un diamètre intérieur de 32 mm et un diamètre extérieur de 36 mm. Par contre, la cellule présente certains inconvénients : (i) elle n'est pas récupérable après utilisation, (ii) elle n'est pas utilisable dans des roches très souples à cause des contraintes de traction qui se développent dans ce cas au

niveau de l'interface cellule-roche. Cependant, Cai et Blackwood [1991] ont présenté une méthode de récupération de la cellule après utilisation et Walton et Worotnicki [1986] ont développé une nouvelle version de la « cellule CSIRO » qui permet d'éviter les problèmes d'interface cellule-roche.

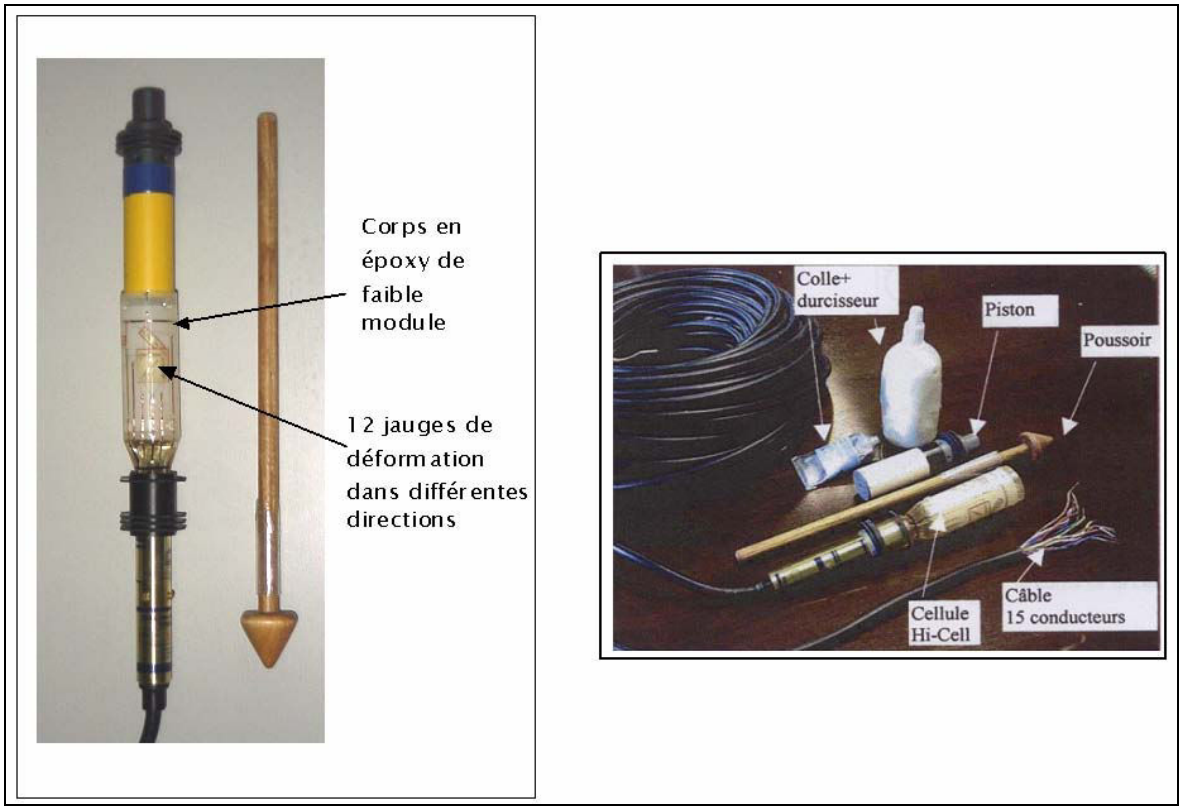


Figure 93 : Cellule CSIRO à paroi mince ; matériel d'installation de la cellule.

Toute cette partie a été inspiré principalement du chapitre 5 du livre « Rock stress and its measurement » de Amadei & Stephansson [1997] (ISBN 0-412-44700-2.). Les références étant trop nombreuses (30 références), et simplement citées par l'auteur, il est possible de les consulter directement dans le livre.

II. ANNEXE B

ANNEXE B : SCHEMA DE LA CELLULE CSIRO A 12 JAUGES ; SCHEMA DU CAROTTIER ET DU SENS DE CIRCULATION DE L'AIR COFOR – DEPARTEMENT COREIS

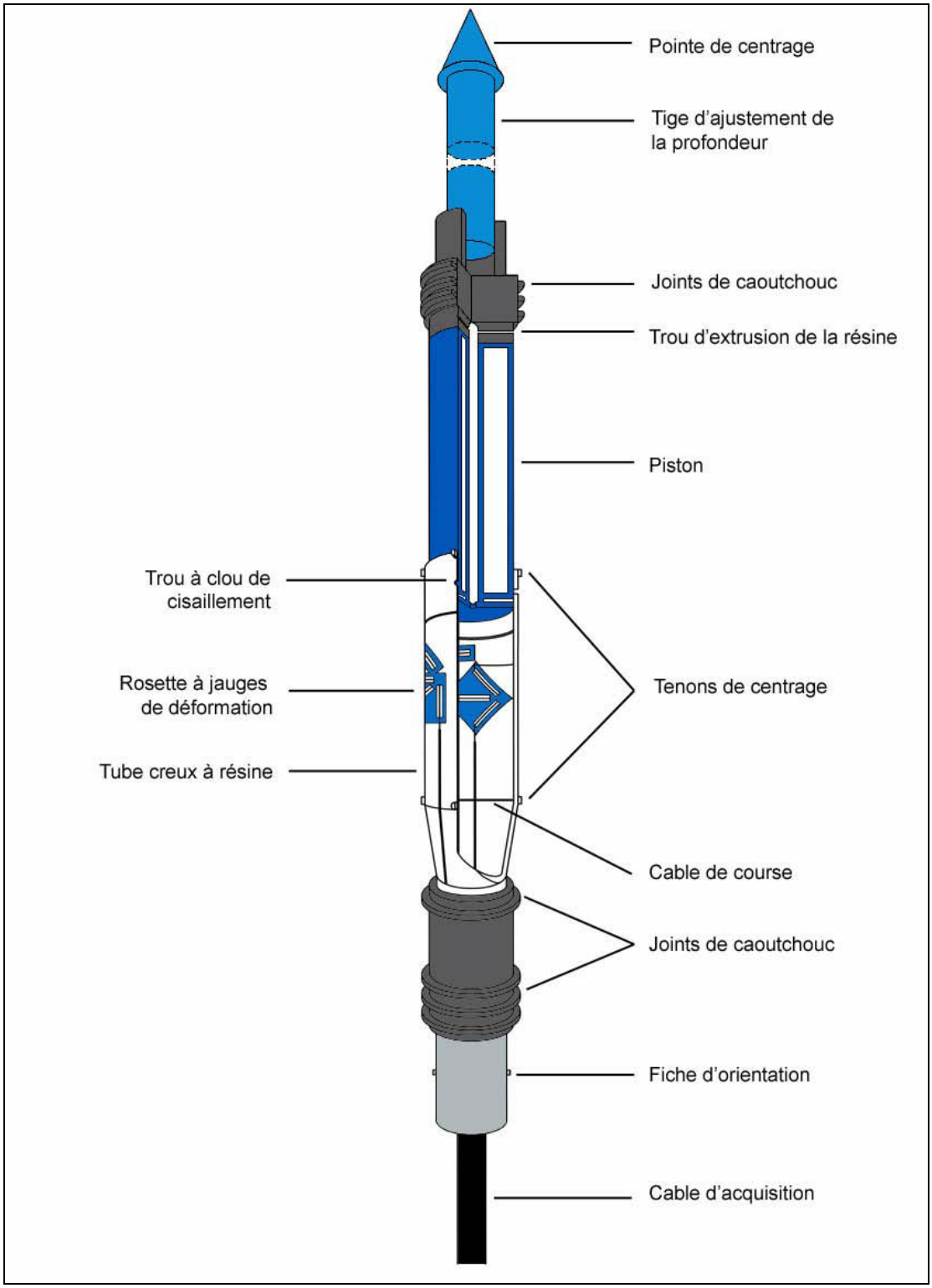


Figure 94 : Schéma détaillé de la cellule CSIRO à 12 jauges [Giot, 2004]

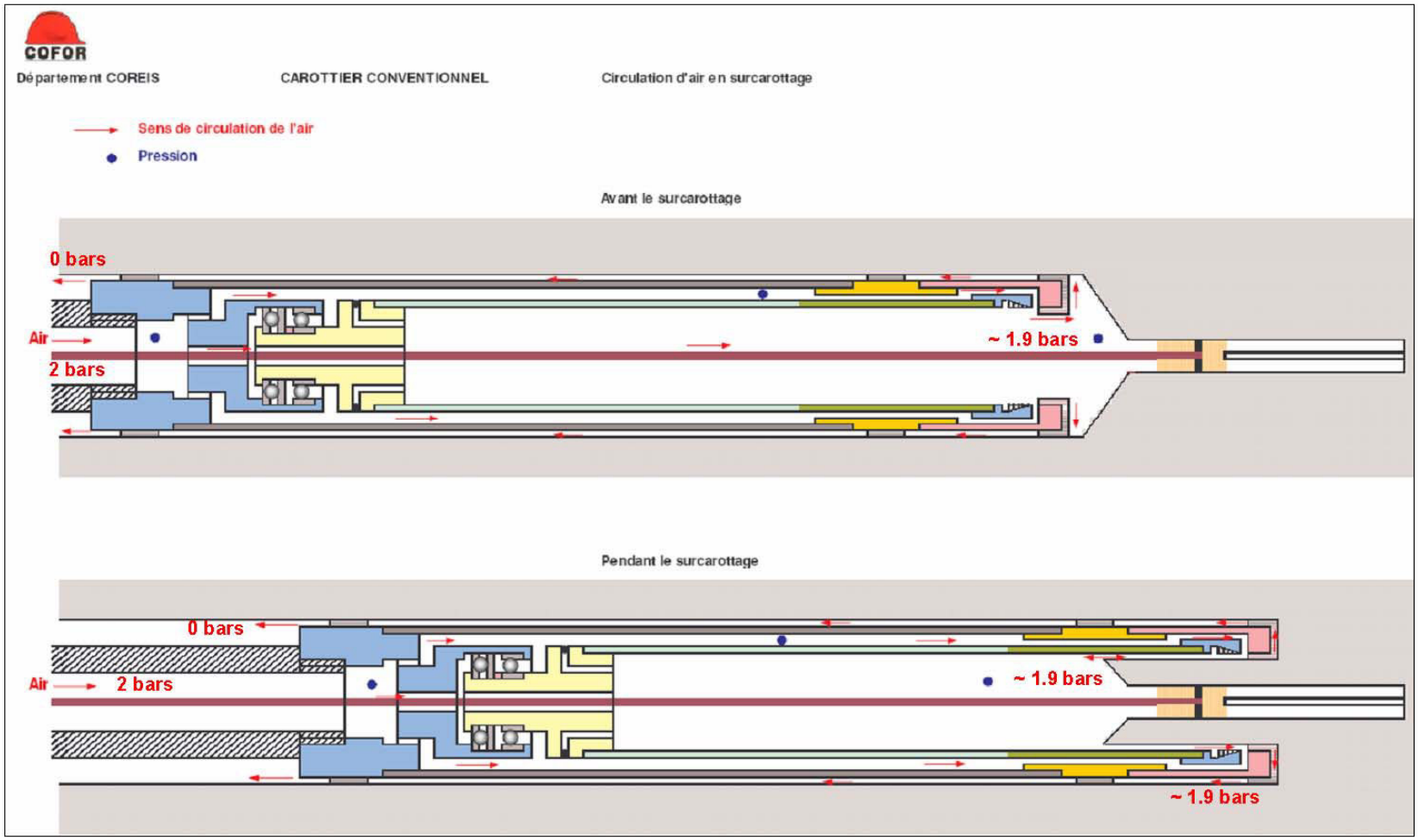


Figure 95 : Schéma Du carottier - sens de circulation de l'air

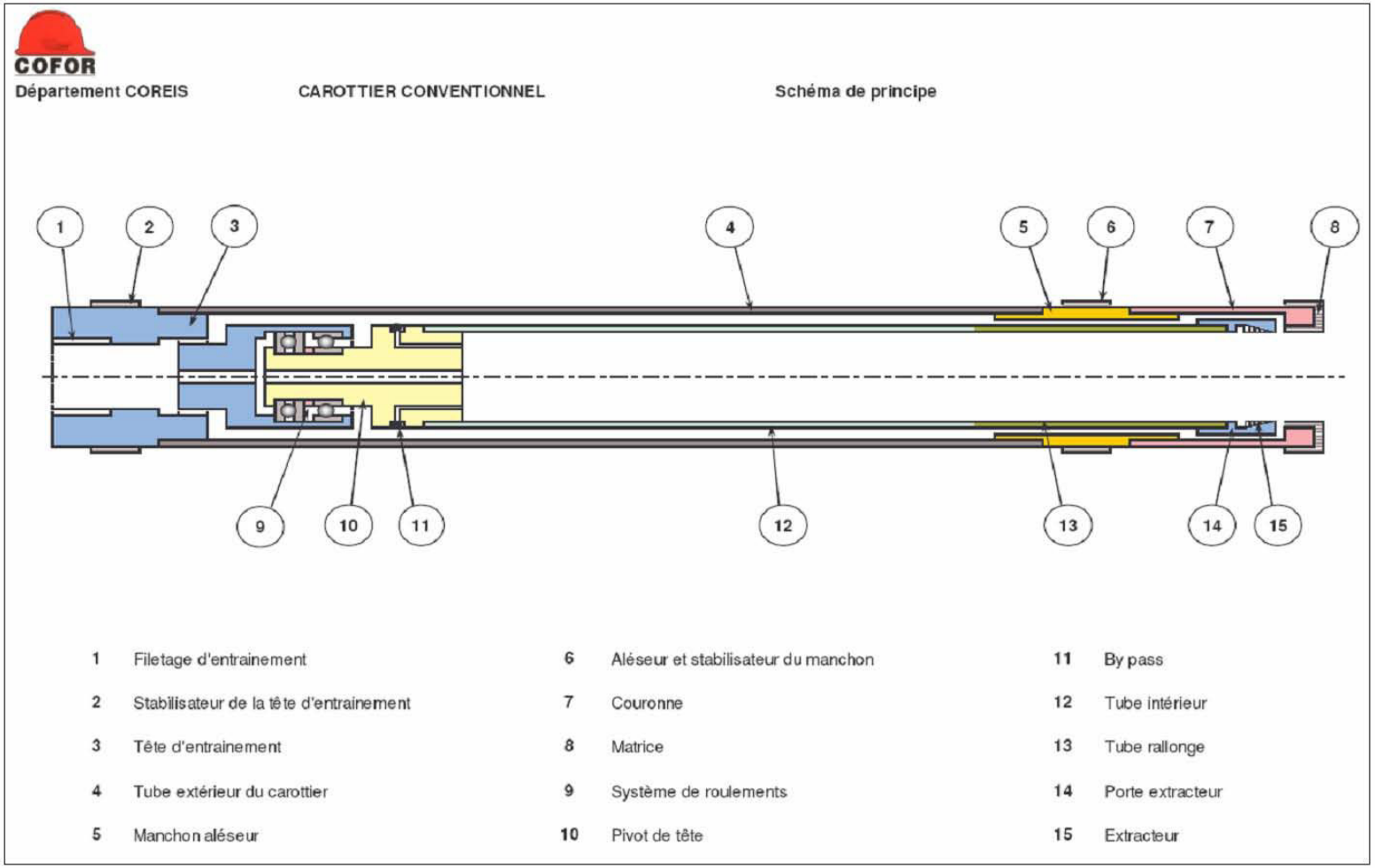


Figure 96 : Schéma Du carottier – différentes composantes

III. ANNEXE C

ANNEXE C : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET HYPOTHESES SIMPLIFICATRICE UTILISEES PAR LES DIFFERENTS AUTEURS AYANT TRAITE LE PROBLEME DU TROU CYLINDRIQUE DANS UN MILIEU CONTINUE

Tableau 25 Références bibliographiques et hypothèses simplificatrice utilisées par les différents auteurs ayant traité le problème du trou cylindrique dans un milieu continue

			Kirsch, [1898] (1)	Kirsch, [1898] (2)	(2) Homand & Duffau,t [2000]	(1) Homand & Duffau,t [2000]	Berry [1968].(1)	Berry [1968].(2)	Amadei [1983] (1)	Lekhnitskii [1963].	Duncan Fama & Pender [1980]	Worotnicki [1993].(1)	Worotnicki [1993].(2)	Amadei [1983] (1)	Worotnicki [1993].(3)	Worotnicki [1993].(4)	Nunes [2002]
Type de modèle	Trou cylindrique en milieu infini		X	X	X		X	X	X		X	X	X	X			
	Cylindre creux					X				X					X	X	X
Loi de comportement de la roche	élasticité linéaire		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	élastoplasticité																
Comportement élastique	Isotrope		X	X	X	X					X						
	Isotrope transverse	Plan d'aniso **L** au trou					X				X			X			
		Plan d'aniso // au trou						X				X			X		
		Plan d'aniso quelconque							X				X			X	
Modèle bicouche	Oui										X	X	X	X	X	X	X
	Non		X	X	X	X	X	X	X	X							
Epaisseur de la couche interne	1,5 mm										*	X	X	*	X	X	X
	3 mm										X			X			*
Longueur de la couche interne	Infinie										X	X	X	X	X	X	X
	Longueur réelle (100 mm)																
Comportement de la couche interne	Elastique linéaire isotrope (E=2,6GPa;ν=0,4)										X	X	X	X	X	X	X
	Identique à la roche																
Position des points de mesure	A la paroi du tou		X	X	X	X	X	X	X	X	*	X	X		X	X	X
	Dans la couche à 1,5mm de la paroi de la galerie										X	X	X	X	X	X	
Chargement extérieur	Isotrope (σ1=σ2=σ3)		X			X					*						
	Biaxial (σ1=σ2;σ3=0;σxz=σyz=0)			X						X	*				X	X	X
	Anisotrope coaxial (σxz=σyz=0)				X		X	X	X		X	X	X	X			
	Anisotrope quelconque										*						
Pression interne	Nulle		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
	Quelconque									X							
Hypothèses de calcul	Déformations planes (2D)		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Aucune hypothèse (3D)					X											
Méthode de résolution	Analytique		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
	Semi-analytique													X			
	Numérique																

IV. ANNEXE D

ANNEXE D : LOCALISATION DES ESSAIS DE LA CAMPAGNE DE SURCAROTTAGE DE 2005-2008

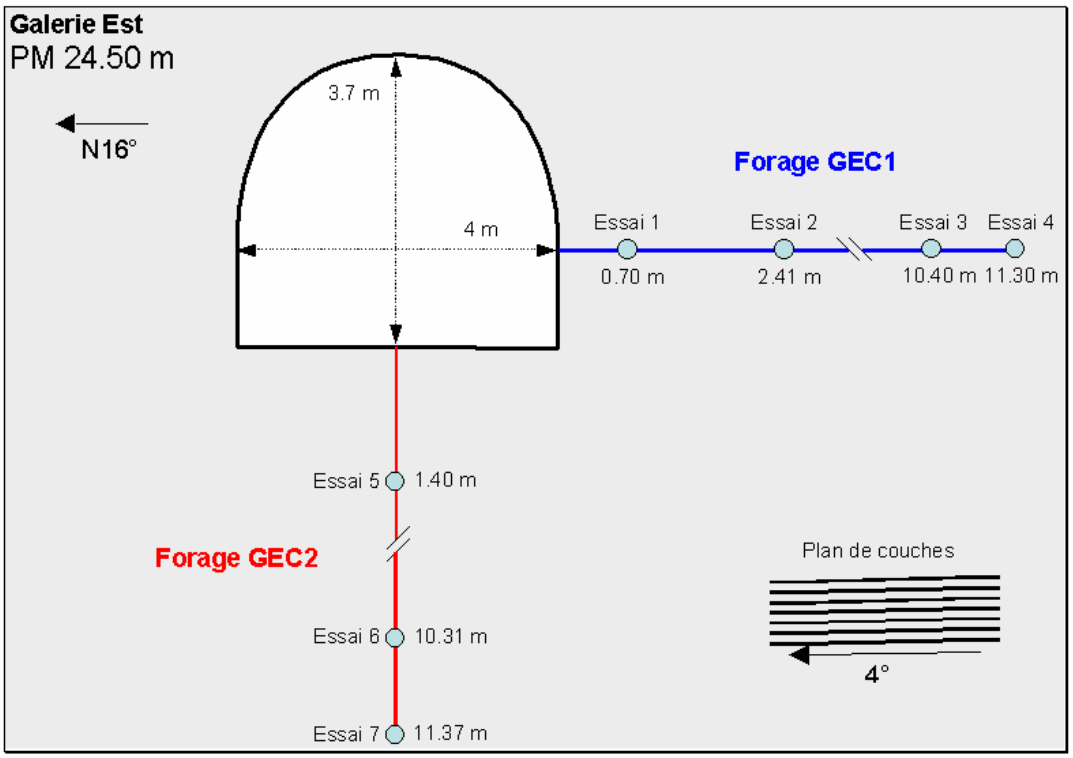


Figure 97 : Vue en coupe de la section de mesures GEC

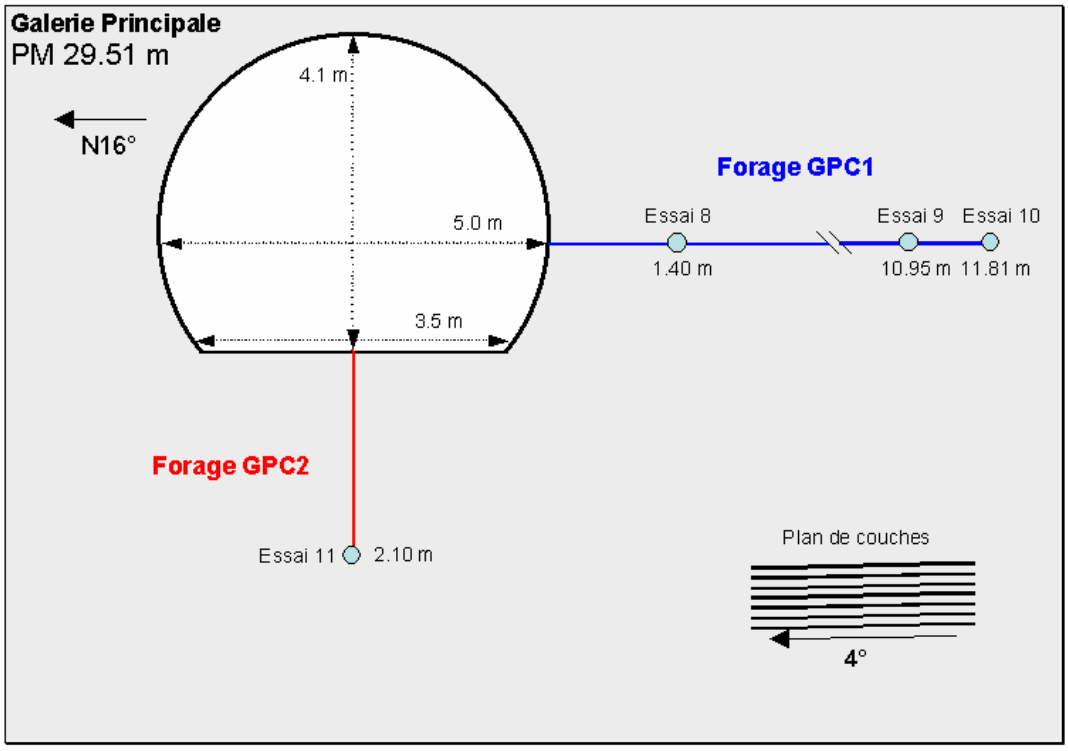


Figure 98 : Vue en coupe de la section de mesures GPC

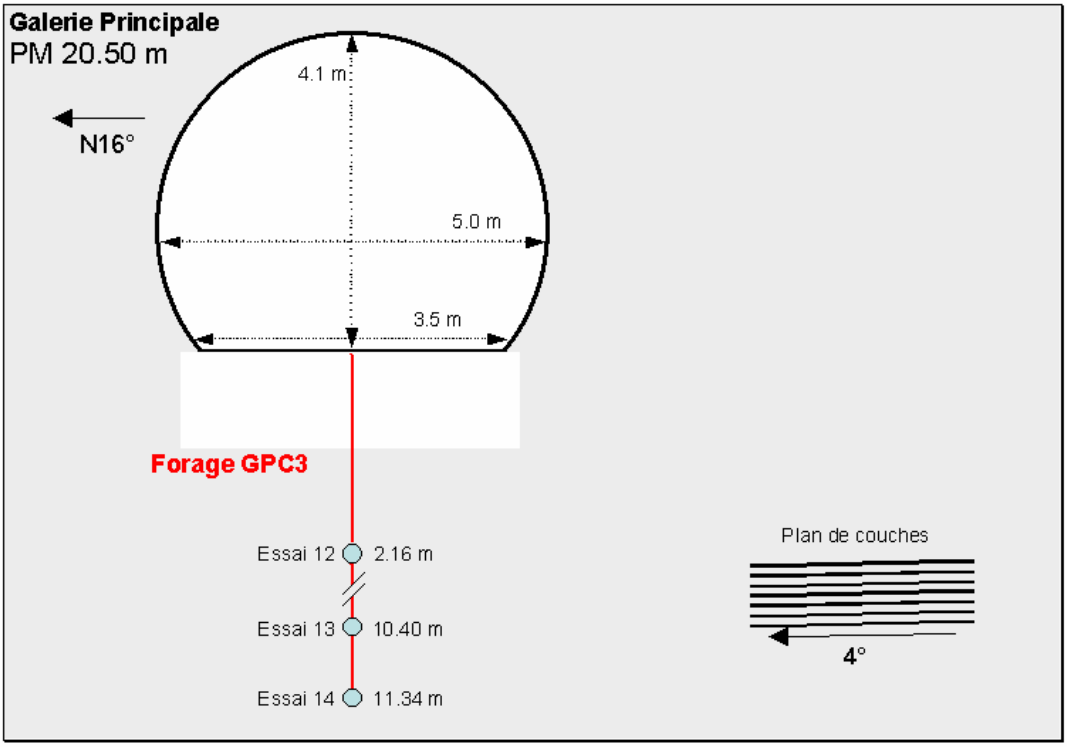


Figure 99 : Vue en coupe de la section de mesures GPC'

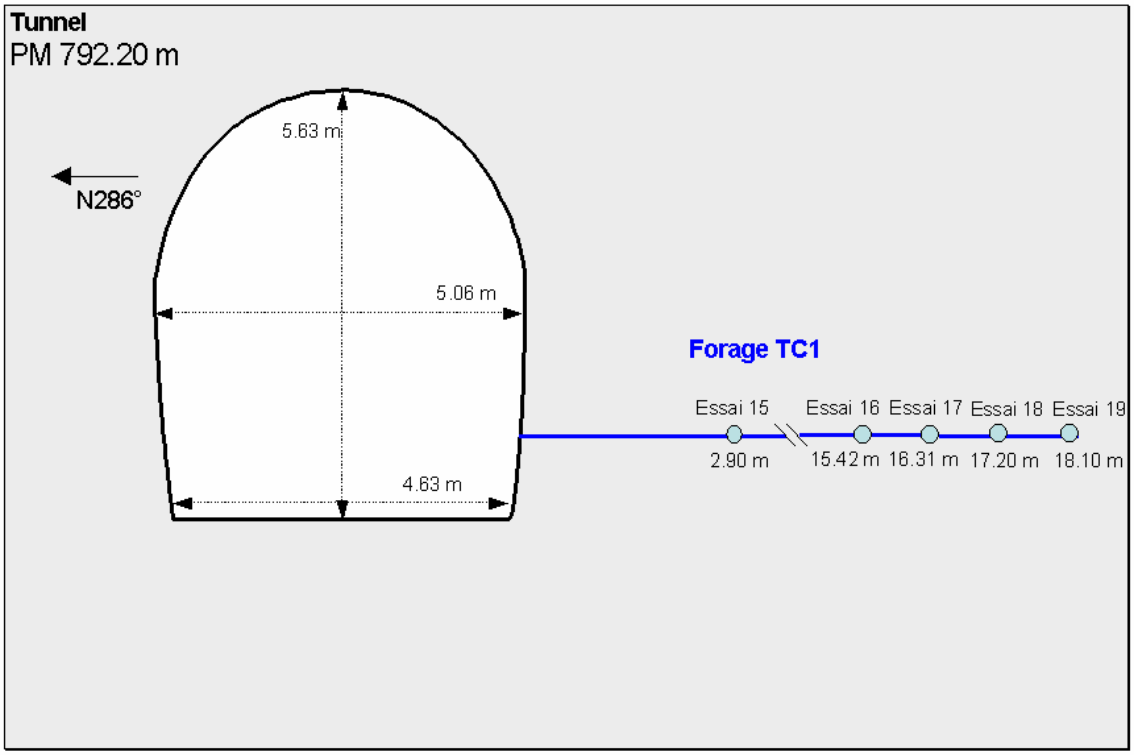


Figure 100 : Vue en coupe de la section de mesures TC

V. ANNEXE E

ANNEXE E : RECAPITULATIF DES ESSAIS DE SURCAROTTAGE ET DES ESSAIS BIAXIAUX – CAMPAGNE 2005-2006

Tableau 26 : Paramètres méthodologiques au cours du surcarottage

N° essai	Réf. essai/carotte	Localisation	Forage	Prof. essai (m)	Position de l'essai / l'ouvrage	Température initiale de la cellule (°C)	Temps de séchage de la colle t_s (h)	ΔT (°C) au cours du surcarottage	Vitesse d'avancement du carottier (cm/mn)	Vitesse de rotation du carottier (tour / mn)	T° (°C) du fluide injecté (air)
1	GEC11-0070	Galerie Est	Horizontal	0,70	Champ proche	12,1	16	14,1	-	-	-
2	GEC12-0241	Galerie Est	Horizontal	2,41	Champ proche	12,8	$14^{1/2}$	> 5,6	$1^{1/2}$	-	8
3	GEC13-1040	Galerie Est	Horizontal	10,40	Champ lointain	12,5	20	> 3,2	1 à 3	-	8
4	GEC14-1130	Galerie Est	Horizontal	11,30	Champ lointain	12,6	16	> 6	1 à $2^{1/2}$	-	6
5	GEC21-0140	Galerie Est	Vertical	1,40	Champ proche	12,7	$13^{1/2}$	> 3,5	1 à 3	-	6
6	GEC22-1031	Galerie Est	Vertical	10,31	Champ lointain	13,1	$14^{1/2}$	4	1 à 3	-	6
7	GEC23-1137	Galerie Est	Vertical	11,37	Champ lointain	13,8	$15^{1/2}$	-	-	-	-
8	GPC11-0140	Galerie Principale	Horizontal	1,40	Champ proche	12,1	15	> 2,6	1 à 3	-	6
9	GPC12-1095	Galerie Principale	Horizontal	10,95	Champ lointain	12,9	15	3,6	1 à 3	-	-
10	GPC13-1181	Galerie Principale	Horizontal	11,81	Champ lointain	12,9	$15^{1/2}$	> 1,4	1 à 3	-	-

N° essai	Réf. essai/carotte	Localisation	Forage	Prof. essai (m)	Position de l'essai / l'ouvrage	Température initiale de la cellule (°C)	Temps de séchage de la colle t_s (h)	ΔT (°C) au cours du surcarottage	Vitesse d'avancement du carottier (cm/mn)	Vitesse de rotation du carottier (tour / mn)	T° (°C) du fluide injecté (air)
11	GPC21-0210	Galerie Principale	Vertical	2,10	Champ proche	12,1	$14^{1/2}$	-	3 à 4	-	6
12	GPC31-0216	Galerie Principale	Vertical	2,16	Champ proche	11,8	18	> 4,3	3	-	-
13	GPC32-1040	Galerie Principale	Vertical	10,40	Champ lointain	13,3	$14^{1/2}$	> 3	3	-	-
14	GPC33-1134	Galerie Principale	Vertical	11,34	Champ lointain	13,3	$19^{1/2}$	2,1	2 à $3^{1/2}$	-	-
15	TC11-0290	Tunnel	Horizontal	2,90	Champ proche	11,3	$14^{1/2}$	> 4,3	1 à 3	65	-
16	TC12-1542	Tunnel	Horizontal	15,42	Champ lointain	12,2	17	8,8	$1^{1/2}$ à 3	50	4 - 5
17	TC13-1631	Tunnel	Horizontal	16,31	Champ lointain	12,2	$13^{1/2}$	> 5	1 à 3	70	4
18	TC14-1720	Tunnel	Horizontal	17,20	Champ lointain	12,4	14	> 5,4	$1^{1/2}$ à 2	70	4
19	TC15-1810	Tunnel	Horizontal	18,10	Champ lointain	12,3	$15^{1/2}$	> 7,9	$1^{1/2}$ à $2^{1/2}$	-	4

VI. ANNEXE F

ANNEXE F : INTENSITE DU PIC A L'ESSAI DE SURCAROTTAGE (APS) ET INTENSITE DU PIC A L'ESSAI BIAXIAL (APB) MESURES AU NIVEAU DES JAUGES ORTHORADIALES – CAMPAGNE 2005-2006

N° essai	Réf. essai/carotte	Forage	Prof. (m)	APS (%)					APS moyenne (%)	APS maximale (%)
				J2	J6	J8	J11	J12		
1	GEC11-0070	Horizontal	0,70	-	-	-	-	-	-	-
2	GEC12-0241	Horizontal	2,41	0	14	06	0	17	9	17
3	GEC13-1040	Horizontal	10,40	81	100	111	54	134	96	134
4	GEC14-1130	Horizontal	11,30	187	66	17	25	34	66	187
5	GEC21-0140	Vertical	1,40	68	60	19	19	29	43	69
6	GEC22-1031	Vertical	10,31	-	48	113	50	-	70	113
7	GEC23-1137	Vertical	11,37	-	-	-	-	-	-	-
8	GPC11-0140	Horizontal	1,40	134	-	0	-	-	67	134
9	GPC12-1095	Horizontal	10,95	110	168	157	-	144	145	168
10	GPC13-1181	Horizontal	11,81	118	66	82	30	136	86	136
11	GPC21-0210	Vertical	2,10	-	203	173	185	-	187	203
12	GPC31-0216	Vertical	2,16	174	134	159	83	-	138	174
13	GPC32-1040	Vertical	10,40	-	133	-	122	-	128	133
14	GPC33-1134	Vertical	11,34	-	-	-	159	-	159	159
15	TC11-0290	Horizontal	2,90	11	51	26	02	60	30	60
16	TC12-1542	Horizontal	15,42	99	139	107	76	194	123	194
17	TC13-1631	Horizontal	16,31	27	39	26	12	42	29	42
18	TC14-1720	Horizontal	17,20	45	56	17	47	40	41	56
19	TC15-1810	Horizontal	18,10	67	16	13	01	43	28	67
						Moyenne (%) :			85 ± 53	120 ± 58

Tableau 27 : Intensité de pic à l'essai de surcarottage (APS) au niveau des jauges orthoradiales ; valeur moyenne et maximale mesurée pour chaque essai de surcarottage - campagne 2005-2006.

N° essai	Réf. essai/carotte	Date de l'essai (h ou jour)	APB (%)					APB moyenne (%)	APB maximale (%)
			J2	J6	J8	J11	J12		
1	GEC11-0070	-	-	-	-	-	-	-	-
2	GEC12-0241	-	-	-	-	-	-	-	-
3	GEC13-1040	1h20	20	19	10	24	12	17	24
4	GEC14-1130	4h00	-	2	8	11	0	5	11
5	GEC21-0140	1h00	30	40	39	41	47	39	47
6	GEC22-1031	-	-	-	-	-	-	-	-
7	GEC23-1137	-	-	-	-	-	-	-	-
8	GPC11-0140	0h45	26	-	18	35	-	26	35
9	GPC12-1095	1 jour	0	0	0	0	0	0	0
10	GPC13-1181	-	-	-	-	-	-	-	-
11	GPC21-0210	-	-	-	-	-	-	-	-
12	GPC31-0216	-	-	-	-	-	-	-	-
13	GPC32-1040	2h00	11	12	-	20	-	14	20
14	GPC33-1134	1h00	-	-	-	9	-	9	
15	TC11-0290	1h10	31	30	23	28	29	28	31
		7 jours	-	-	-	-	-	-	-
16	TC12-1542	3 j et 7h	-	-	-	-	-	-	-
17	TC13-1631	1h20	16	22	18	11	16	17	18
18	TC14-1720	1h00	24	28	24	23	24	25	28
19	TC15-1810	0h45	33	27	24	23	31	28	33
					Moyenne (%) :			19 ± 12	25 ± 13

Tableau 28 : Intensité de Pic à l'essai biaxial (APB) au niveau des jauges orthoradiales ; valeurs moyennes et maximales observées pour chaque essai. Lors de l'essai : Temps qui s'est écoulé entre l'essai de surcarottage et l'essai biaxial.

VII. ANNEXE G

ANNEXE G : RECAPITULATIF DES PHENOMENES ATYPIQUES OBSERVES LORS DE L'ESSAI DE SURCAROTTAGE SE TROUVANT DANS LA LITTERATURE

Tableau 29 Récapitulatif des Phénomènes atypiques observés lors de l'essai de surcarottage se trouvant dans la littérature

	Année	Pays	Nom de la revue	Référence	Titre de la publication	Type de cellule « surcarottage »	Lieu de l'essai	Nature roche	Fluide utilisé	Phénomènes atypiques observés	Hypothèses émises
M. Hakal, J.A. Hudson, R. Christiansson	2003	Finland UK Sweden	**IJRMMS** Special Issue	**issue 7-8** vol 40 1141–1159	Quality control of overcoring stress measurement data	Bore Probe CSIRO HI **(Modélisation)**	Aspo Sud-est de la Suède	diorite	eau	Faible « pic » de déformations au surcarottage. Saut de mesure initial au début du surcarottage. Saut de mesure final après l'arrêt du surcarottage.	Polymérisation incomplète de la colle. Effet de la variation de la température due à l'abrasion de la roche par le carottier. Comportement visco-plastique de la roche.
D. Ask	2003	Sweden	**IJRMMS** Special Issue	**issue 7-8** vol 40 1173–1187	Evaluation of measurement rated uncertainties in the analysies of overcoring rock stress data from Aspo. HRL	CSIRO HI	Sud-est de la Suède Zones fracturées entourant un tunnel	Aaspo rock Granite diorite	eau	Saut de mesure initial au début du surcarottage. Faible dérive des déformations après le passage du carottier par le plan de mesure.	Polymérisation incomplète de la colle. Effet de l'élévation de la température lors du Surcarottage. Mauvais collage des jauges de déformation.
Y. Obara, K. Sugawar	2003	Japan	**IJRMMS** Special Issue	**issue 7-8** vol 40 1189–1203	Updating the use of the CCBO cell in Japan: overcoring case studies	CCBO	Torigata limestone mine Kochi Japan	Calcaire	eau	« Pic » des déformations très marqué lors du passage du carottier par le plan de mesure.	Microfracturation de la carotte lors du surcarottage.
J. Sjoberg, H. Klasson	2003	Sweden	**IJRMMS** Special Issue	**issue 7-8** vol 40 1205–1223	Stress measurements in deep boreholes using the Borre (SSPB) probe	Borre (SSPB) probe	-	granite	-		Recommandations concernant une éventuelle Microfracturation de la carotte lors du surcarottage.
Y. Obara, Y. Ishiguro	2004	Japan	**IJRMMS**	issue 5 vol 41 7761-769	Measurements of induced stress and strength in the near-field around a tunnel and associated estimation of the Mohr-Coulomb parameters for rock mass strength	CCBO	underground gallery Sakuma, Shizuoka Japan	granite	eau	« Pic » des déformations très marqué lors du passage du carottier par le plan de mesure.	Microfracturation de la carotte lors du surcarottage.
D. Ask	2005	Sweden	**IJRMMS**	**issue 1** vol 43 107-126	New developments in the Integrated Stress Determination Method and their application to rock stress data at the Aspo HRL, Sweden	CSIRO HI	Sud-est de la Suède Zones fracturées entourant un tunnel	Aaspo rock Granite diorite	eau	Saut de mesure initial au début du surcarottage. Faible dérive des déformations après le passage du carottier par le plan de mesure.	Polymérisation incomplète de la colle. Effet de l'élévation de la température lors du Surcarottage. Mauvais collage des jauges de déformation.
D. Ask	2005	Sweden	**IJRMMS**	**issue 1** vol 43 127-138	Measurement-related uncertainties in overcoring data at the Aspo HRL Sweden. Part 2: Biaxial tests of CSIRO HI overcore samples	essai Biaxiale	Sud-est de la Suède Zones fracturées entourant un tunnel	Aaspo rock Granite diorite	eau	Faible « Pic » des déformations à l'essai biaxial	Fermeture des microfissures (apparues lors de l'essai de surcarottage) pendant la phase de Serrage.
M. Hakal,	2006	Finland	Posiva Oy OLKILUTO FINLAND	106 pages	Quality Control for Overcoring Stress Mesurement Data	Borre Probe **(Modélisation)**	Aspo Sud-est de la Suède	diorite	eau	« Pic » des déformations très marqué lors du passage du carottier par le plan de mesure. « Pic » des déformations à l'essai biaxial.	Mauvais collage des jauges de déformation Effet de la température.

	Année	Pays	Nom de la revue	Référence	Titre de la publication	Type de cellule « surcarottage »	Lieu de l'essai	Nature roche	Fluide utilisé	Phénomènes atypiques observés	Hypothèses émises
J. Sjöberg	2004	Sweden	Forsmark site investigation	105 pages	Overcoring rock stress measurements in borehole KFM01B	Borre Probe **(Modélisation)**	Forsmark Suède	granite -	eau	« Pic » des déformations très marqué lors du passage du carottier par le plan de mesure. Saut de mesure initial au début du surcarottage. « Pic » des déformations à l'essai biaxial.	Aucunes interprétations des phénomènes ne sont fournies.
U. Lindfors,	2007	Sweden	Forsmark site investigation	84 pages	Overcoring rock stress measurements in borehole KFM07B	Borre Probe **(Modélisation)**	Forsmark Suède	clay	eau	« Pic » des déformations très marqué lors du passage du carottier par le plan de mesure. Saut de mesure initial au début du surcarottage. « Pic » des déformations à l'essai biaxial.	Aucunes interprétations des phénomènes ne sont fournies.
M. CAI **L. QIAO** **J. YU**	1995	China	**IJRMMS&GA**	issue 4 **vol 32** 375-384	Study and Tests of Techniques Stress Measurement Accuracy for Increasing Overcoring	CSIRO CSIR USBM UNSW	-	-	-	« Pic » de déformations au surcarottage.	Effet de l'élévation de la température lors du surcarottage. Influance du type de la cellule utilisée lors du surcarottage.
M. CAI **L. QIAO** **C. Li** **J. VU** **B. YU** **G. CHEN**	1995	China	**IJRMMS&GA**	issue 7-8 vol 32 735-739	Application of an for an Improved Hollow Inclusion Technique for *in situ* Stress Measurement in Xincheng Gold Mine, China	CSIRO	-	-	-	« Pic » de déformations au surcarottage. Très faibles valeurs de formations au plateau (après passage du carottier par le plan de mesure).	Microfracturation de la carotte lors du surcarottage. Effet de la variation de la température due à l'abrasion de la roche par le carottier.
R. Bertilson	2007	Sweden	**MASTER ' S THESIS**	**74 pages**	Temperature effects in overcoring stress mesurement	-	-	Des échantillons en aluminium	-	« Pic » de déformations au surcarottage. « Pic » des déformations à l'essai biaxial.	Etude détaillée de l'effet de température sur les mesures des essais de surcarottage et les essais biaxiaux.
G. Worotnicki	1993	Australia	**Comprehensive Rock Engineering**	**chapitre 13 329-394**	CSIRO Triaxial Stress Mesurement Cell	-	-	-	-		Etude détaillée de l'effet de température et du fluage de la colle sur les mesures des essais de surcarottage.
R.J. Walton **G. Worotnicki**	1986	Australia	**ISRS&RSM**	**479-488**	A comparaison of three borehole instruments for monitoring the change of rock stress with time	-	-	-	-		Etude détaillée sur l'effet de la température et de l'humidité sur le comportement de la colle utilisée pour la fixation de la cellule de mesure lors de l'essai de surcarottage.
R. Giot	2004	France	**PhD Theisis**	**225 pages**	Interpretation des mesures de contraintes par relaxation dans les formations argileuses profondes	CSIRO **(Modélisation)**	Mont Terri	Argilite à Opalinus	-	Faible « Pic » de déformations au surcarottage	Comportement élastoplastique de la roche.
P. Garritty **R.A. IRVIN** **IAN W. Farmer**	1985	UK UK USA	**US Sympsium on Rock Mechanics**	**26 th 1095-1102**	Problem associated with near surface *in-situ* stress mesurements by the overcoring method	-	-	-	-		Analyse détaillée de l'effet de l'élévation anormale et excessive de la température et du fluage de la colle sur les mesures des essais de surcarottage. Etude de l'effet combiné du fluage de la colle et de l'augmentation de la température lors du surcarottage

VIII. ANNEXE H-1

ANNEXE H-1 : TECHNIQUE DE MODELISATION 2D ET 3D DE L'ESSAI DE SURCAROTTAGE

Modèle 2D

Pour la modélisation 2D de l'essai de surcarottage en axisymétrie, nous avons utilisé le préprocesseur CLEO_2D.

Le modèle, illustré par la Figure 101, représente une coupe longitudinale de l'essai de surcarottage. L'essai présente une symétrie de révolution (sans prise en compte de la cellule de mesure et en considérant une distribution isotrope des contraintes), seule la moitié du modèle est étudiée (en axisymétrie).

Le maillage est d'autant plus fin (zone blanche – Phase 1 – Figure 102) qu'on se rapproche de la paroi du trou pilote, là où sont étudiées les variations des contraintes et des déplacements.

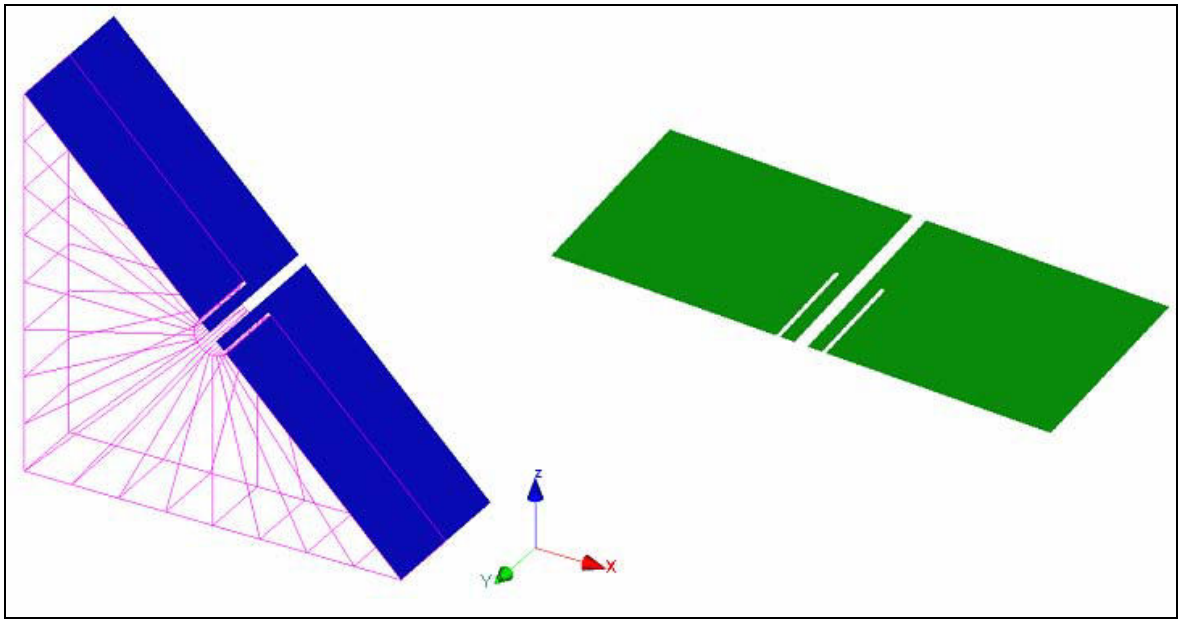


Figure 101 : coupe longitudinale de l'essai de surcarottage

Le forage du trou pilote (phase 2 – Figure 102) et la réalisation de la saignée de surcarottage (phase 3 - Figure 102) sont illustrés par une couleur grise (Figure 102).

Géométrie du modèle :

- r_1 : 19 mm (rayon du trou pilote)
- r_2 : 61 mm (rayon interne de la saignée de surcarottage, Figure 101 et Figure 102)
- r_3 : 73 mm (rayon externe de la saignée de surcarottage, Figure 101 et Figure 102)
- l : 300 mm (longueur de la saignée Figure 102)
- R : 730 mm (rayon du modèle, R = 10*r_3, Figure 102)
- L : 600 mm (longueur du modèle, Figure 34)

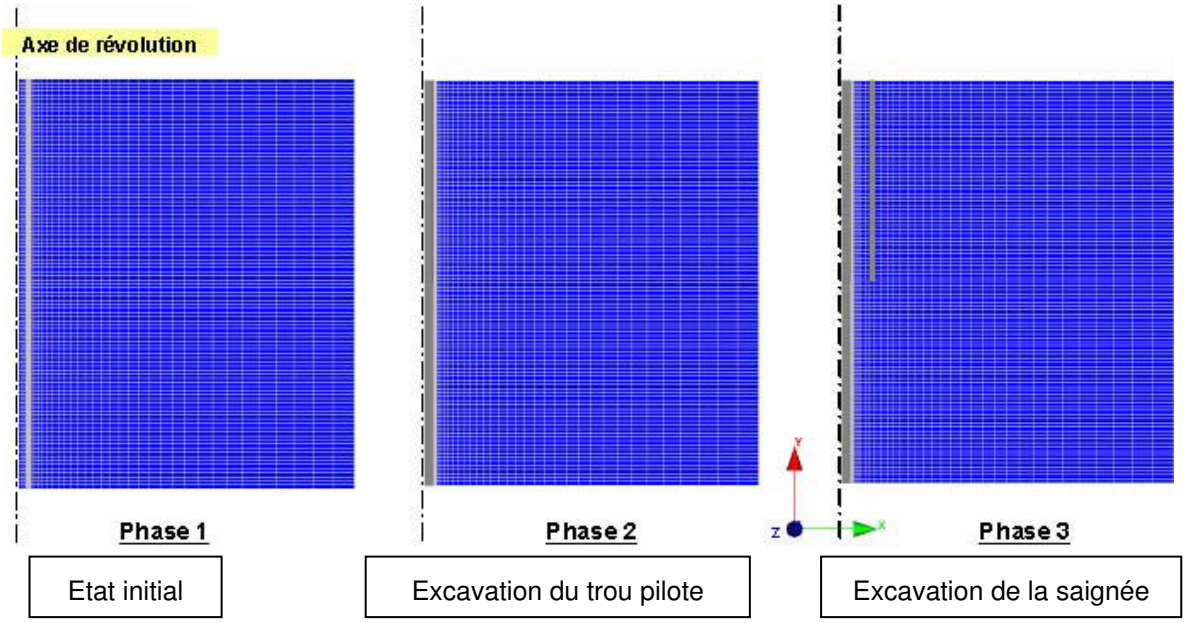


Figure 102 : Présentation du modèle 2D

Module de calcul : AXIF (calcul d'une structure élastique axisymétrique soumise à un chargement quelconque avec prise en compte du phasage).

Loi de comportement : élasticité linéaire isotrope

Paramètres élastiques : module de Young E = 9GPa ; coefficient de Poisson $\nu = 0,2$.

Etat de contraintes initial : isotrope $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 3$ MPa.

Les conditions aux limites se traduisent par des déplacements nuls tout au tour du modèle et sont représentés par une couleur orange sur la Figure 103 :

- Déplacement vertical nul pour les limites supérieure et inférieure ;
- Déplacement horizontal nul pour la partie droite du modèle ;
- Aucune condition à imposer du côté de l'axe de symétrie puisque par symétrie de révolution cette partie sera bloquée par le logiciel Figure 103 – Phase 1). Dans la 2ème et 3ème phase cette partie est libre de se déformer du fait de la présence du trou pilote.
- Dans la 3ème phase, la présence de la saignée de surcarottage permet de libérer la partie qui se trouve entre cette dernière et le trou pilote (Figure 103 – Phase 3 « Borne libre »).

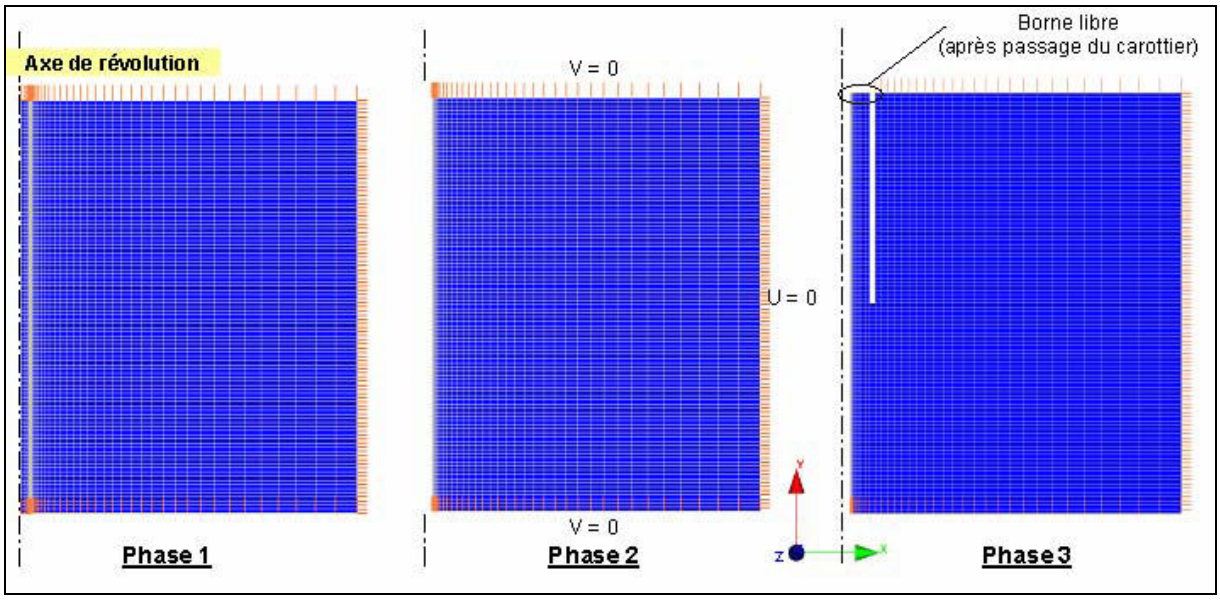


Figure 103 : Conditions aux limites du modèle 2D

Pour modéliser l'influence de l'excavation sur la roche environnante, on applique des forces de déconfinement sur les surfaces qui sont devenues externes. Elles sont représentées par des flèches en bleu (Figure 104).

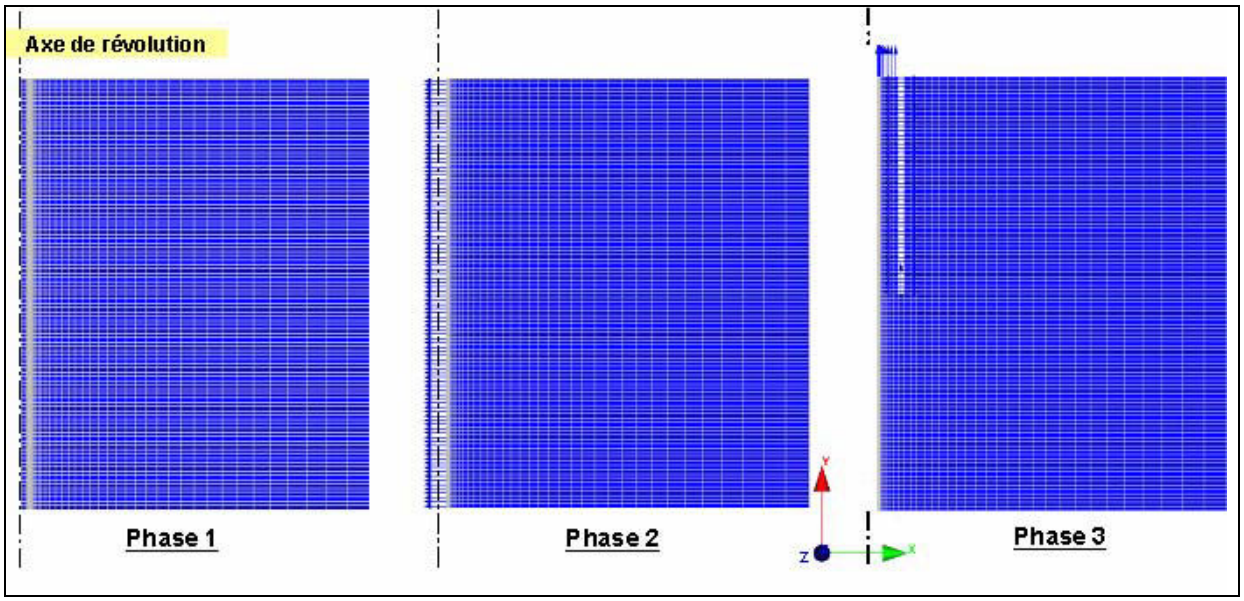


Figure 104 : Forces de déconfinement appliquées(flèches en bleu)

Modèle 3D

Pour pouvoir prendre en compte l'anisotropie de la roche ainsi que l'anisotropie de la distribution des contraintes et l'effet du coefficient de Poisson pour différentes orientations, la prise en compte de la 3ème dimension est nécessaire.

Pour la modélisation 3D de l'essai de surcarottage, nous avons utilisé le préprocesseur CLEO_3D.

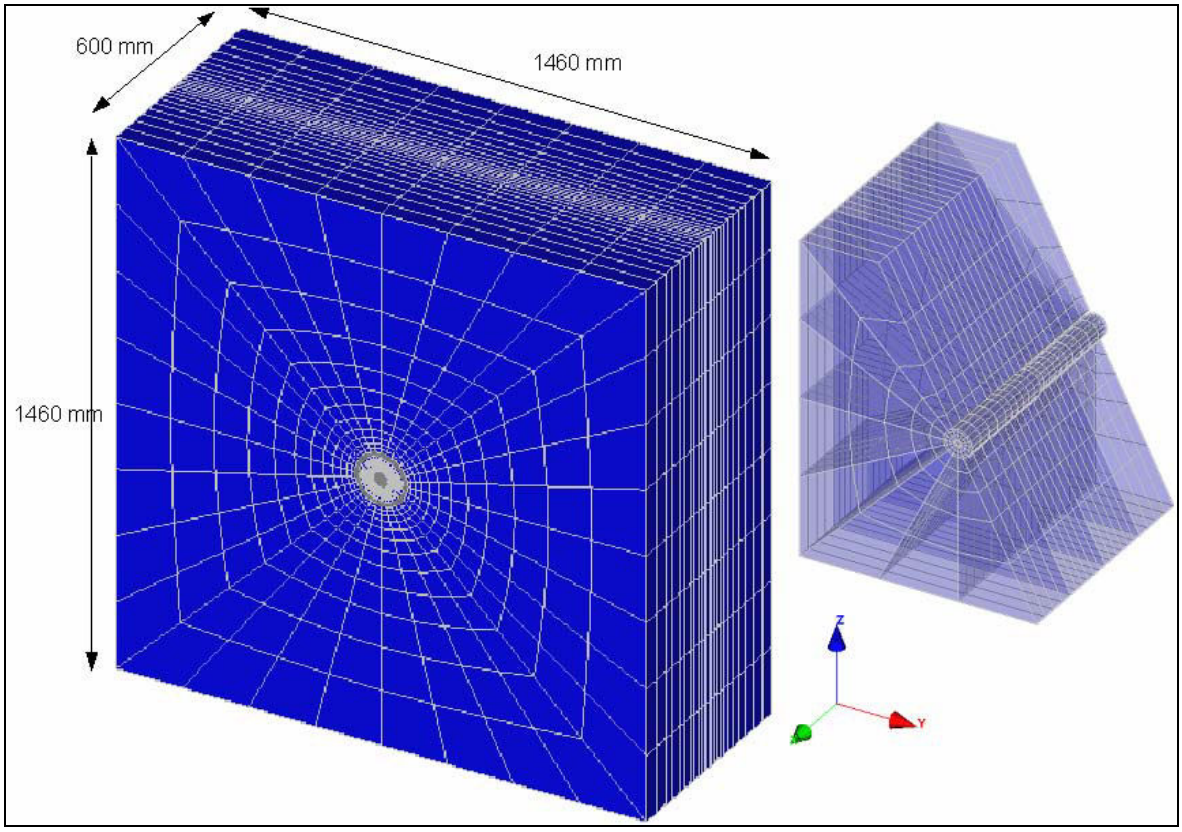


Figure 105 : Présentation du modèle 3D

Les dimensions du modèle retenu (Figure 105) sont :

- Diamètre du trou pilote : $d_1 = 2*r_1 = 38$ mm ;
- Diamètre interne de la saignée de surcarottage : $d_2 = 2*r_2 = 122$ mm ;
- Diamètre externe de la saignée de surcarottage : $d_3 = 2*r_3 = 146$ mm ;
- Une section carrée pour le modèle de côté : $H = 10*d_3 = 1460$ mm;
- Longueur du modèle : L = 600 mm

Le maillage tridimensionnel a été généré par translation à partir des maillages plans représentés par la Figure 106. Une attention particulière a été apportée à la discrétisation du maillage pour minimiser la durée des calculs tridimensionnels. Pour cela nous avons procédé à un maillage très fin au niveau de la zone d'intérêt représentée ici par la paroi du trou pilote.

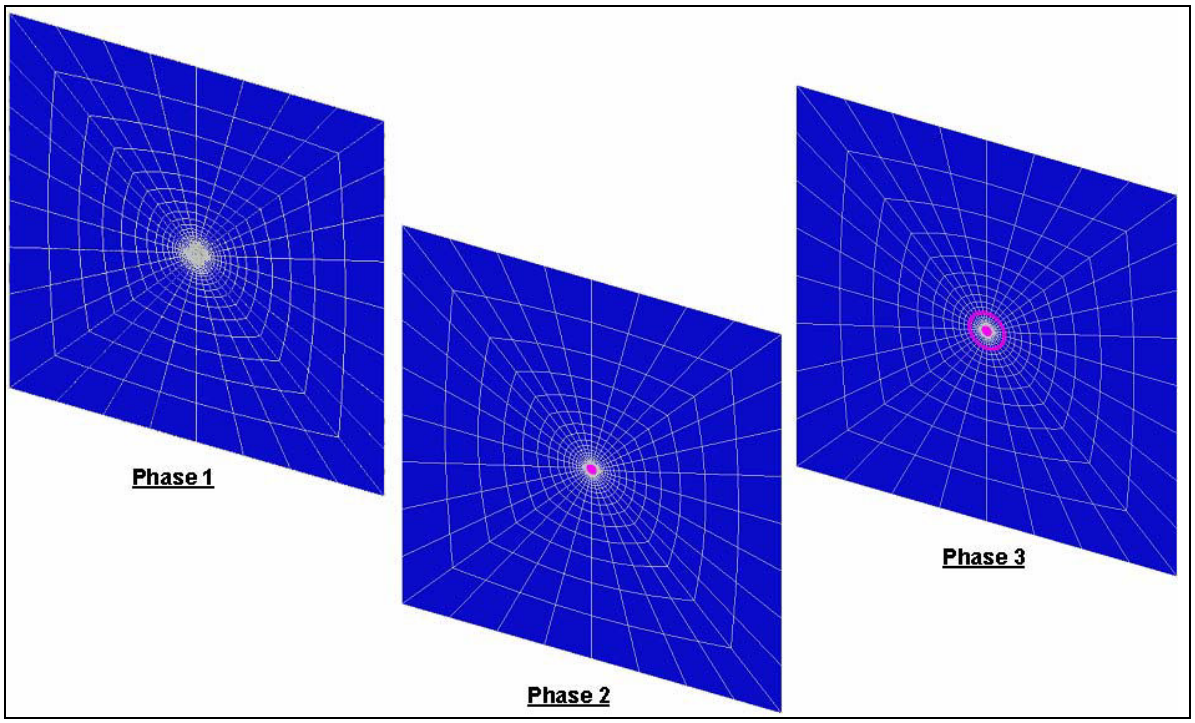


Figure 106 : Sections servant pour la confection du maillage 3D

Module de calcul : LINE (résolution d'un problème linéaire par la méthode directe avec prise en compte du phasage).

Loi de comportement : Elasticité Linéaire.

Paramètres élastiques : Roche isotrope / roche anisotrope.

Etat de contraintes initial : isotrope / anisotrope.

Les conditions aux limites se traduisent par des déplacements qu'on impose sur les six plans limitant le modèle et placés suffisamment loin de la zone d'influence (Figure 107) :

- Déplacements horizontaux nuls aux limites latérales du modèle ;
- Déplacements verticaux nuls aux limites supérieure et inférieure.
- Facettes libres de se déformer lors de la 2ème et 3ème phase, suite à l'excavation (Phase 2 – Phase 3 – Figure 107).

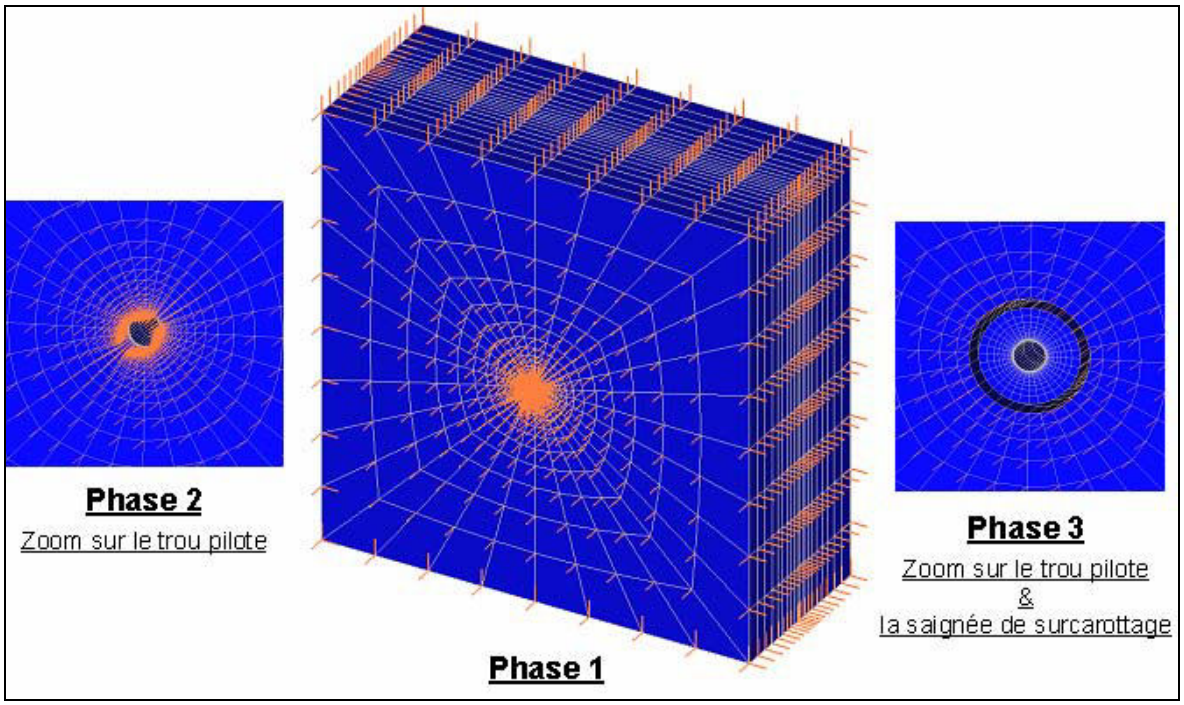


Figure 107 : Conditions aux limites du modèle 3D.

Tout comme pour le modèle 2D, pour pouvoir modéliser l'influence de l'excavation sur la roche environnante, on applique des forces de déconfinement sur les surfaces qui sont devenues externes. Elles sont représentées par des flèches en bleu (Figure 108).

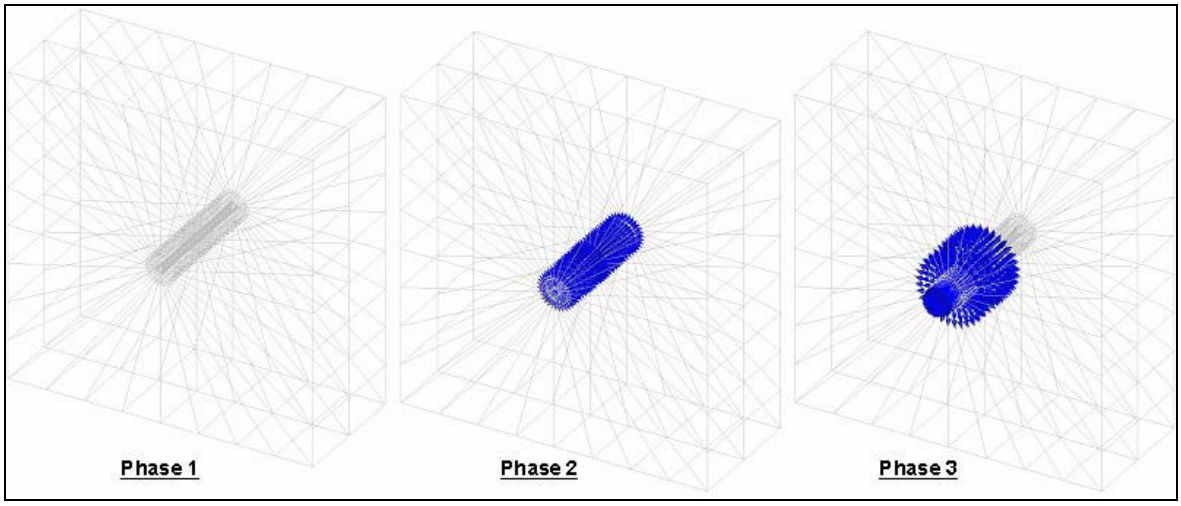


Figure 108 : Forces de déconfinement, modèle 3D

IX. ANNEXE H-2

ANNEXE H-2 : TECHNIQUE D'OPTIMISATION DU MAILLAGE 3D ET VERIFICATION/VALIDATION DES DIFFERENTES PHASES DU MODELE DE SURCAROTTAGE

Optimisation du maillage pour la phase 2

Pour cette optimisation nous nous sommes basés sur la comparaison entre les contraintes (radiales et orthoradiales) obtenues par la modélisation et celles obtenues par les solutions analytiques de Kirsch, pour une section transversale (Figure 109). Pour le modèle 2D, le plan de la coupe est indiqué par une ligne orientée par des flèches vertes.

Les coupes sont choisies au milieu du modèle afin de s'affranchir de l'effet de bord.

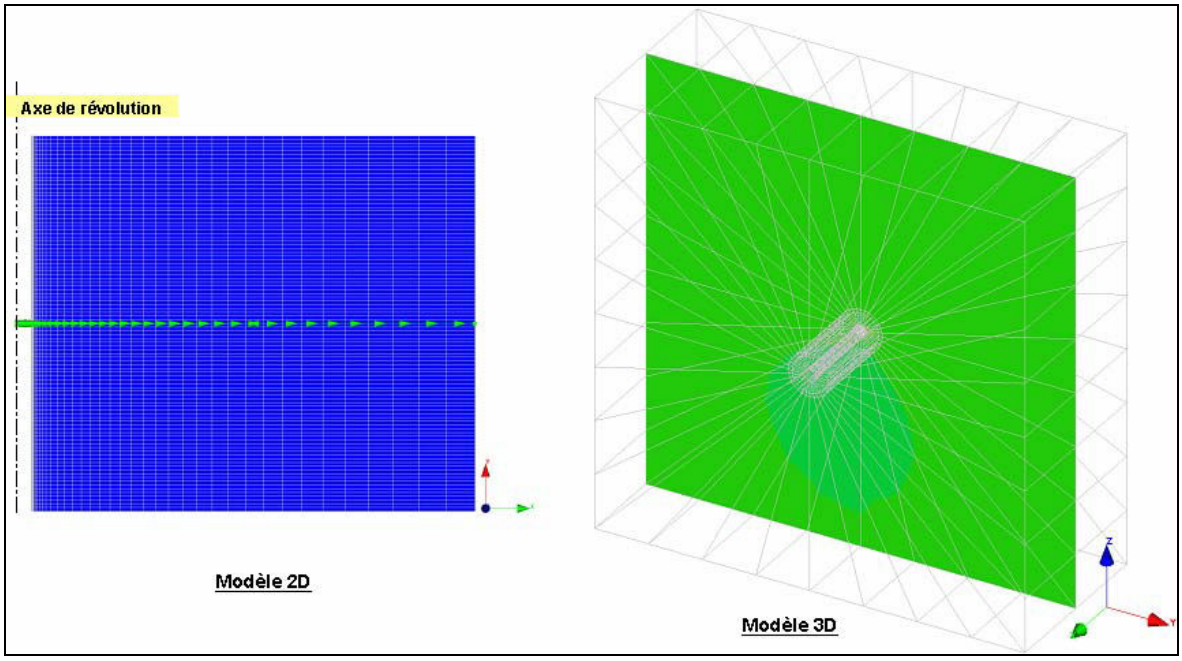


Figure 109 : Coupes transversales – Phase 2

La dimension des mailles des modèles a été ajustée pour que les contraintes en paroi du trou pilote, à l'issue de la phase 2, reproduisent au mieux les contraintes prédites par les formulations de Kirsch (Figure 111). Les résultats obtenus sur les contraintes orthoradiales sont très satisfaisants : les valeurs obtenues par la modélisation et par la théorie se superposent avec une erreur inférieure à 1 %. Dans le Tableau 30, on présente la sensibilité de la contrainte radiale à la largeur de la maille la plus proche du trou pilote dans une section transversale. Afin d'accéder à des mailles de très faibles dimensions (inférieures à 1 mm) nous avons eu recours à l'augmentation du facteur d'échelle de notre modèle (Figure 110).

	Dimension de la maille	σ_{rr} [MPa]	Erreur (%)	Facteur d'échelle
Kirsch	-	0	0	-
2D	1 mm	0.220	7	1
3D	4mm	0,740	25	
	2 mm	0,390	13	
	1.5 mm	0,300	10	
	1mm	0,210	7	
	0.5 mm	0,092	3	100
	0.4 mm	0,092	3	
	0.3 mm	0,071	2	
	0.2 mm	0,051	1,7	
	0.1 mm	0,030	1	
2D	0.1 mm	0,020	0,67	

Tableau 30 : Etude de la dimension optimale du maillage

Le facteur d'échelle est une homothétie dont le rapport est mentionné dans le Tableau 30.

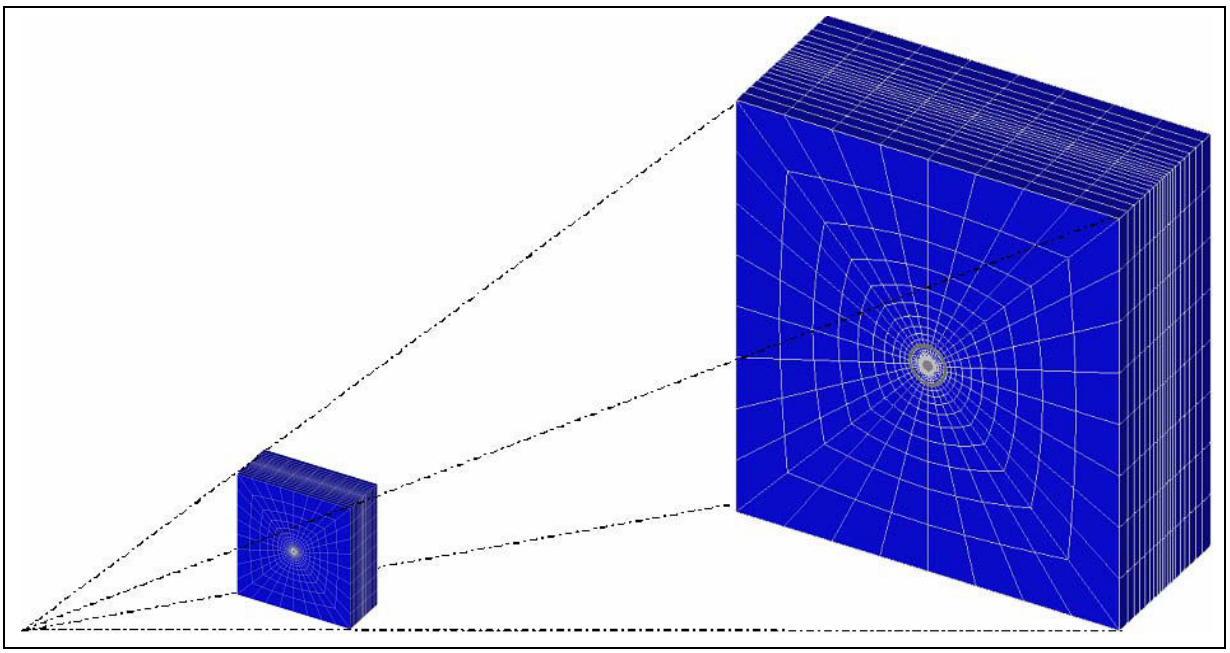


Figure 110 : Représentativité du facteur d'échelle

A la vue des résultats de cette optimisation, nous avons opté pour la dimension de la plus petite maille (celle située sur la paroi), 0,1 mm, cette dimension a été retenue pour les modèles 2D et 3D.

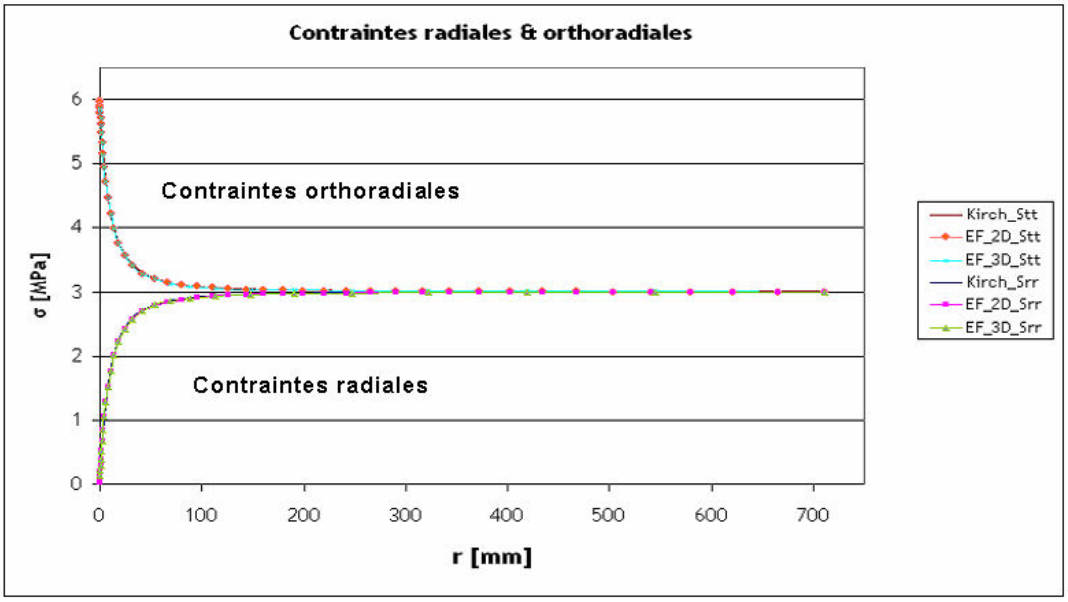


Figure 111: Contraintes obtenues lors de la phase 2

Par la suite, en utilisant cette méthode de maillage, nous avons procédé à la comparaison des résultats obtenus en terme de contraintes radiales et orthoradiales pour la validation de la phase 2 (Figure 111).

<u>Validation de la phase 3</u>

Compte tenu du fait que les résultats obtenus lors d'un essai de surcarottage sont des déformations (Figure 7, Figure 25), la validation de la Phase 3 (présence de la saignée de surcarottage) est basée sur une comparaison entre les résultats des modèles 2D et 3D en termes de déformations (Figure 112).

Le code de calcul CESAR-LCPC ne permettant pas d'obtenir directement les déformations, seuls les déplacements et les contraintes selon les trois axes dans le repère cartésien XYZ du modèle sont disponibles, le passage des contraintes aux déformations se fait par l'intermédiaire de la matrice d'élasticité. Le passage du repère cartésien au repère cylindrique se fait à partir d'une matrice de passage (Annexe E).

Nous présentons sur la Figure 112 les courbes des déformations radiales, orthoradiales et axiales sur la paroi du trou pilote obtenues pour la phase 3 des simulations 2D et 3D.

Pour le passage des contraintes dans le repère du logiciel aux déformations locales enregistrées sur chaque jauge $[\varepsilon_{li}]_{i=1...12} = [M] \bullet [\sigma]_{XYZ}$ se référer à l'ANNEXE U-2.

	$\varepsilon_{plateau}$			
	ε_{rr}	$\varepsilon_{\theta\theta}$	ε_{zz}	$\varepsilon_{\pm 45}$
Kirsch	-200	600	200	400
modélisation	-197,52	590,22	190,88	390,55
erreur (%)	1,24	1,63	4,56	2,36

Tableau 31 : plateau des déformations obtenu à partir de la Figure 112

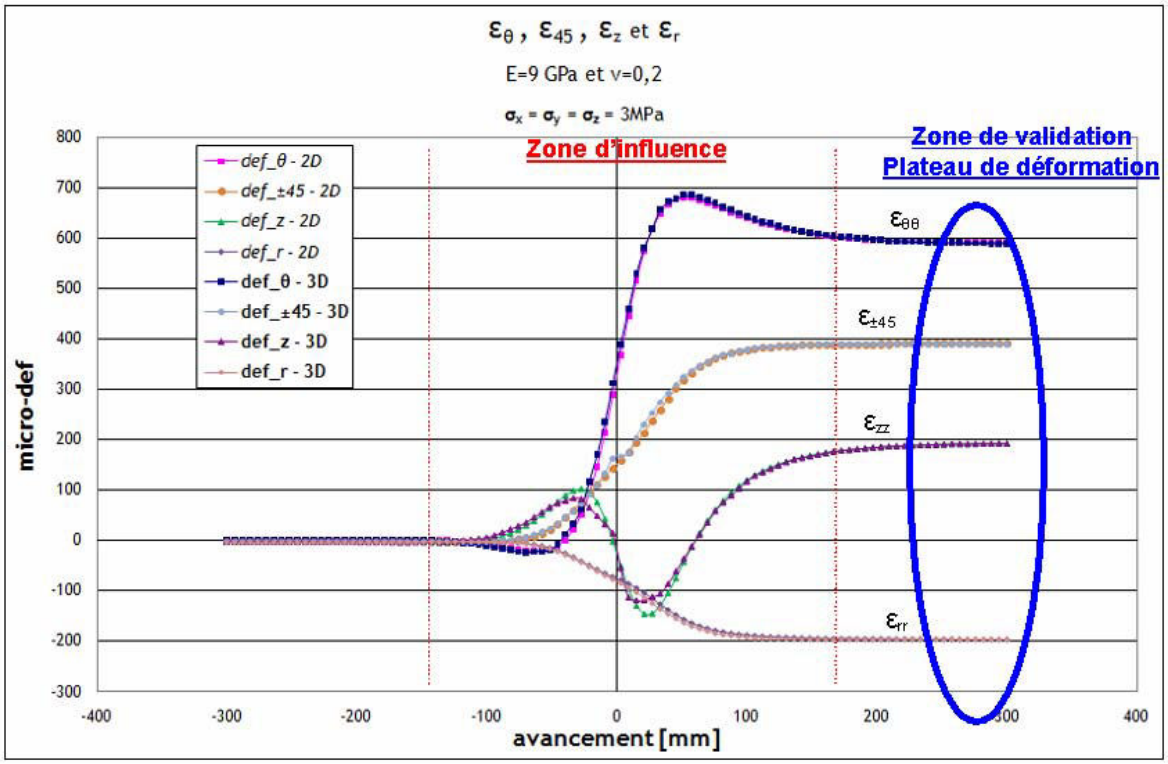


Figure 112 : Courbes de déformations obtenues lors de la phase 3

On peut valider la phase 3 en comparant les déformations obtenues par modélisation à ceux obtenues par les relations de Kirsch. Ceci n'est vrai que si on est suffisamment loin de la zone d'influence de la saignée (« zone d'influence » - Figure 112).

La comparaison entre les déformations obtenues par calcul analytique et celles obtenues par la modélisation montre une concordance avec une erreur comprise entre 1 et 5 % (Tableau 31) due aux conditions aux limites imposées au modèle. Dans la suite on ne s'intéressera qu'aux résultats des modèles 3D.

X. ANNEXE I

ANNEXE I : DISTRIBUTION DES CONTRAINTES AU COURS DU SORCAROTTAGE DETERMINEE A PARTIR DU MODELE 3D

L'objectif de cette partie est de visualiser la distribution des contraintes autour de la saignée de surcarottage (Figure 113) dans le but de remonter à une explication du phénomène du rebond observé lors de la modélisation de l'essai de surcarottage. Nous présentons donc les résultats d'un modèle utilisant un comportement élastique linéaire isotrope (module de Young E=9GPa, coefficient de Poisson ν=0,2) en présence d'un état de contraintes initial isotrope ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ = 3 MPa). Sur la figure ci-dessous, nous montrons la variation des contraintes de compression sur une section longitudinale.

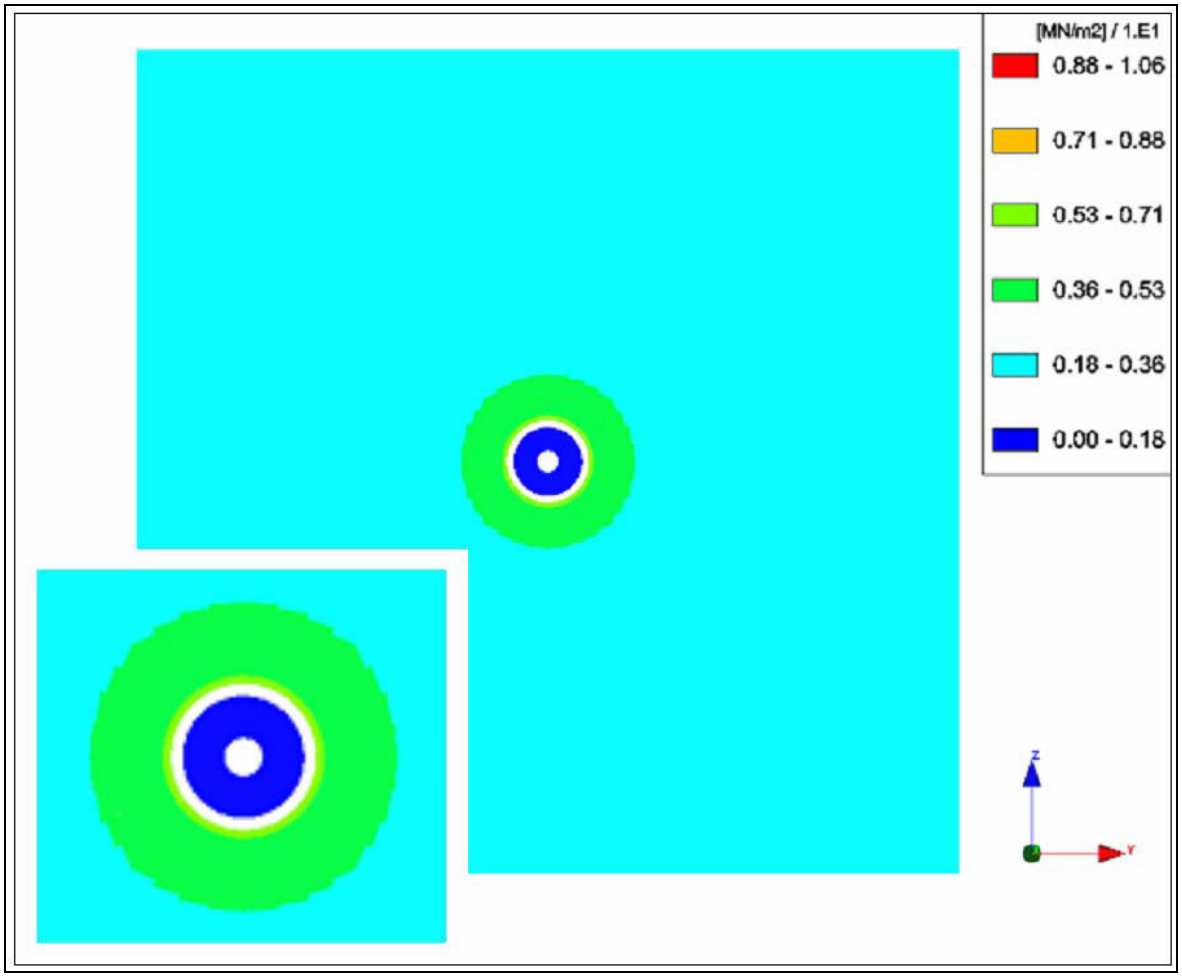


Figure 113 : Distribution des contraintes de compression sur une coupe longitudinale lors du passage du carottier

Nous remarquons la présence d'une zone de contrainte nulle qui caractérise le relâchement de contraintes dû à la présence de la saignée de surcarottage.

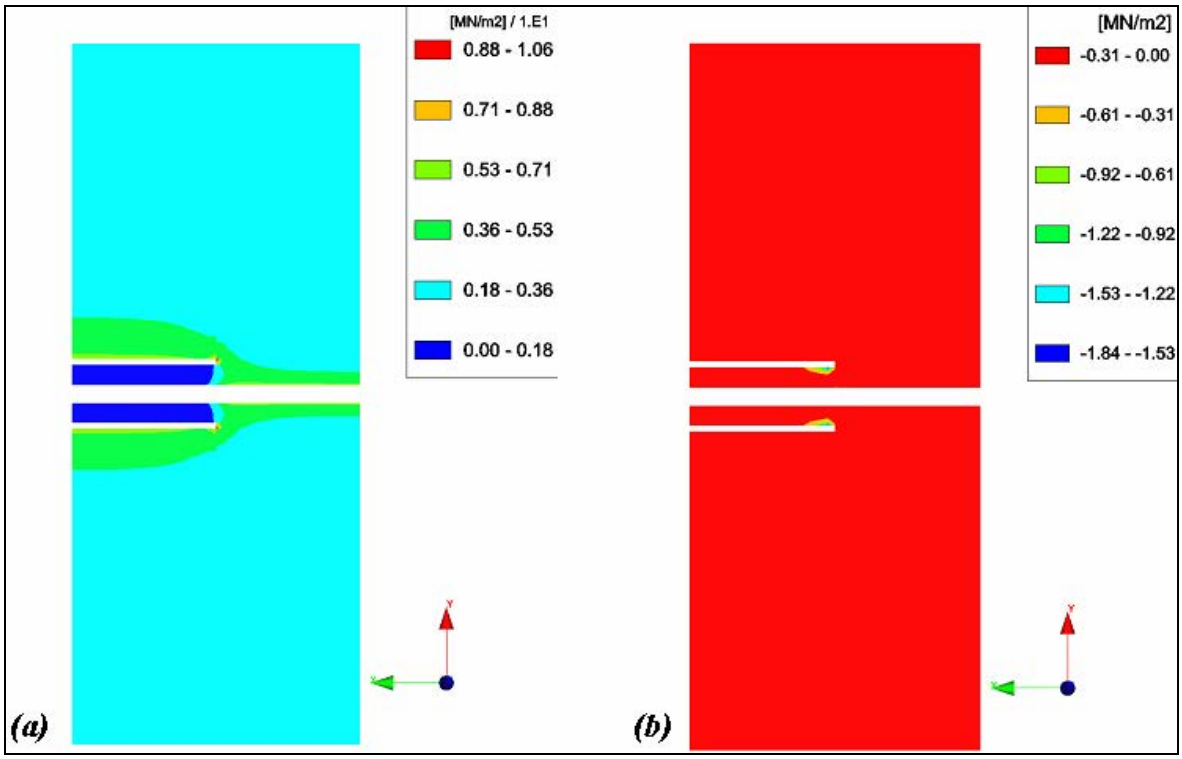


Figure 114 : Distribution des contraintes sur une coupe longitudinale lors du passage du carottier : (a) contraintes de compression ; (b) contraintes de traction

La Figure 114 montre la présence d'une zone de traction localisée au front de la saignée de surcarottage.

En se référant à la Figure 115, nous supposons que dans la réalité la roche passe par trois phases successives lors de l'avancement de la saigné de surcarottage :

- Phase 1 : phase de compression (état initial du massif) ;
- Phase 2 : phase de traction ;
- Phase 3 : phase de relâchement de contrainte (contrainte nulle).

Nous soupçonnons que ce mécanisme soit à l'origine du rebond observé dans la modélisation de l'essai de surcarottage (comportement élastique linéaire de la roche).

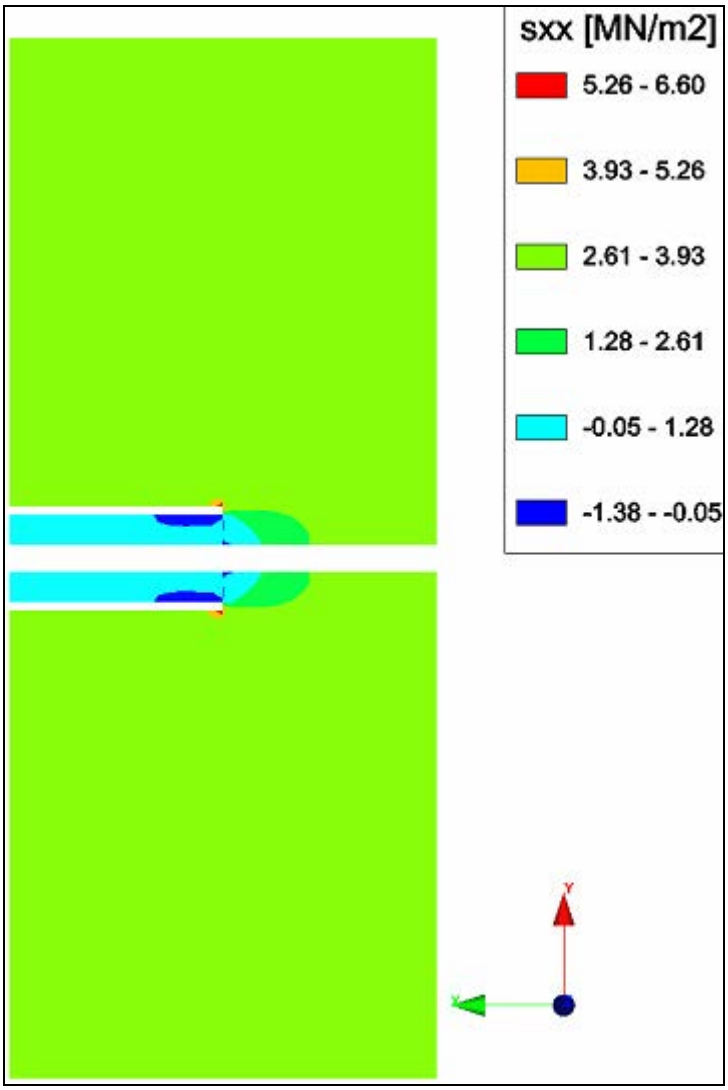


Figure 115 : Distribution des contraintes axiales sur une coupe longitudinale lors du passage du carottier

XI. ANNEXE J

ANNEXE J : COURBES $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{PLATEAU}$ EN FONCTION DE L'AVANCEMENT DU CAROTTIER

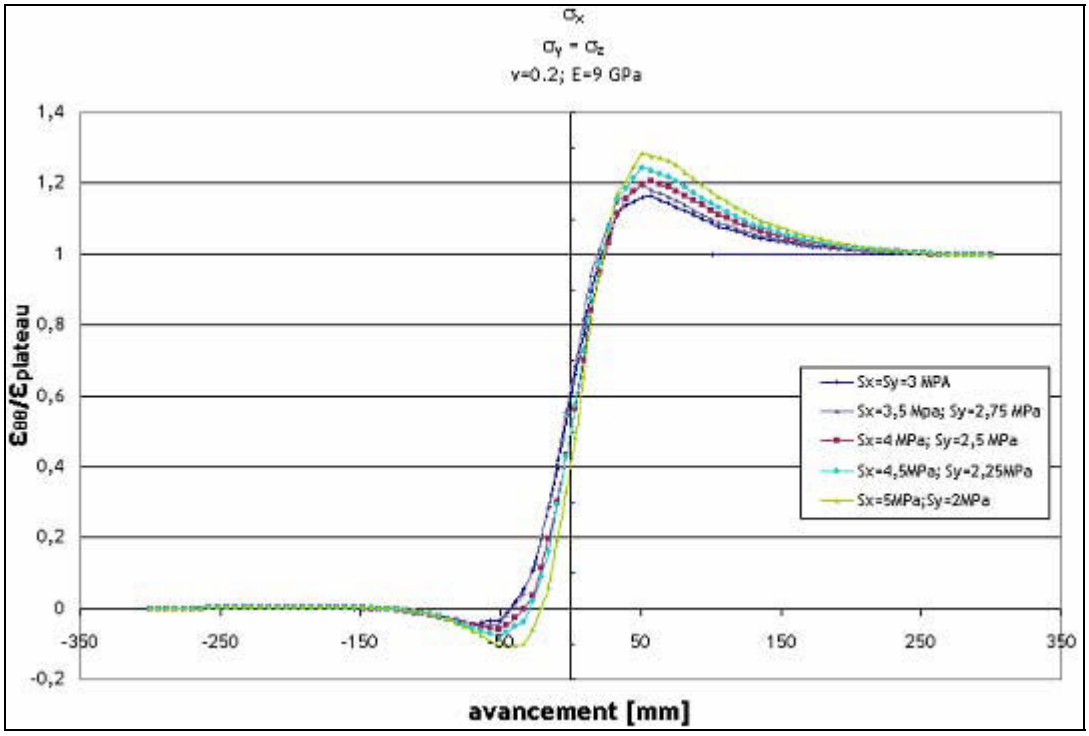


Figure 116 : Courbes $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier pour différents états de contraintes ($\sigma x > \sigma y = \sigma z$)

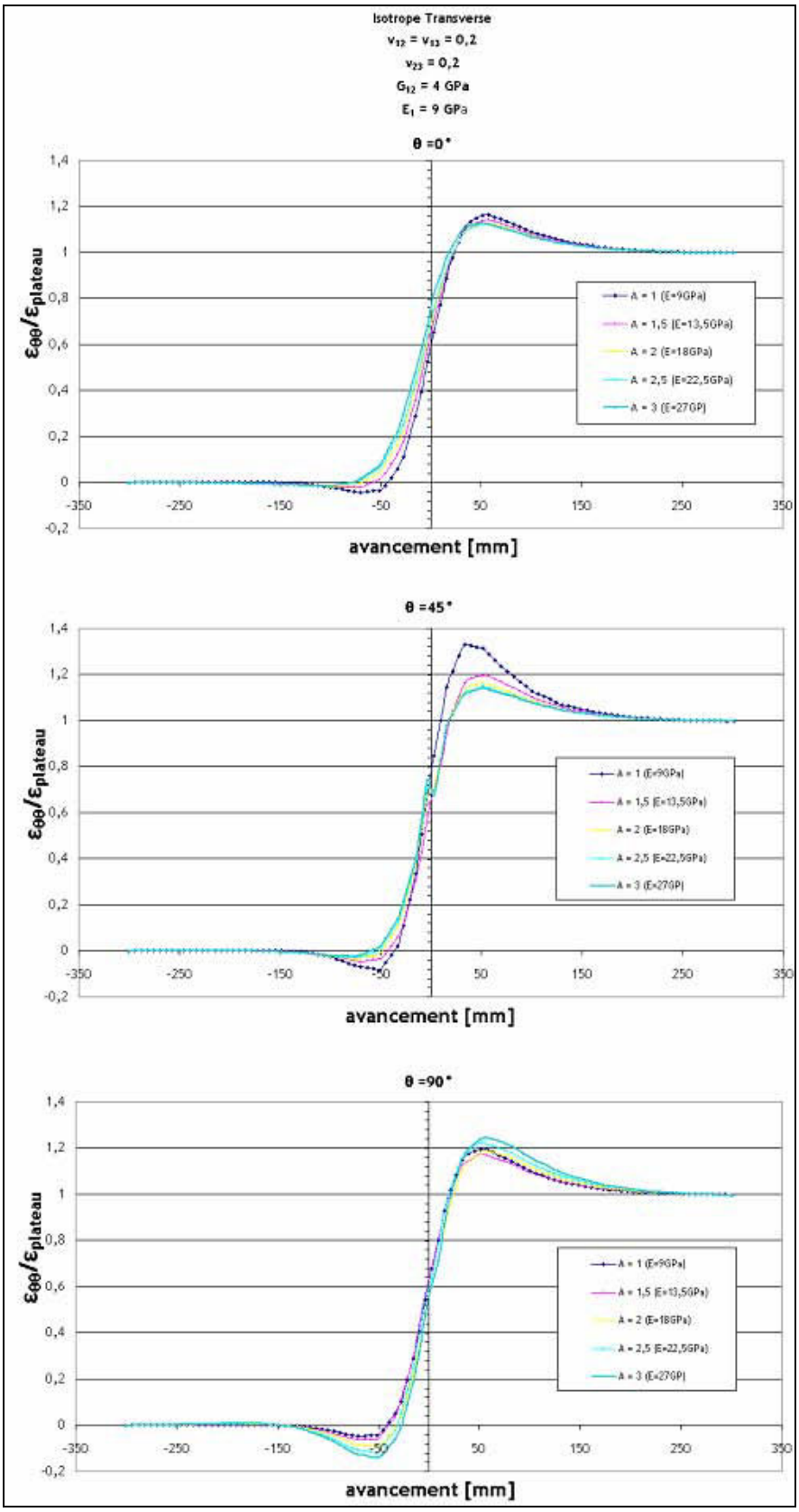


Figure 117 : Courbes $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier pour différentes valeurs de θ
Axe du trou Ex parallèle à la stratigraphie

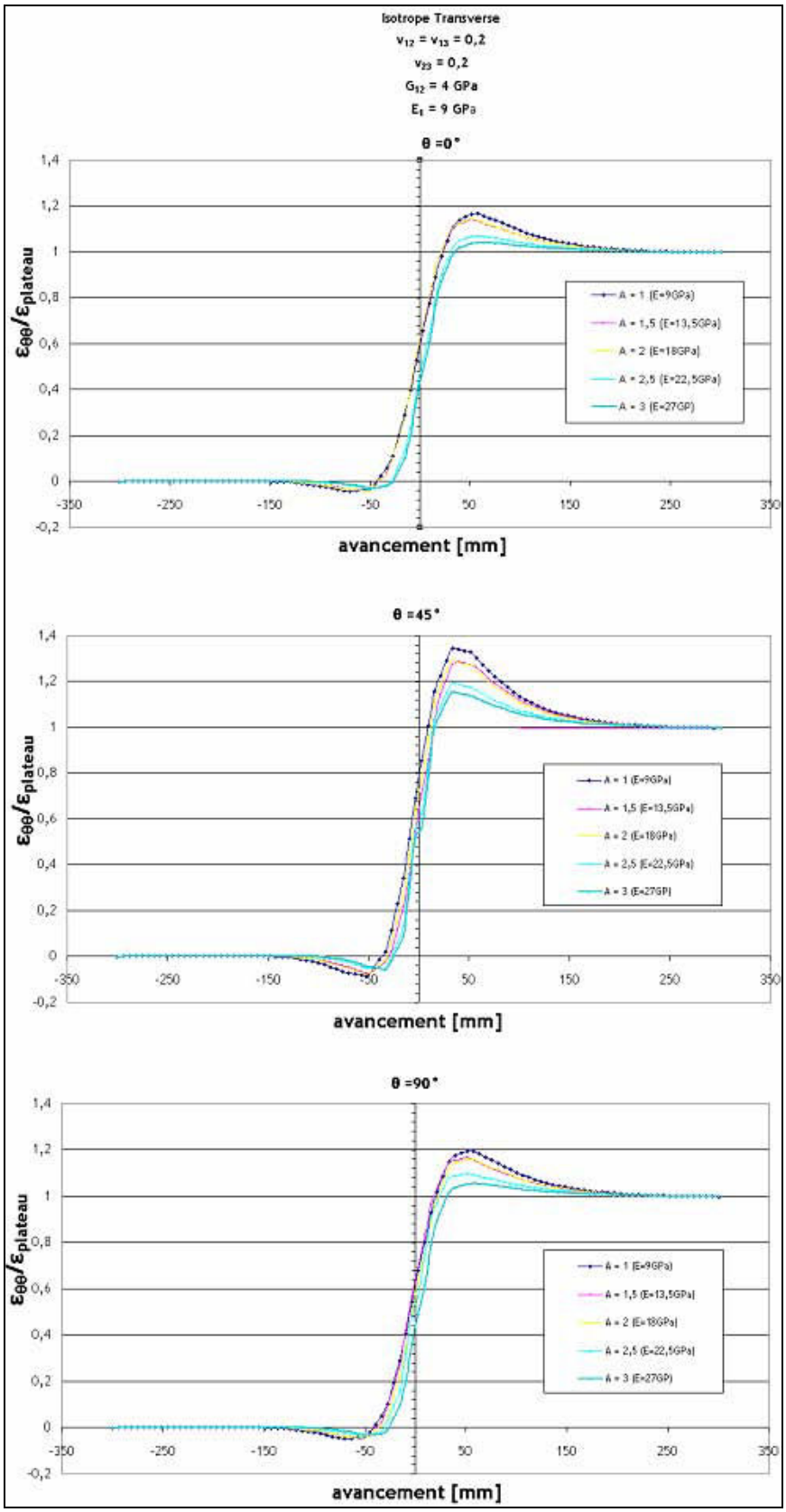


Figure 118 : Courbes $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier pour différentes valeurs de θ
Axe du trou Ex perpendiculaire à la stratigraphie

Anomalies dans le traçage Courbes $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier

En traçant les courbes $\varepsilon_{\theta\theta}$ en fonction de l'avancement du carottier (Figure 119) nous nous sommes rendu compte que dans les cas ou ν = 0,45; 0,3 ou 0,2 le rapport $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ n'est plus significatif puisque les valeurs plateau étaient soit négatives soit très faible par rapport aux valeurs pic (Figure 120) et donc le rapport était très grand en valeur algébrique.

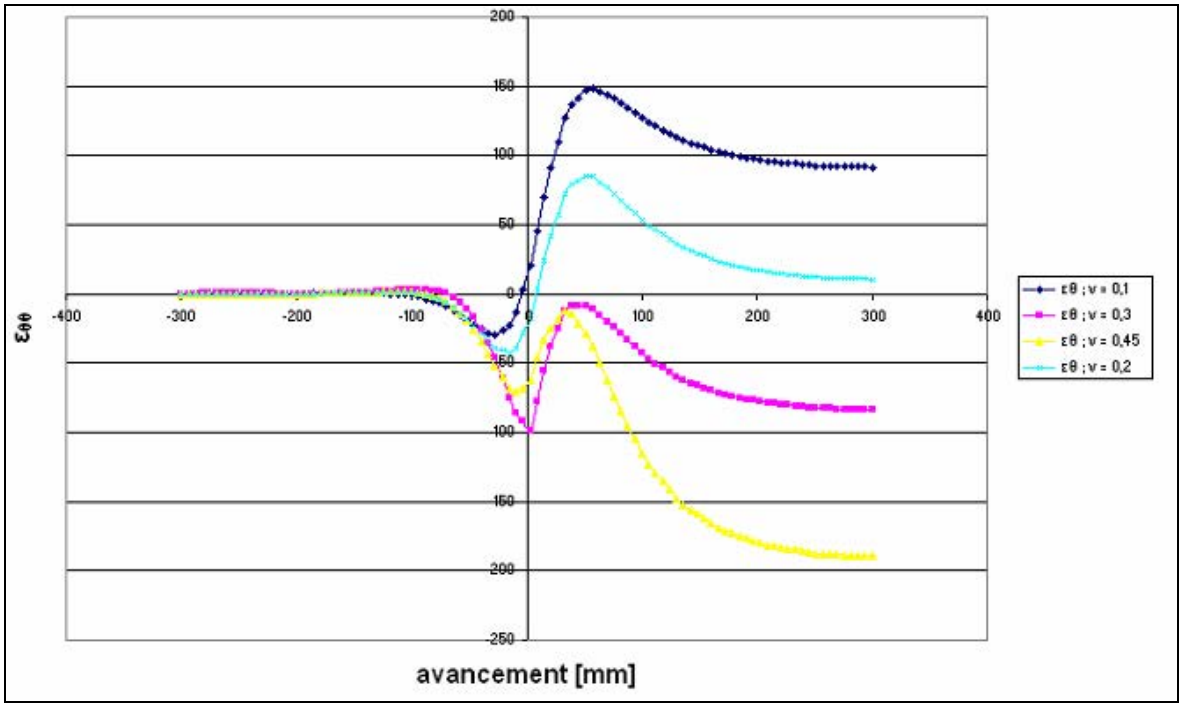


Figure 119 : Courbes de variation $\varepsilon_{\theta\theta}$ en fonction de l'avancement du carottier : scénario maximaliste, ν = 0,45 ; 0,3 ; 0,2 et 0,1

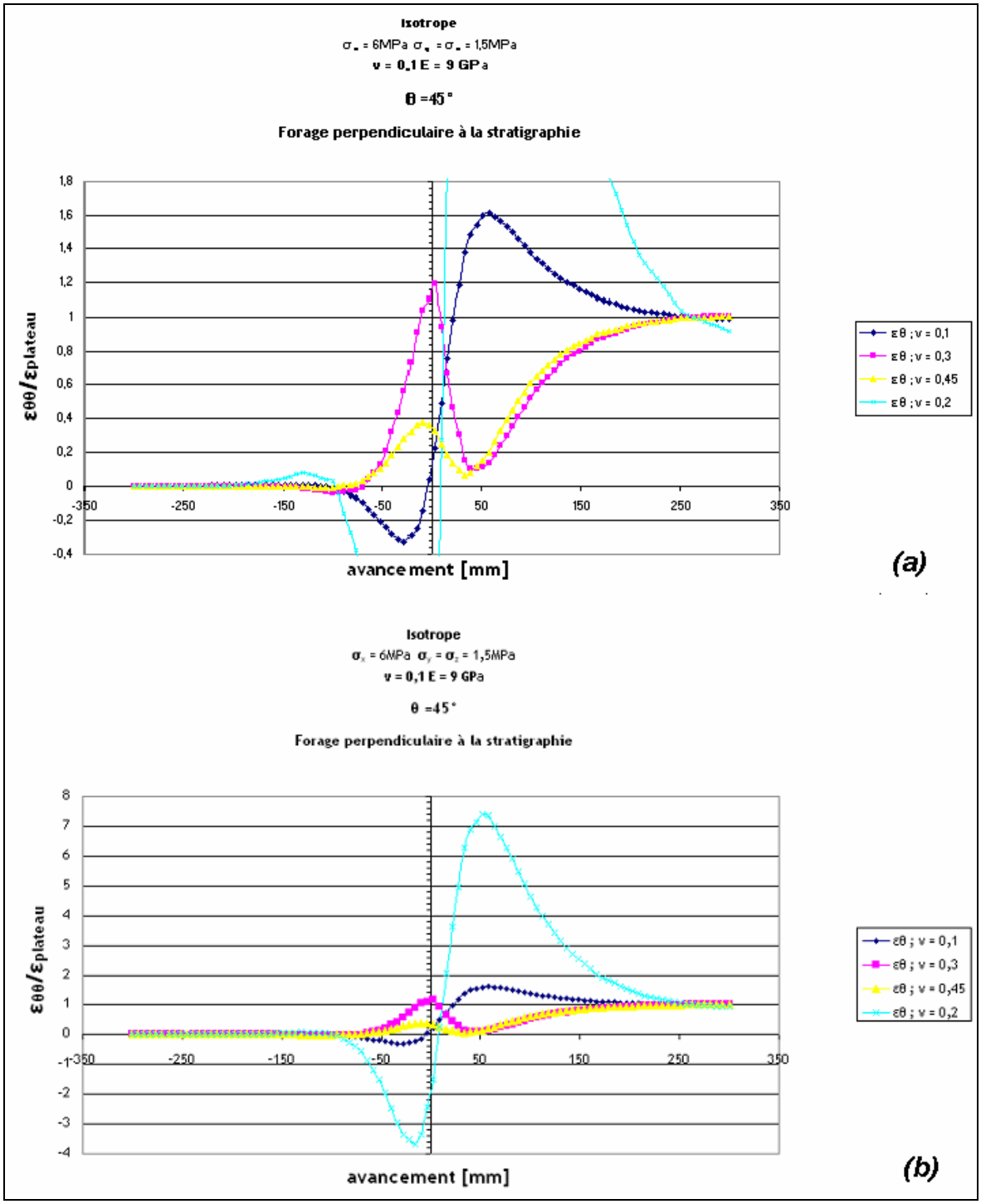


Figure 120 : Courbes de variation $\varepsilon_{\theta\theta}/\varepsilon_{plateau}$ en fonction de l'avancement du carottier : scénario maximaliste, ν = 0,45 ; 0,3 ; 0,2 et 0,1 (a) Echelle des ordonnés : [-0,4 ;1,8], (b) Echelle des ordonnés : [-4 ;8]

XII. ANNEXE K

ANNEXE K : COURBES DE DEFORMATIONS OBTENUES LORS DES ESSAIS DE SURCAROTTAGES DE LA CAMPAGNE DE 2008

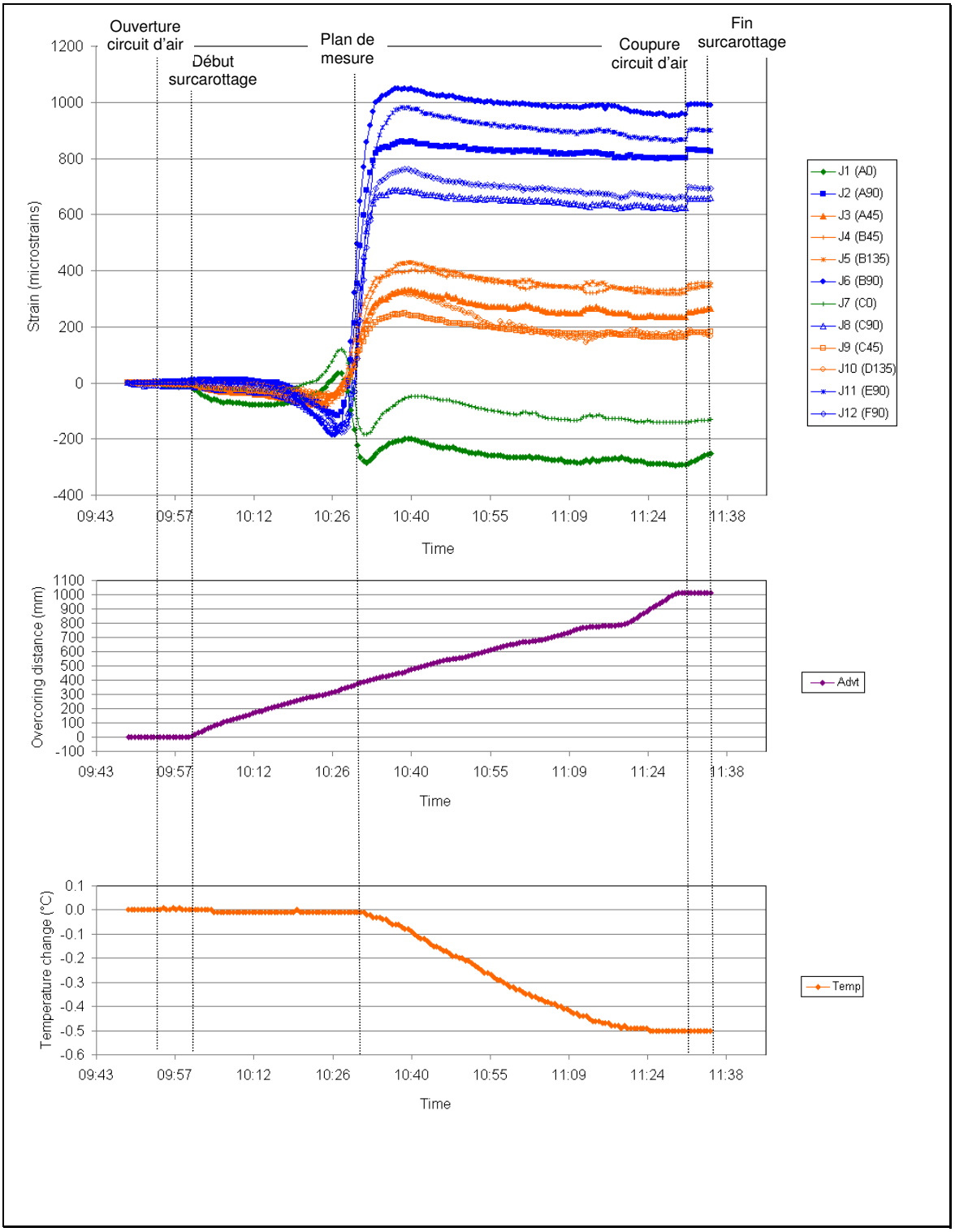


Figure 121 : Essai de surcarottage TC31 – Campagne 2008

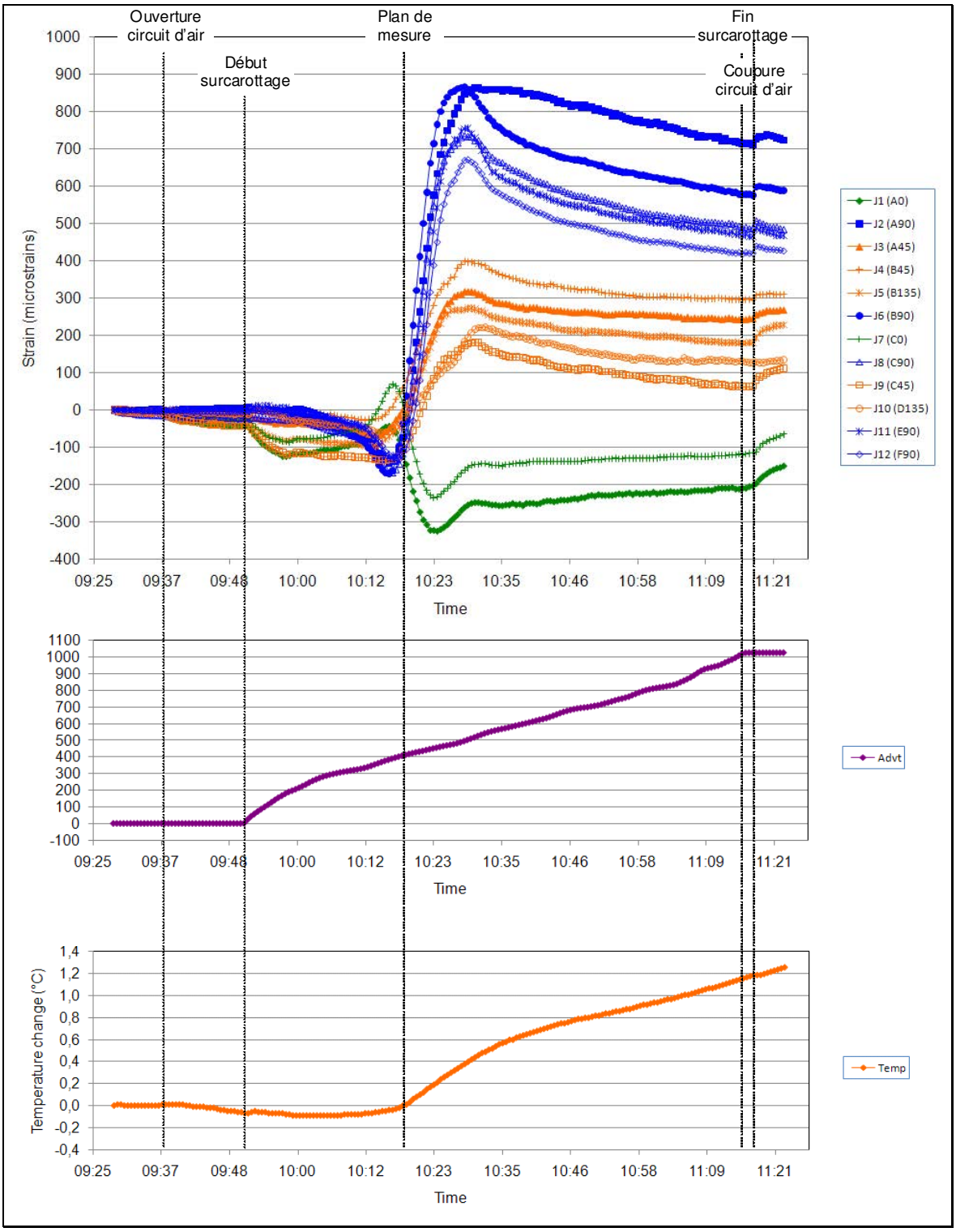


Figure 122 : Essai de surcarottage TC32 – Campagne 2008

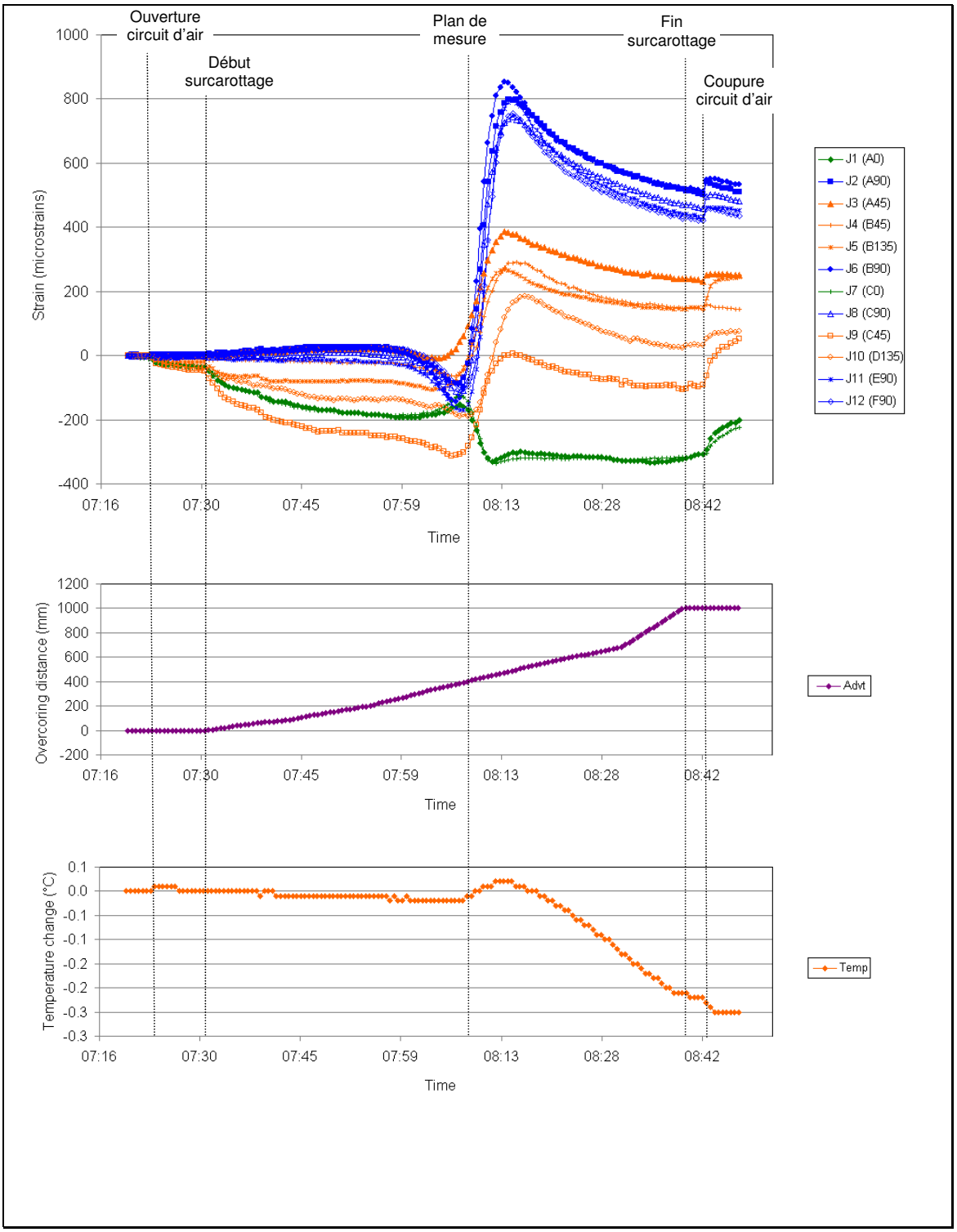


Figure 123 : Essai de surcarottage TC33 – Campagne 2008

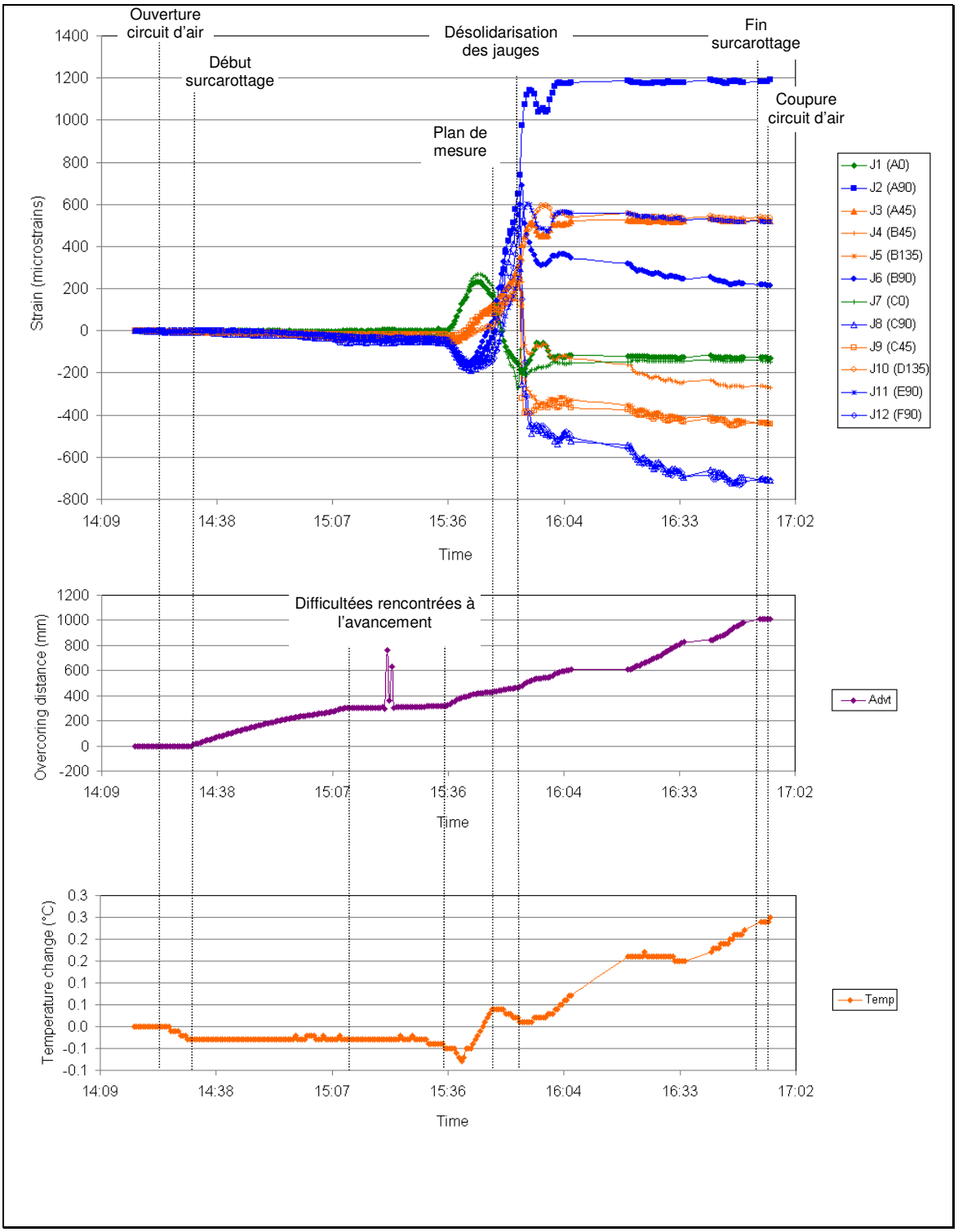


Figure 124 : Essai de surcarottage TC34 – Campagne 2008

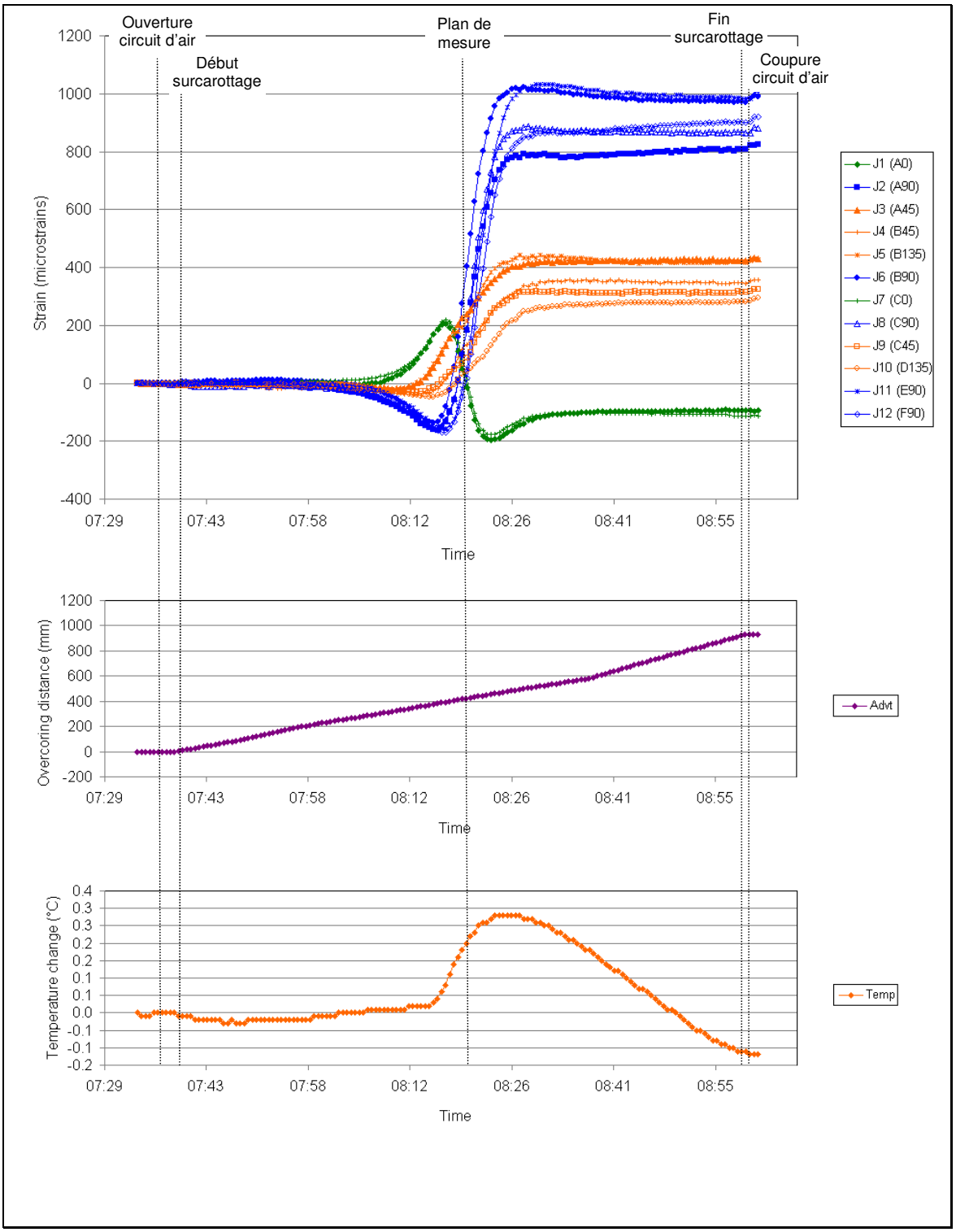


Figure 125 : Essai de surcarottage TC35 – Campagne 2008

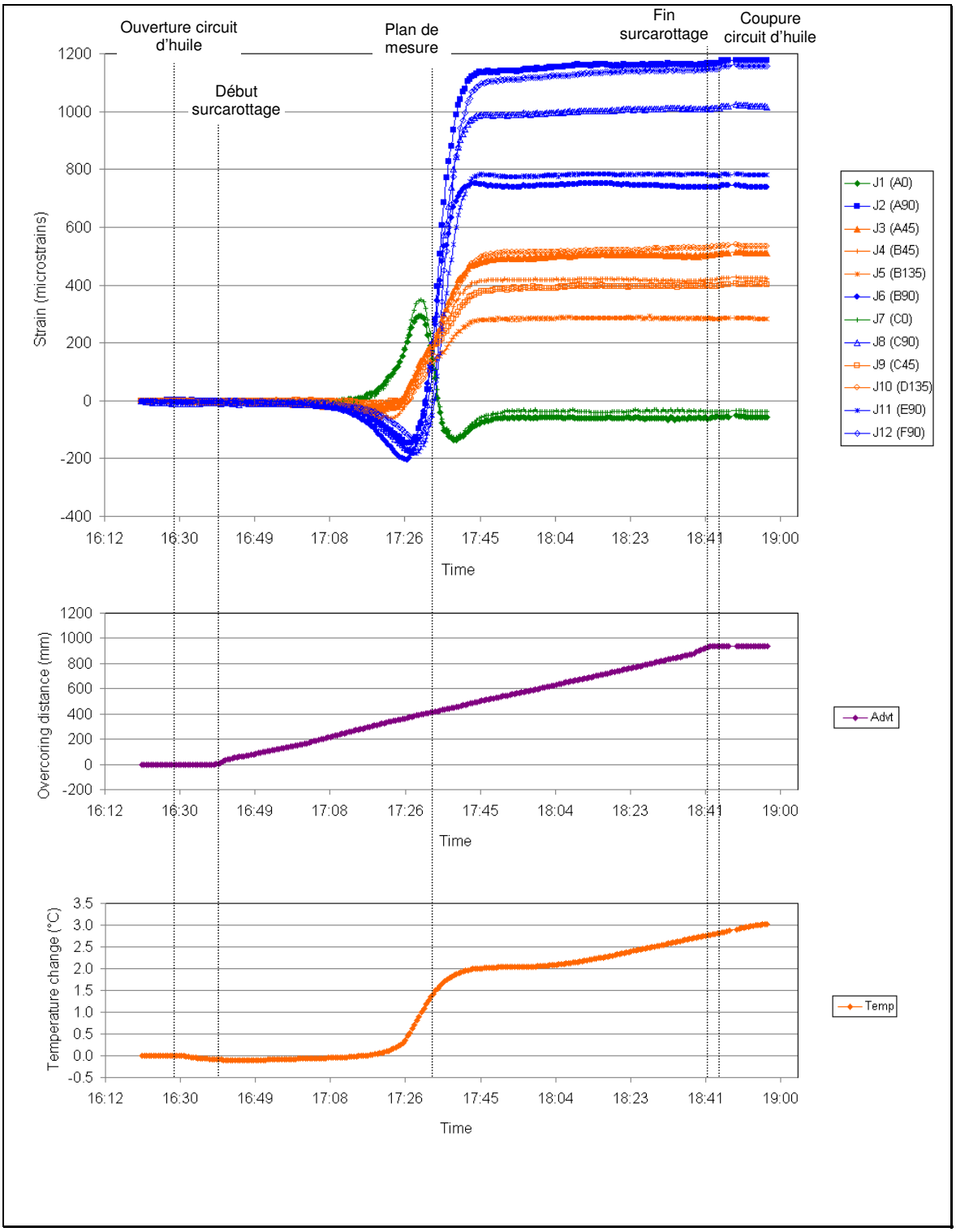
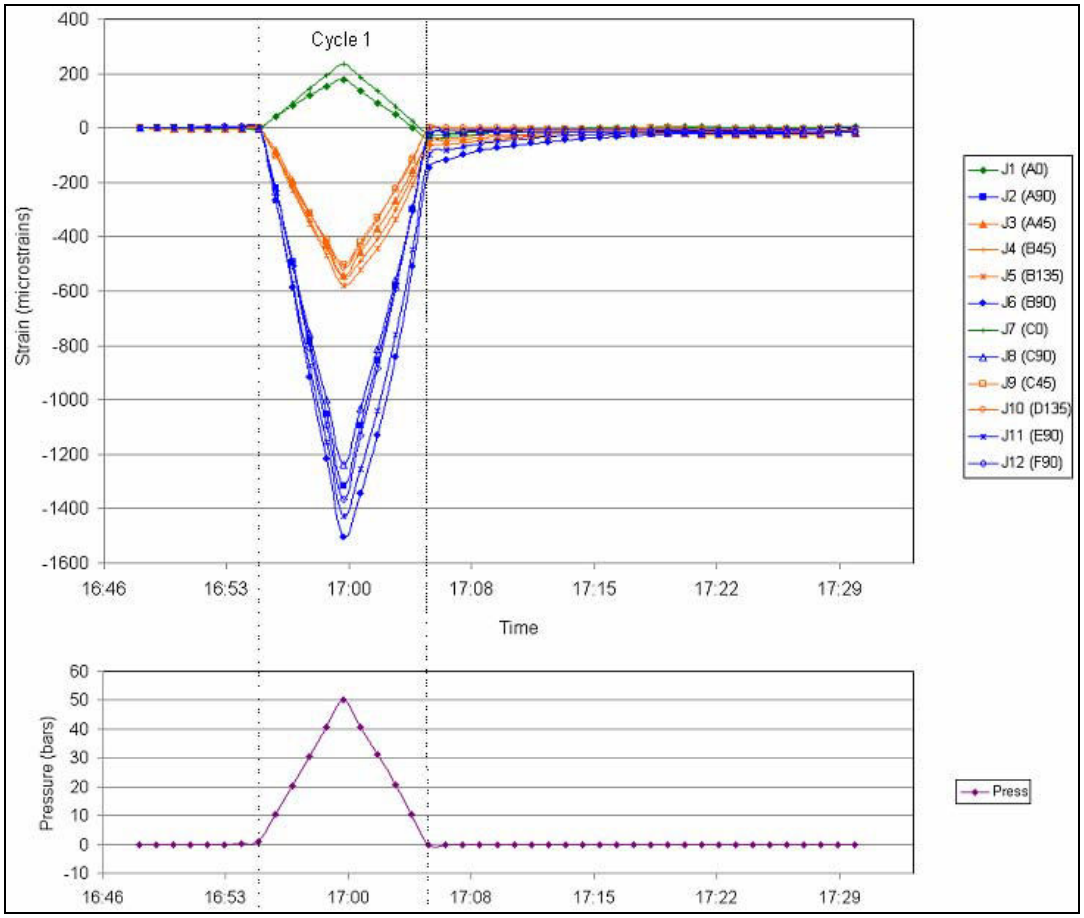


Figure 126 : Essai de surcarottage TC36 – Campagne 2008

XIII. ANNEXE L

ANNEXE L : COURBES D'ESSAIS BIAXIAUX REALISES LORS DE LA CAMPAGNE DE 2008



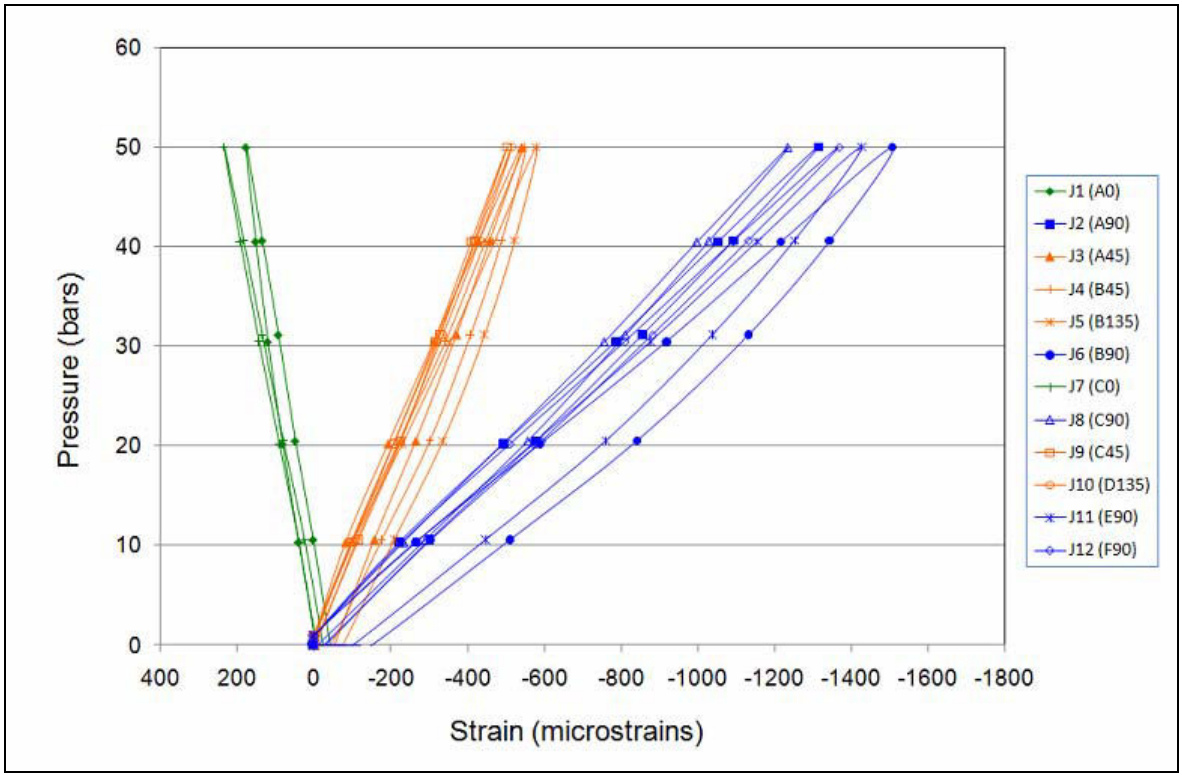
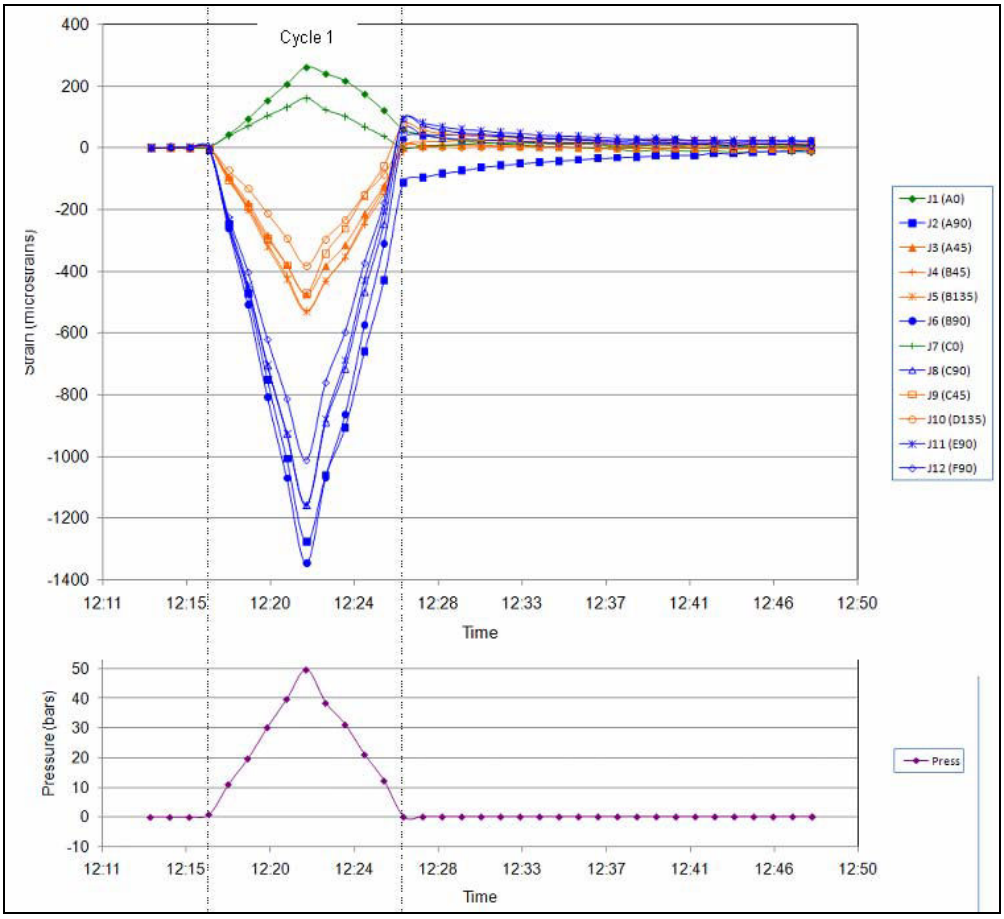


Figure 127 : Essai biaxial TC31 – Campagne 2008



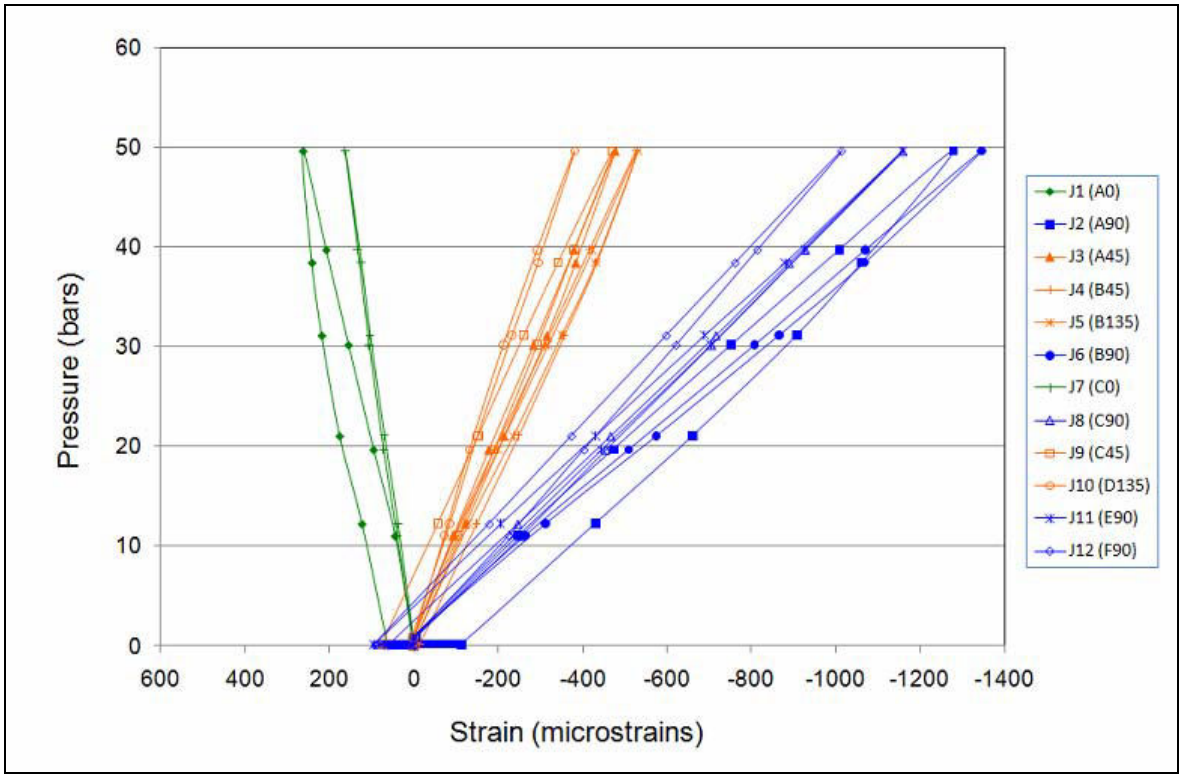


Figure 128 : Essai biaxial TC32 – Campagne 2008

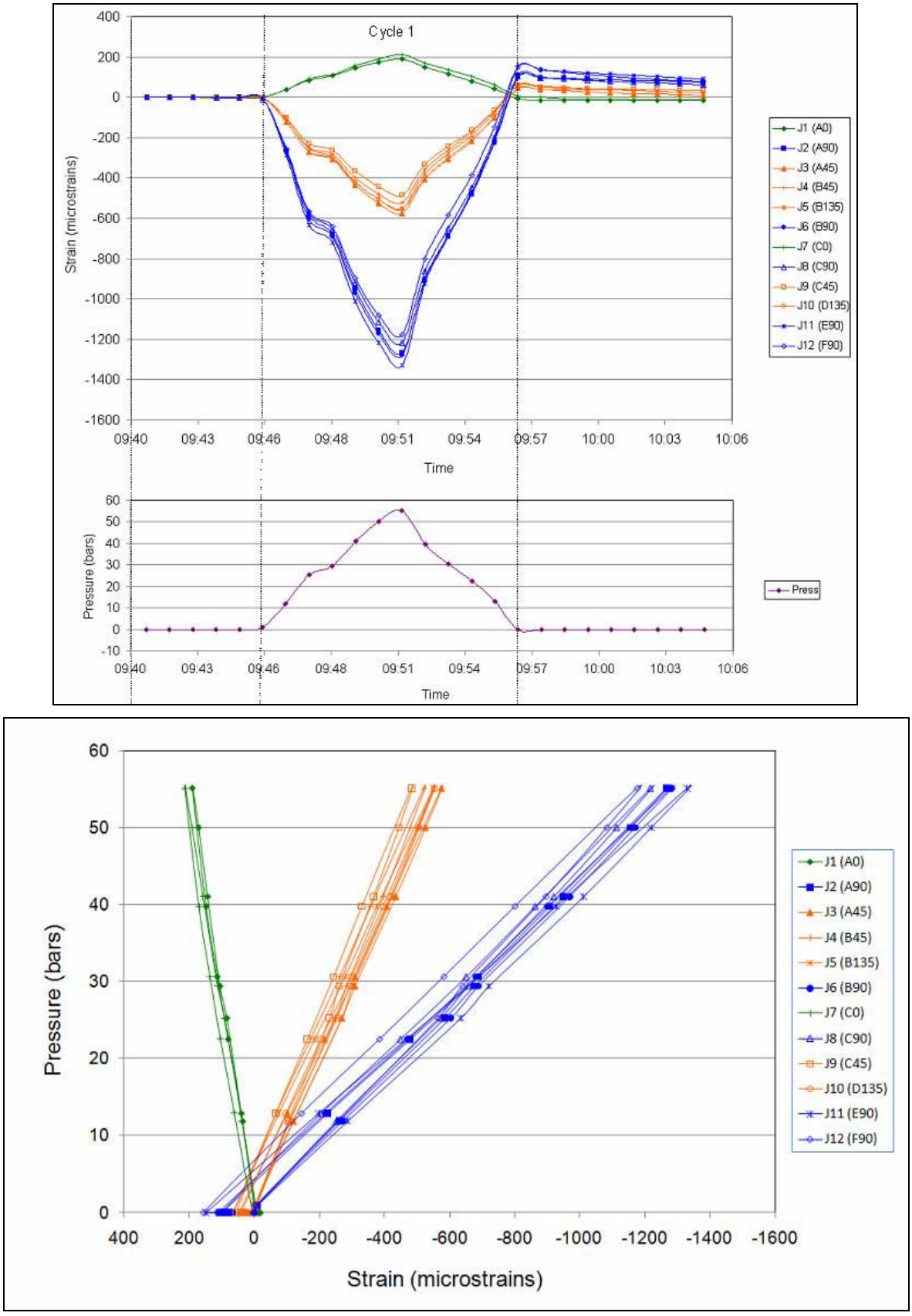
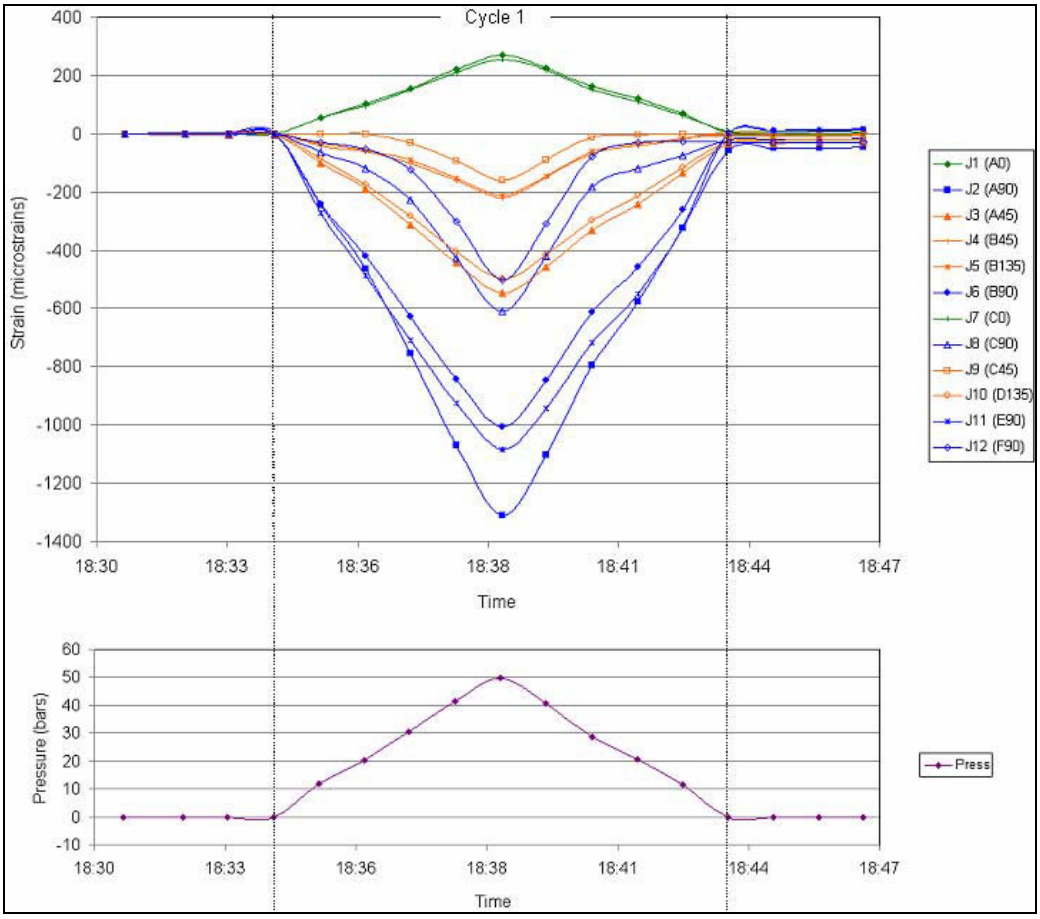


Figure 129 : Essai biaxial TC33 – Campagne 2008



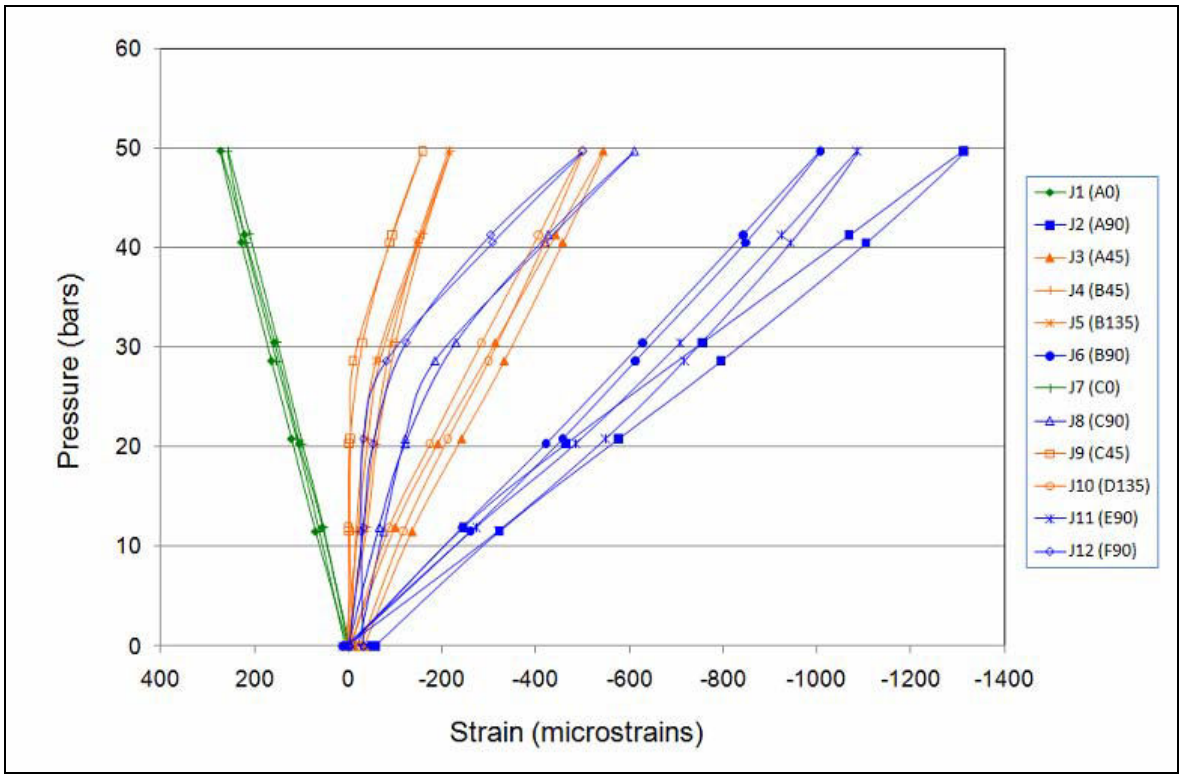


Figure 130 : Essai biaxial TC34 – Campagne 2008

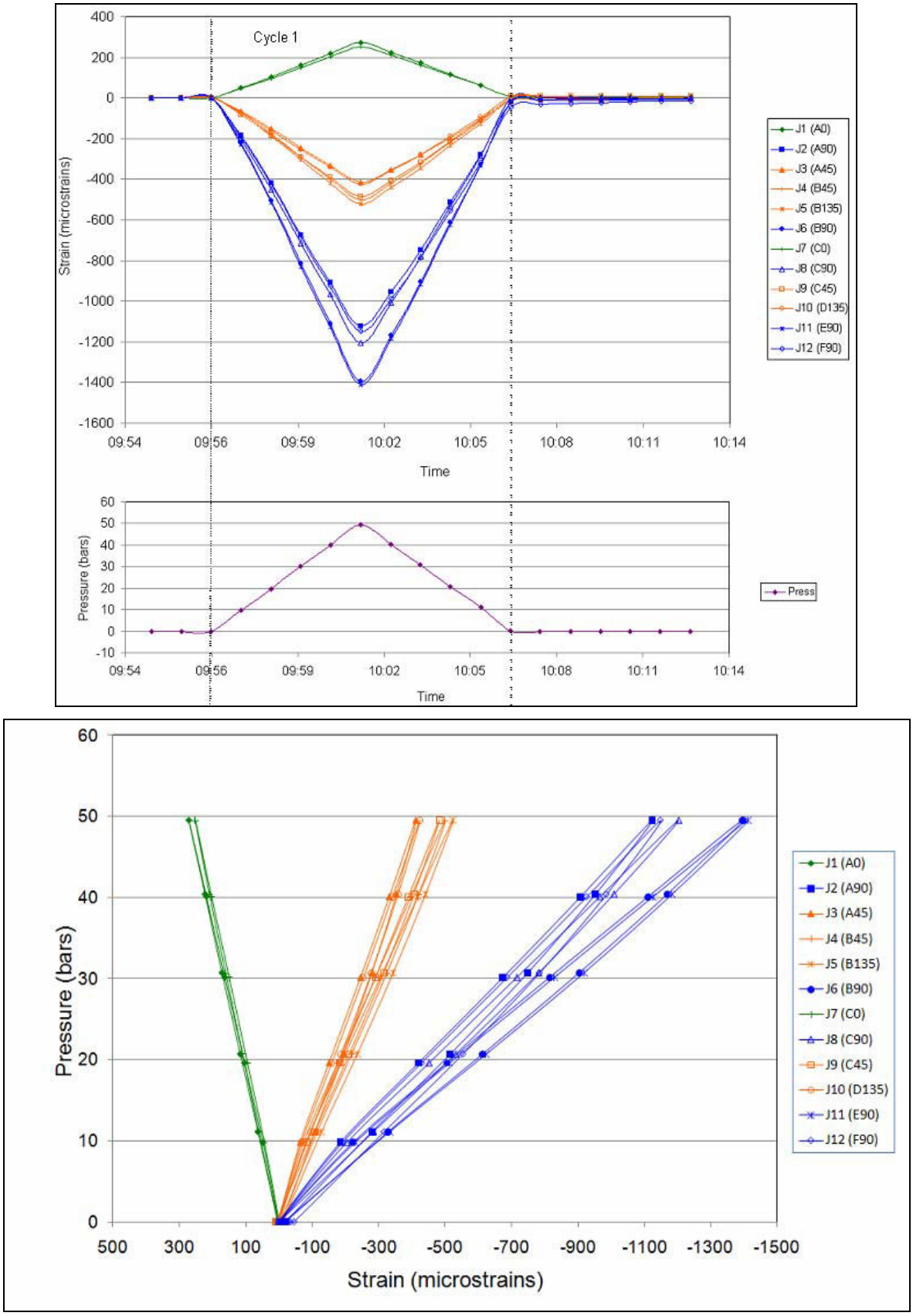
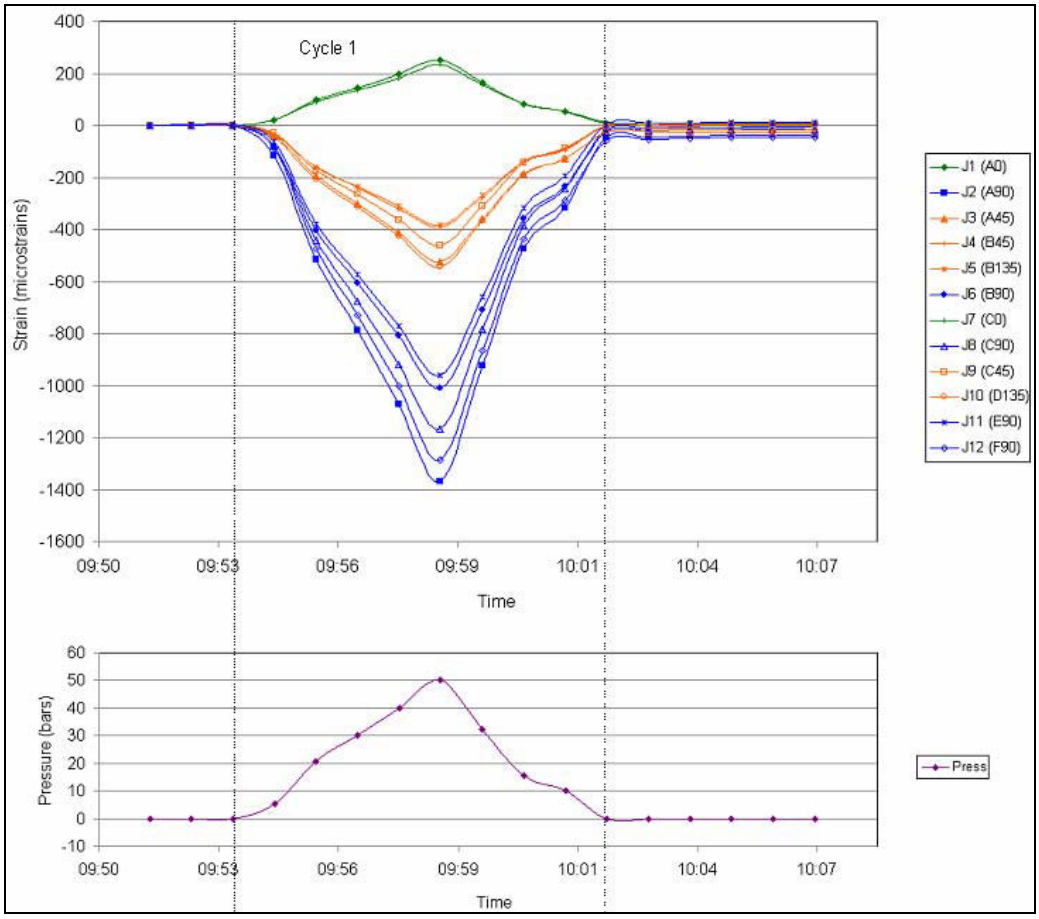


Figure 131 : Essai biaxial TC35 – Campagne 2008



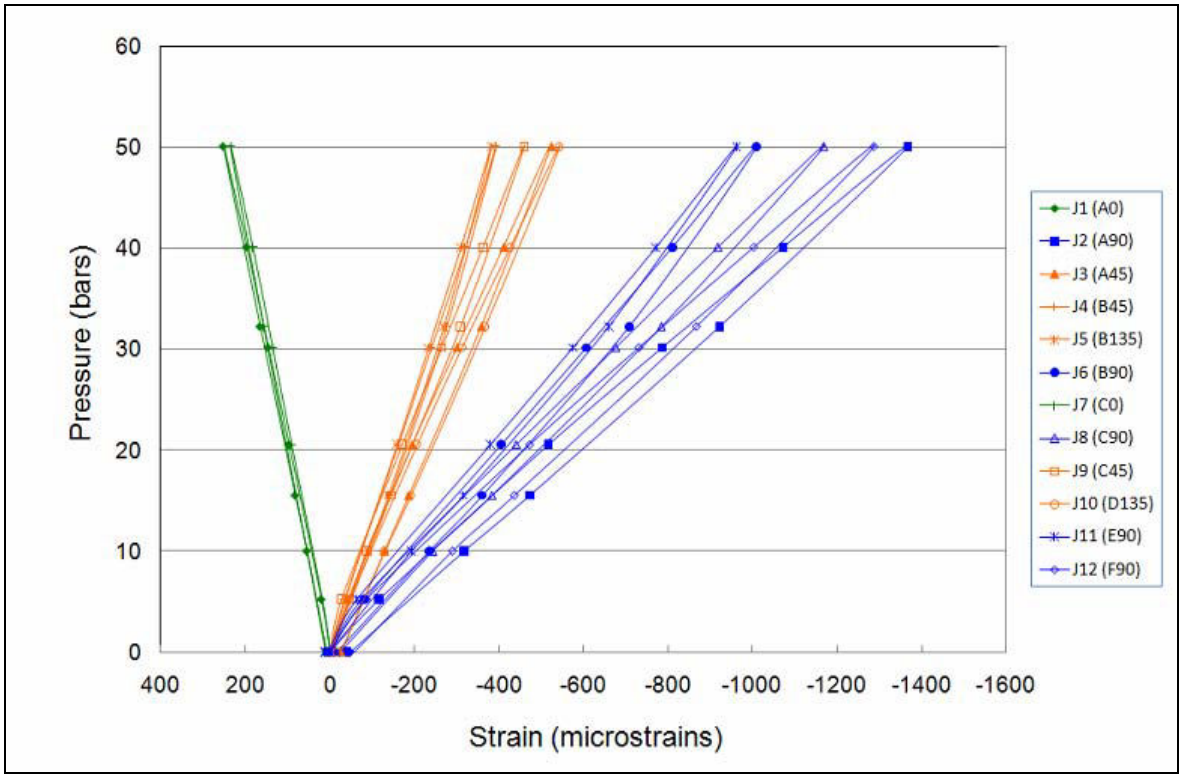


Figure 132 : Essai biaxial TC36 – Campagne 2008

XIV. ANNEXE M

ANNEXE M : COURBE DE SECHAGE OBTENU LORS DE LA CAMPAGNE DE 2008

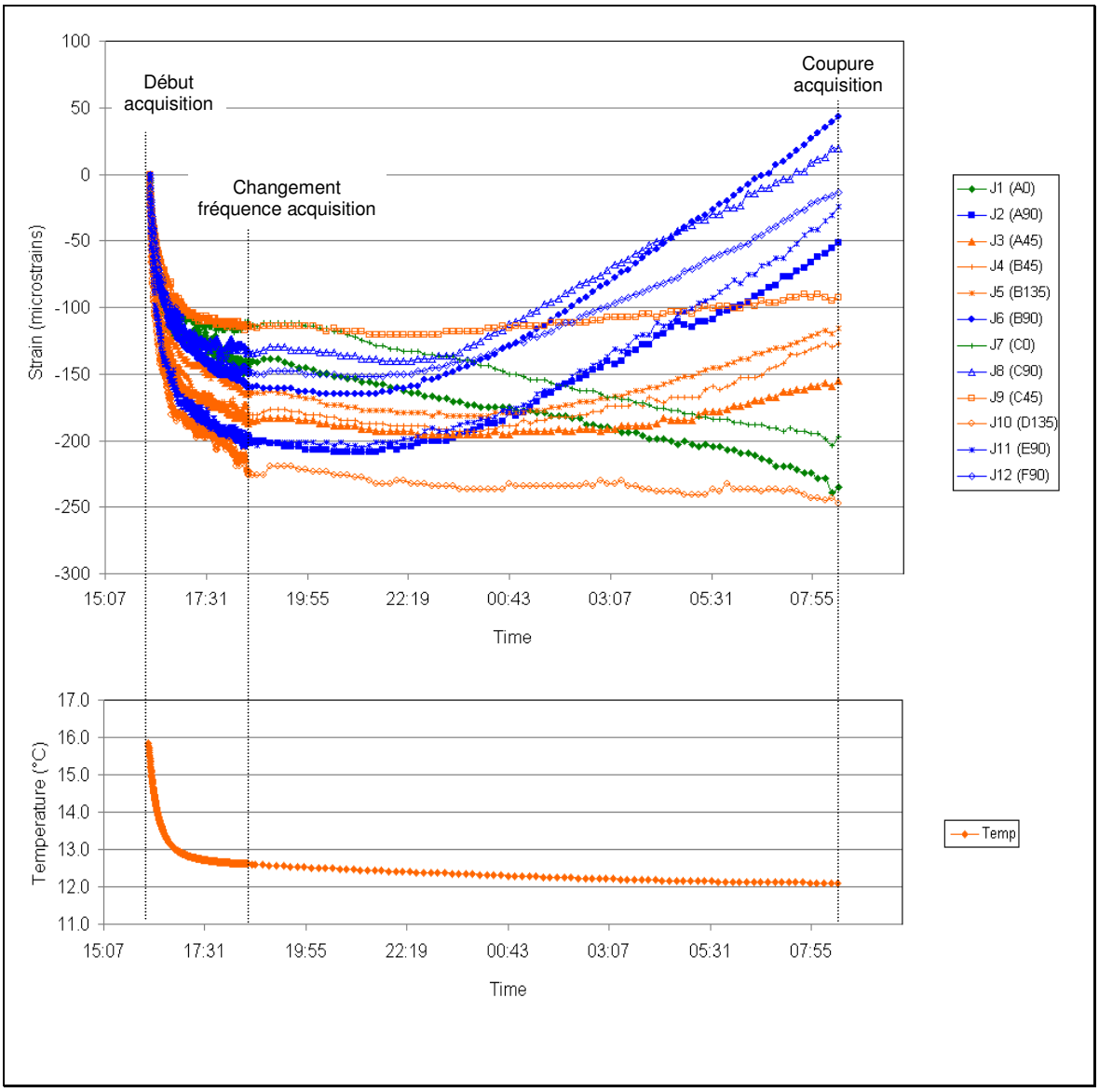


Figure 133 : Courbe de séchage, Essai TC31 – Campagne 2008

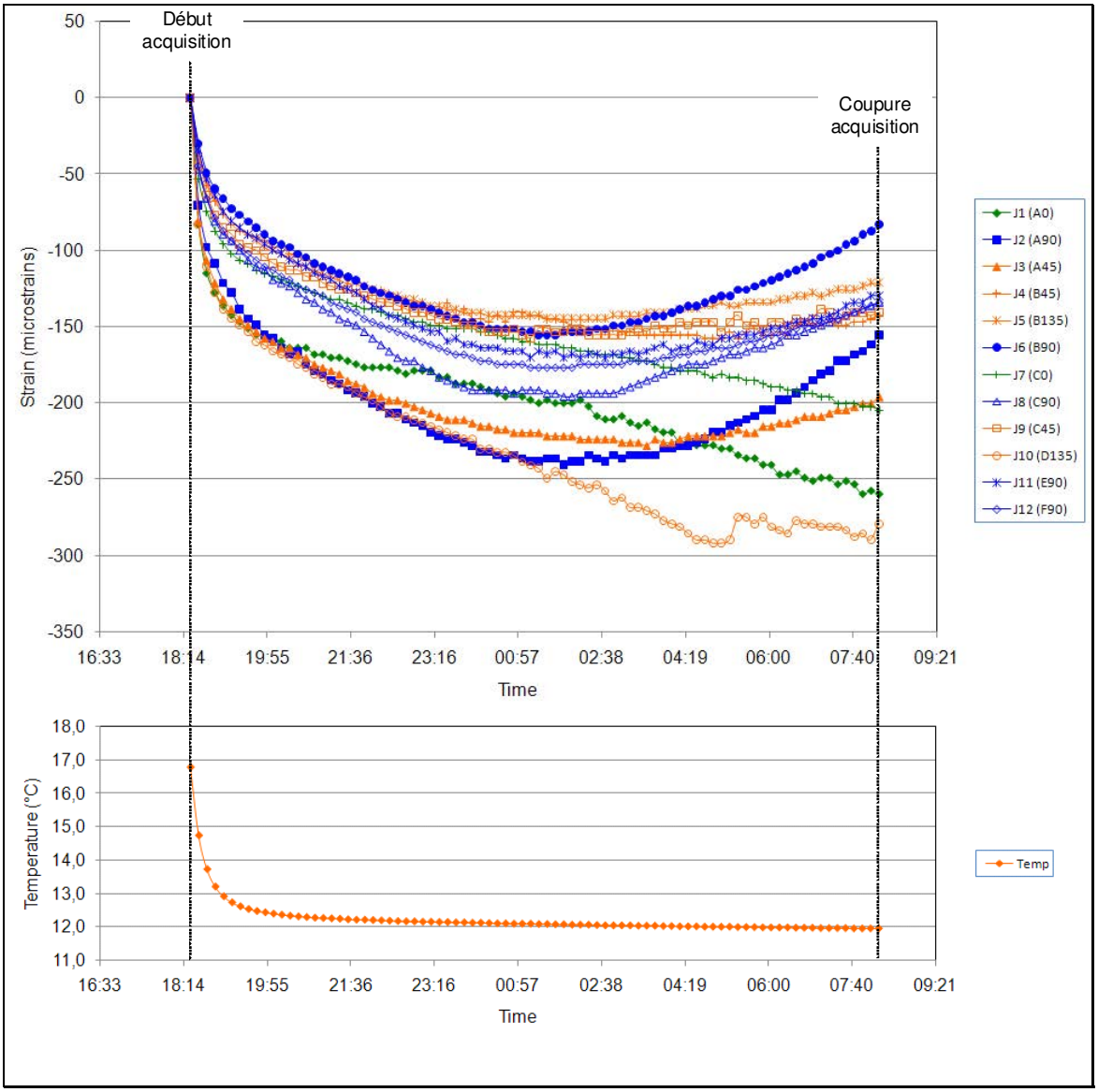


Figure 134 : Courbe de séchage, Essai TC32 – Campagne 2008

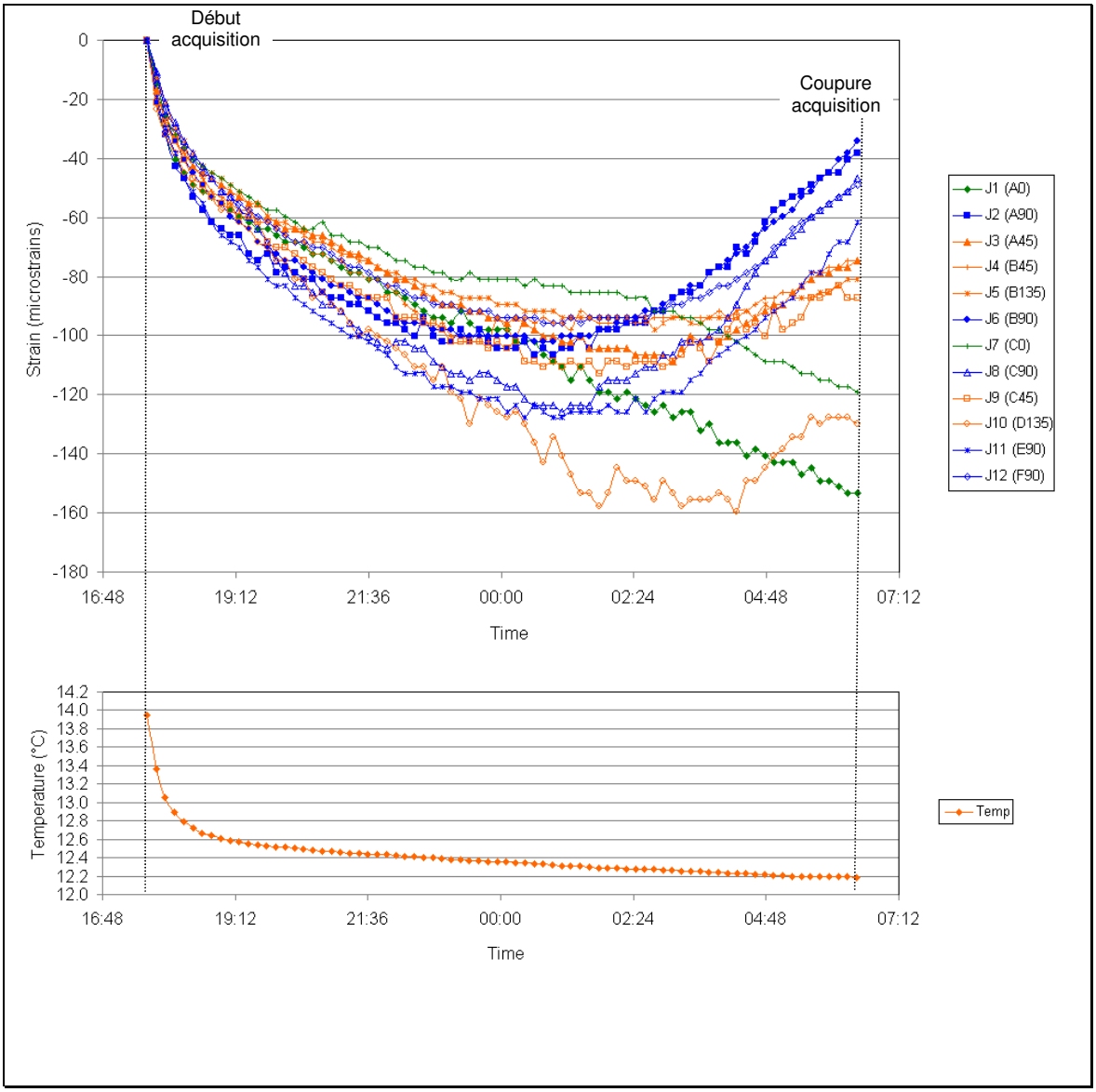


Figure 135 : Courbe de séchage, Essai TC33 – Campagne 2008

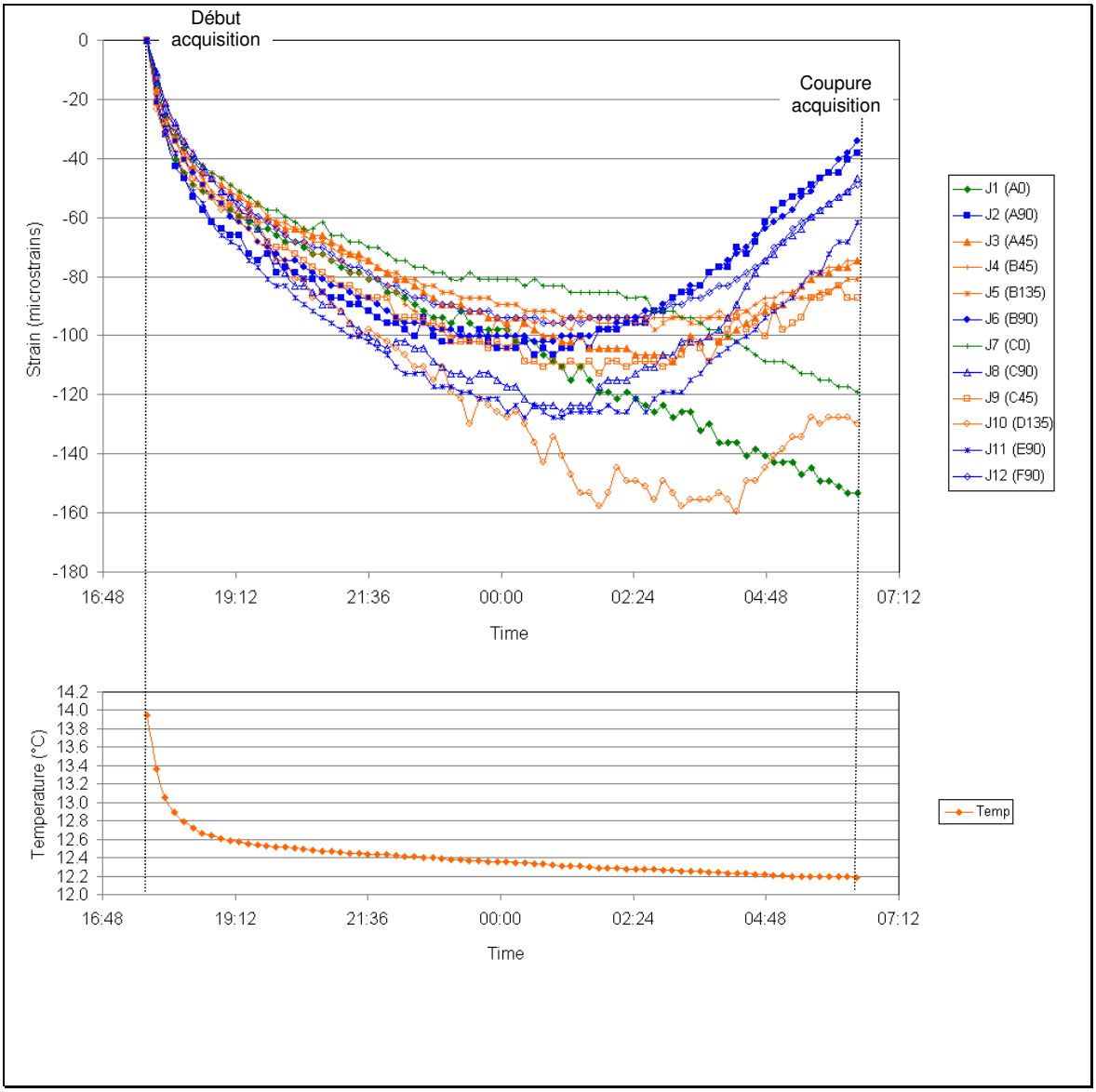


Figure 136 : Courbe de séchage, Essai TC34 – Campagne 2008

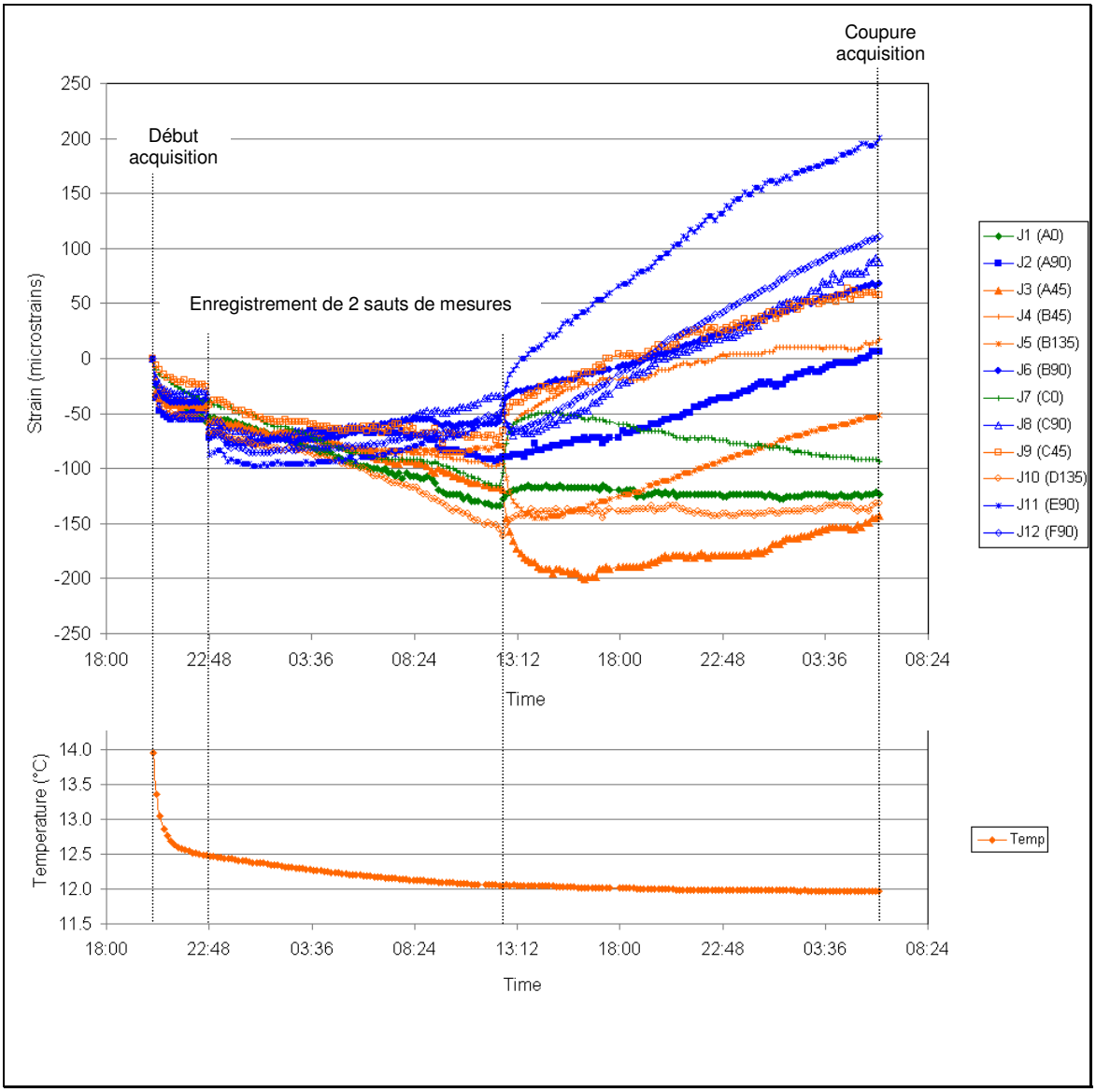


Figure 137 : Courbe de séchage, Essai TC35 – Campagne 2008

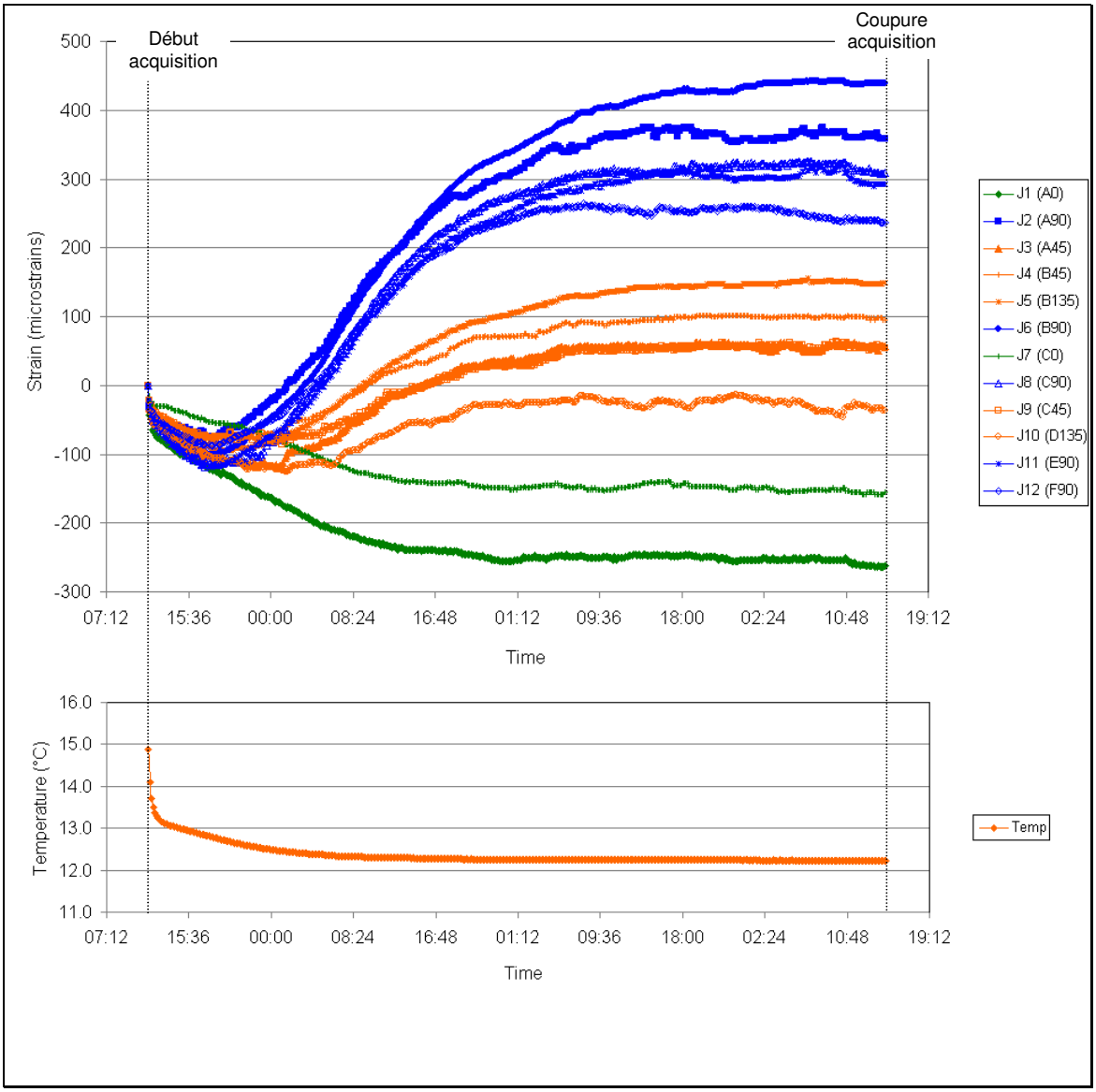


Figure 138 : Courbe de séchage, Essai TC36 – Campagne 2008

XV. ANNEXE N

ANNEXE N : ESSAIS DE CALORIMETRIE DIFFERENTIELLE « DSC » REALISES SUR LA COLLE 10-8° – ESSAIS DE REFERENCE « SCAN », CAMPAGNES DE 2010

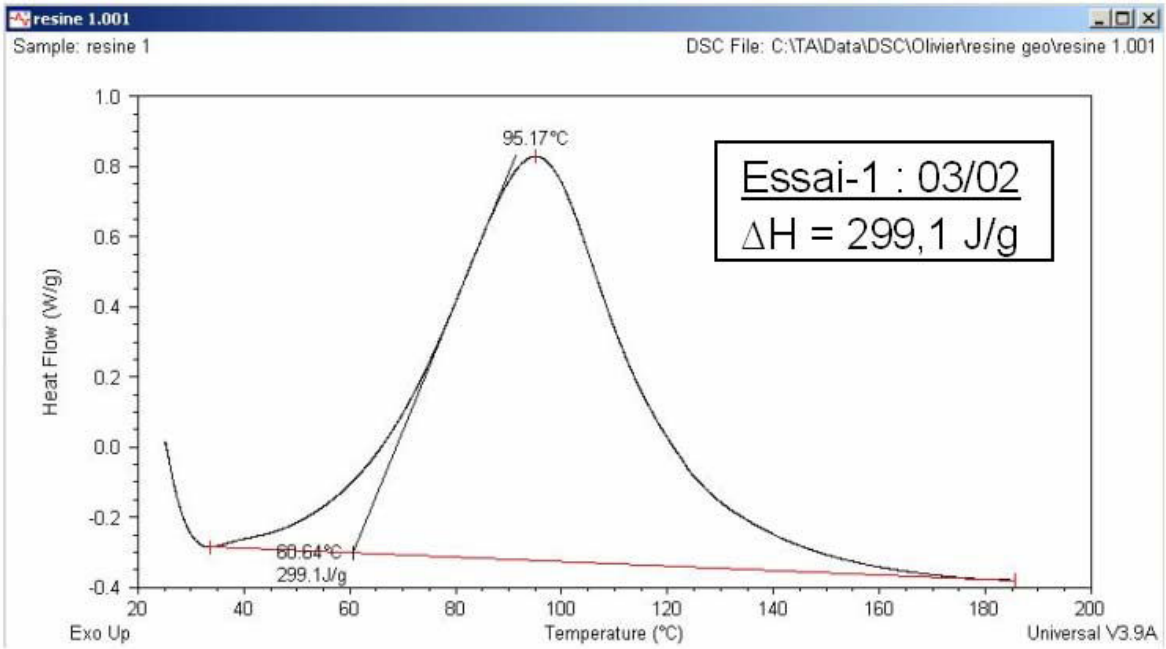


Figure 139 : Essai « DSC », Scan-1, Campagne 1

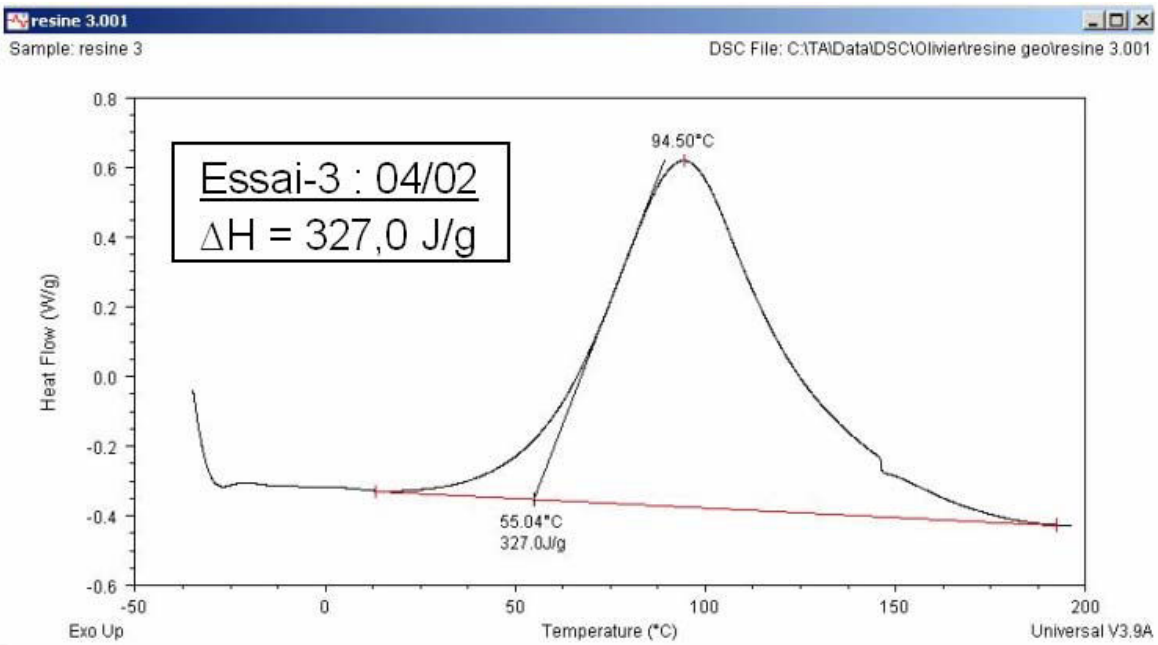


Figure 140 : Essai « DSC », Scan-3, Campagne 1

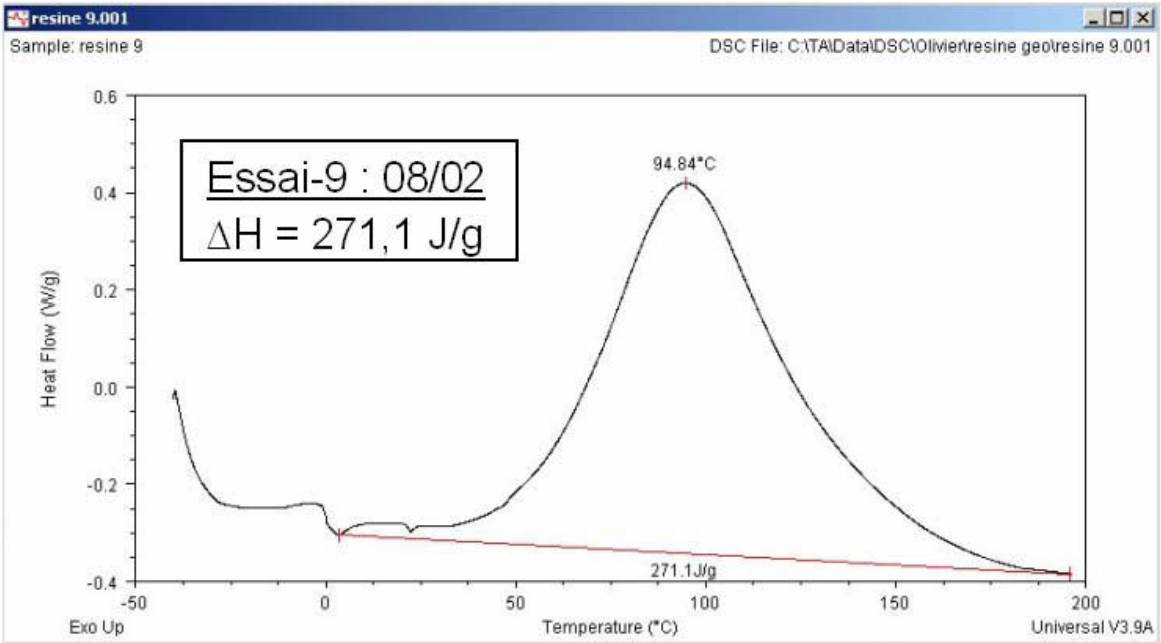


Figure 141 : Essai « DSC », Scan-9, Campagne 1

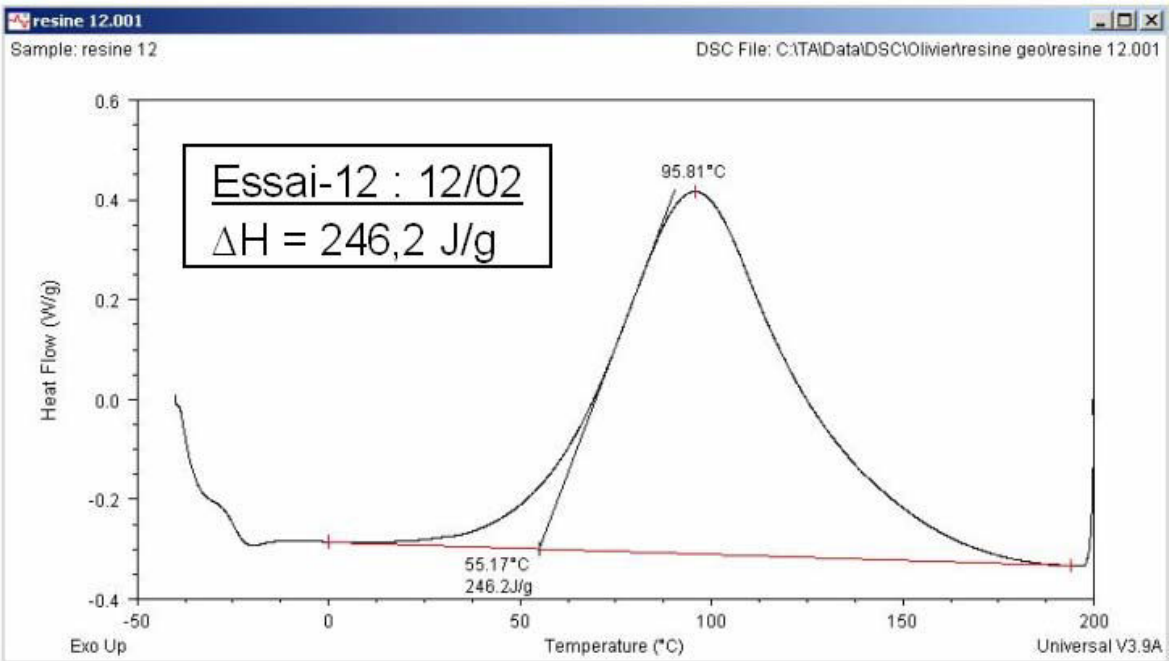


Figure 142 : Essai « DSC », Scan-12, Campagne 1

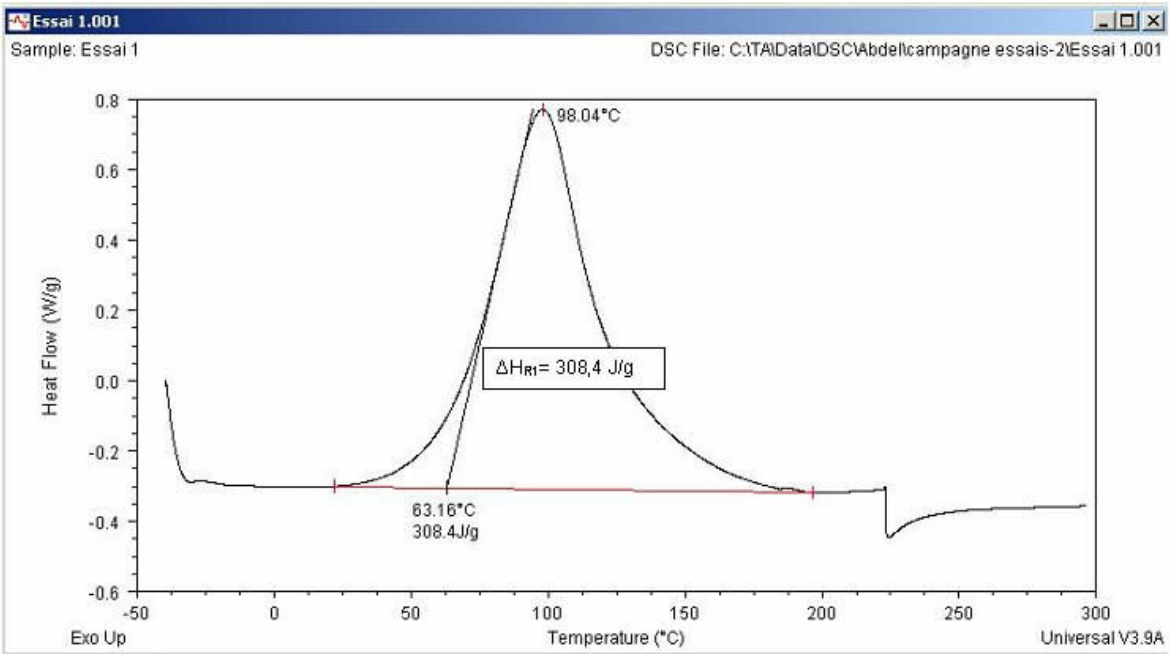


Figure 143 : Essai « DSC », Scan-1, Campagne 2

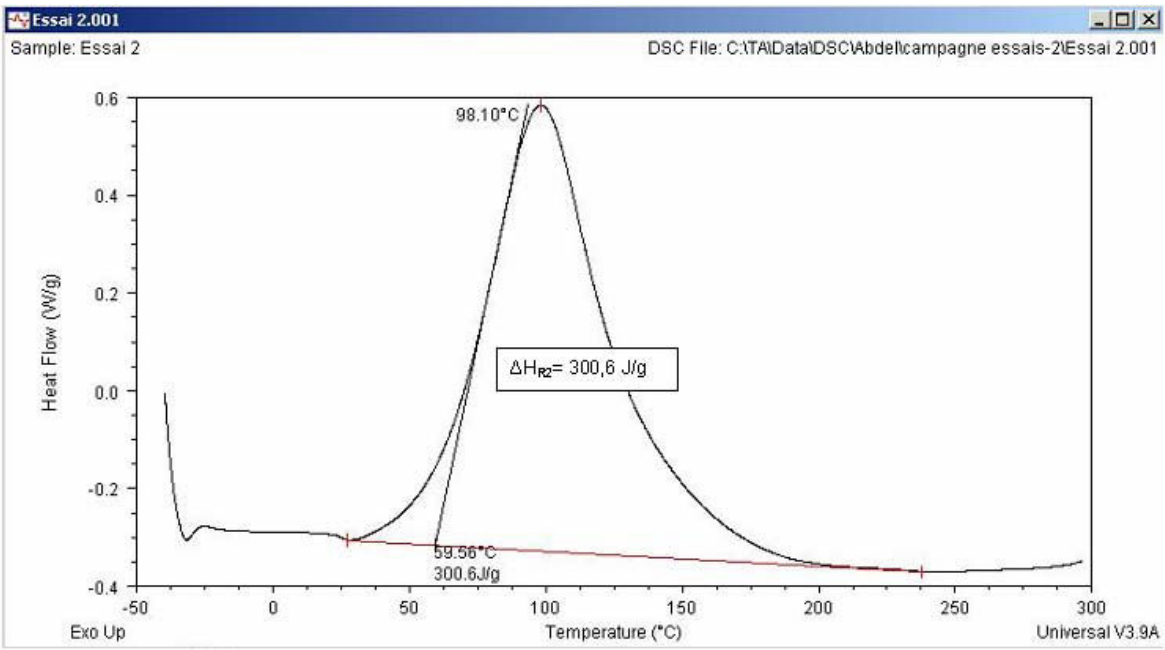


Figure 144 : Essai « DSC », Scan-2, Campagne 2

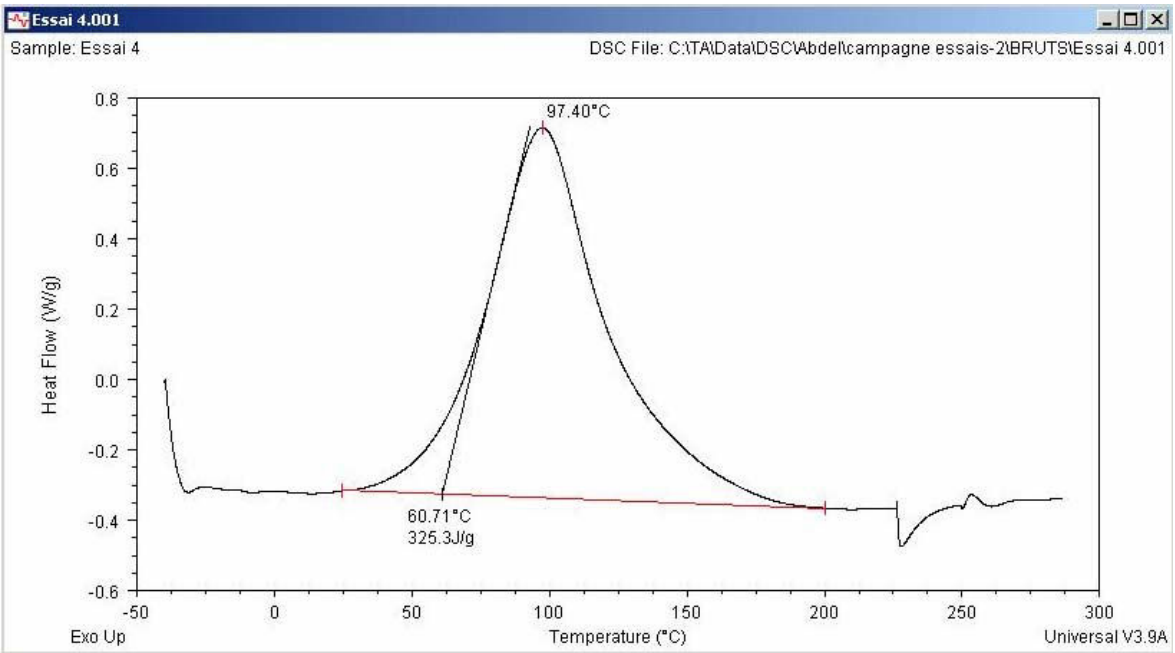


Figure 145 : Essai « DSC », Scan-4, Campagne 2

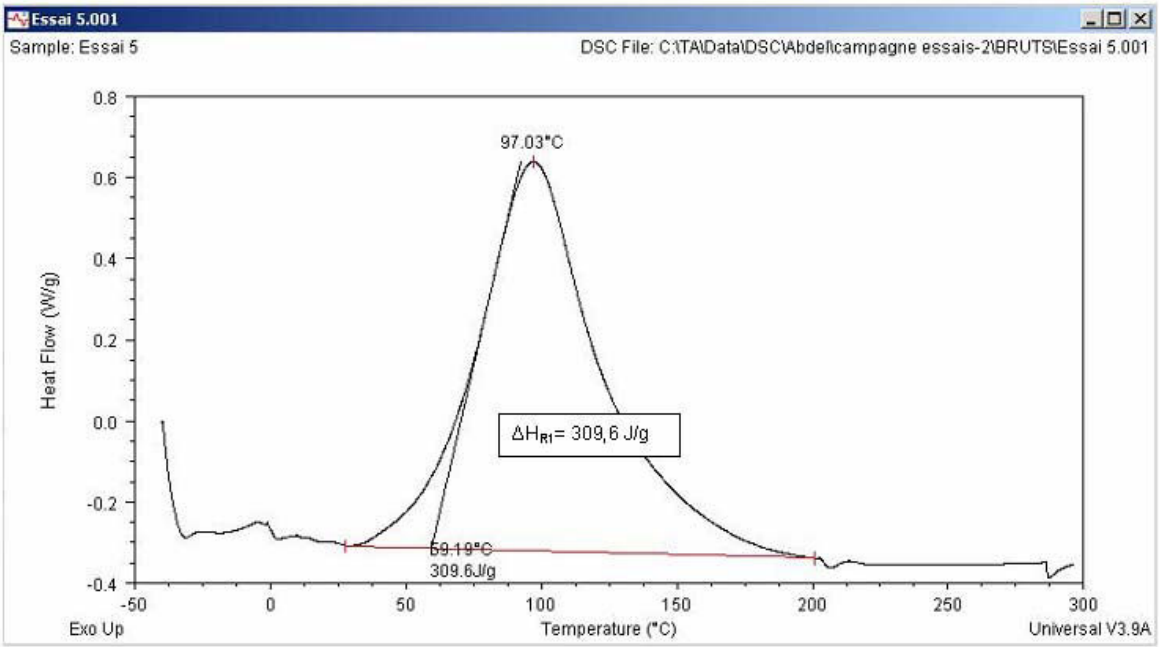


Figure 146 : Essai « DSC », Scan-5, Campagne 2

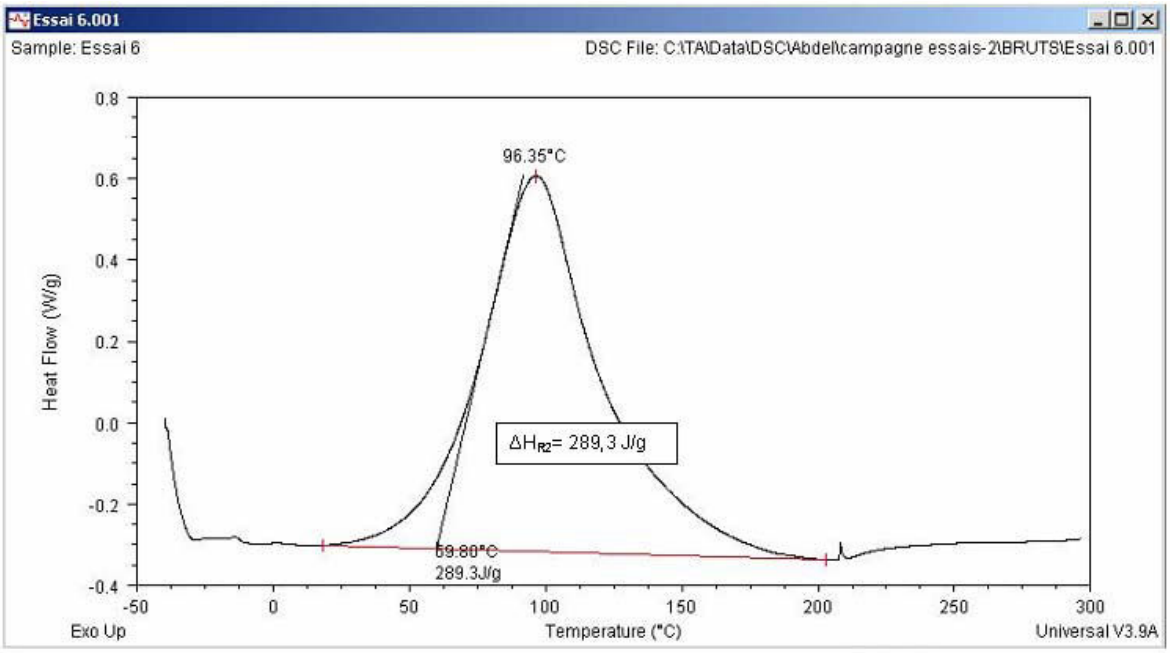


Figure 147 : Essai « DSC », Scan-6, Campagne 2

XVI. ANNEXE O

ANNEXE O : ESSAIS DE CALORIMETRIE DIFFERENTIELLE « DSC » REALISES SUR LA COLLE 10-8° – ESSAIS ISOTHERMES « ISO », CAMPAGNES DE 2010

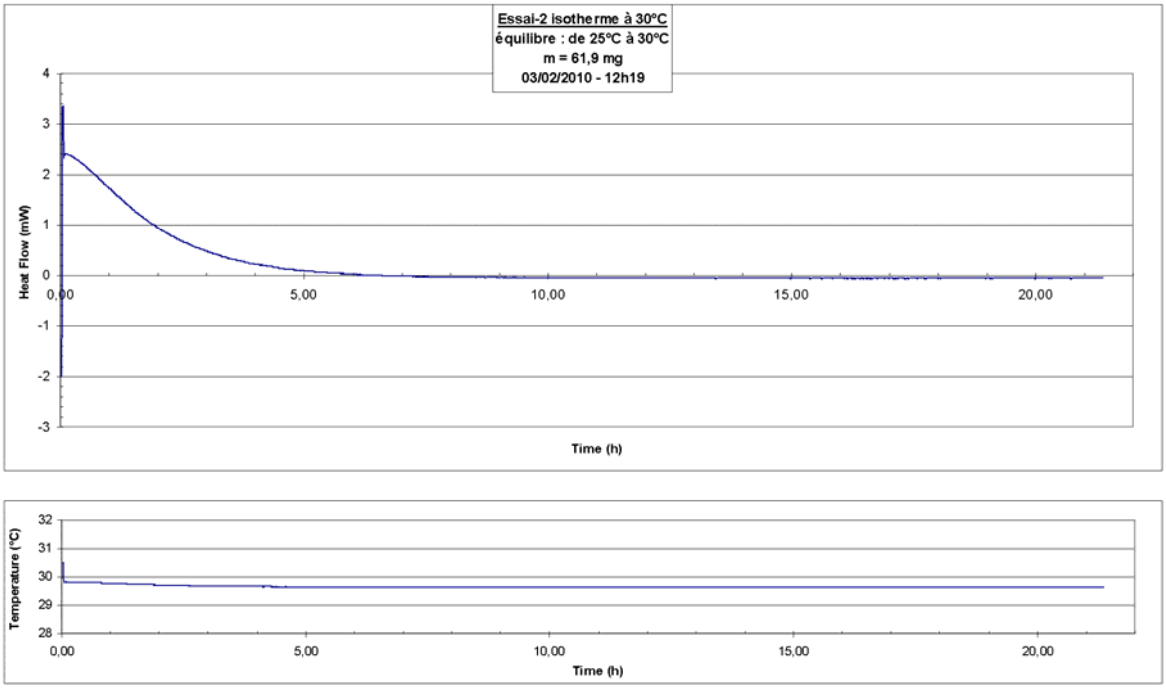


Figure 148 : Essai « DSC » 2, Iso-30°C, Campagne 1

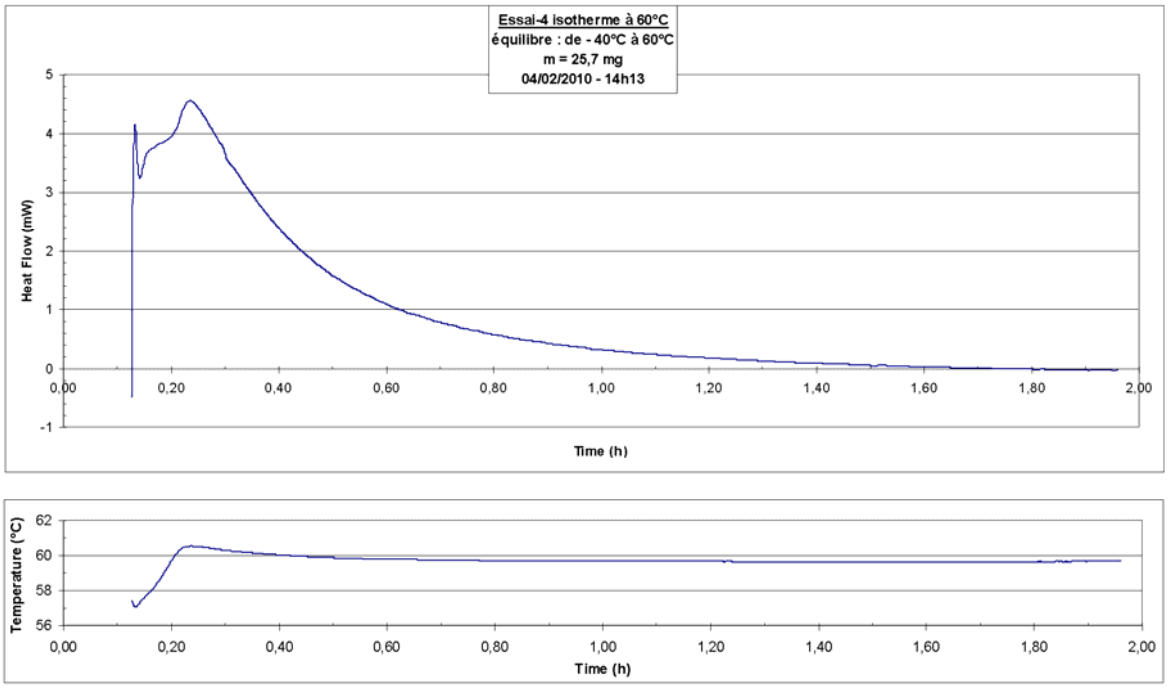


Figure 149 : Essai « DSC » 4, Iso-60°C, Campagne 1

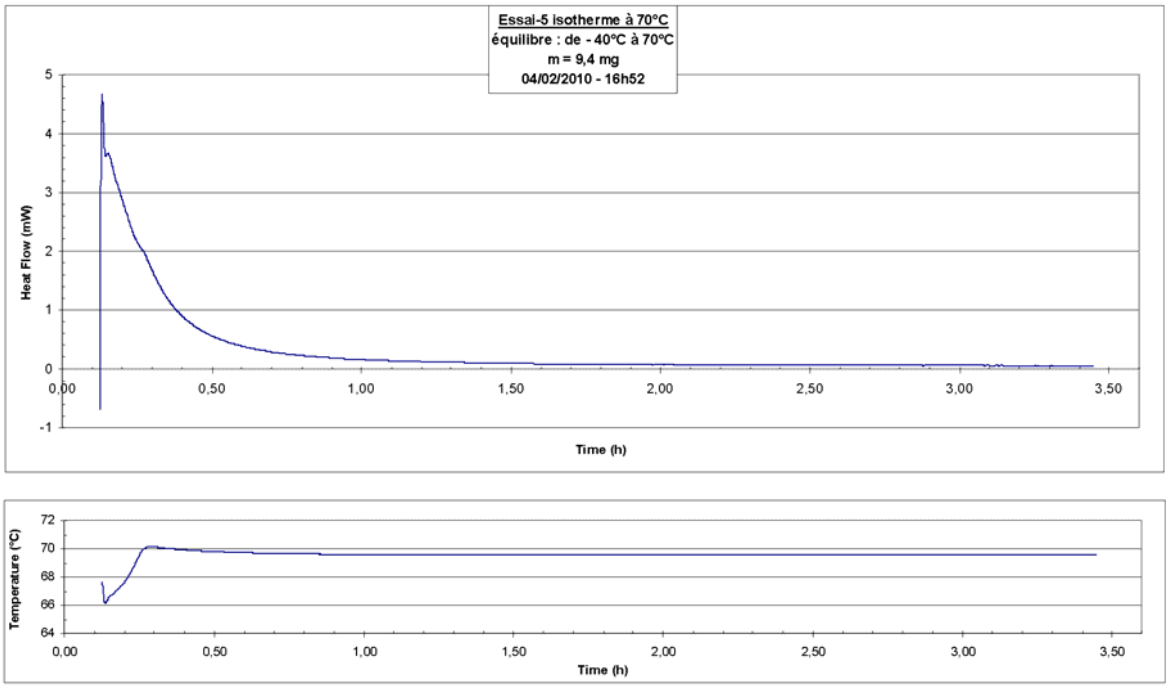


Figure 150 : Essai « DSC » 5, Iso-70°C, Campagne 1

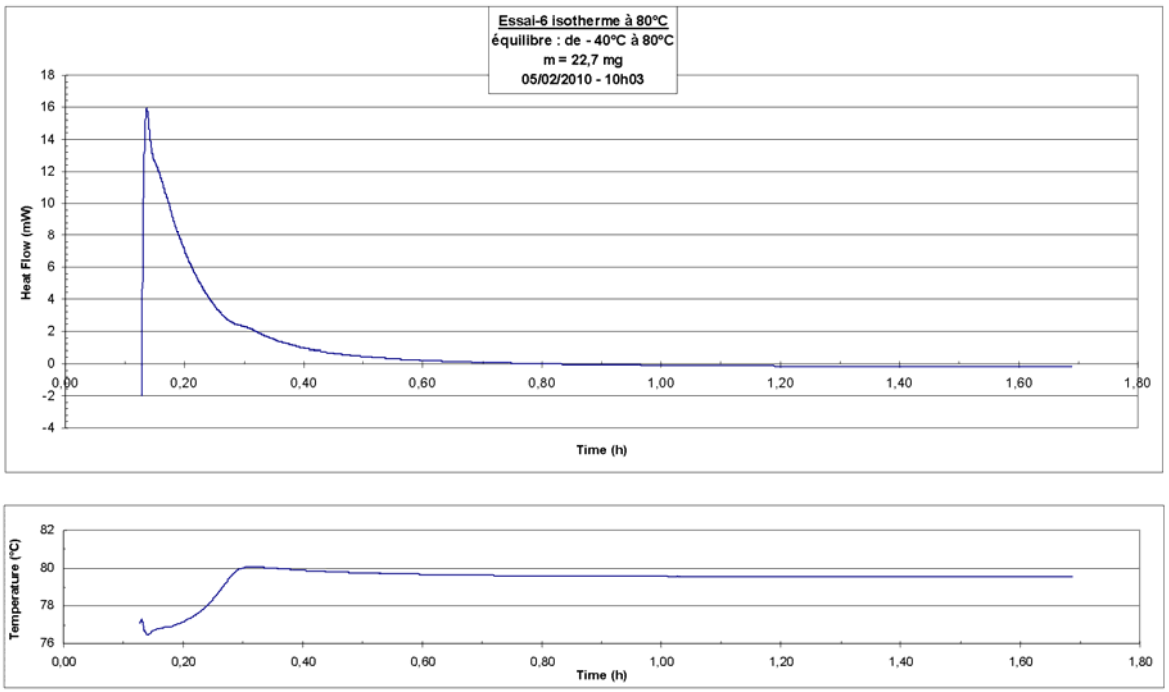


Figure 151 : Essai « DSC » 6, Iso-80°C, Campagne 1

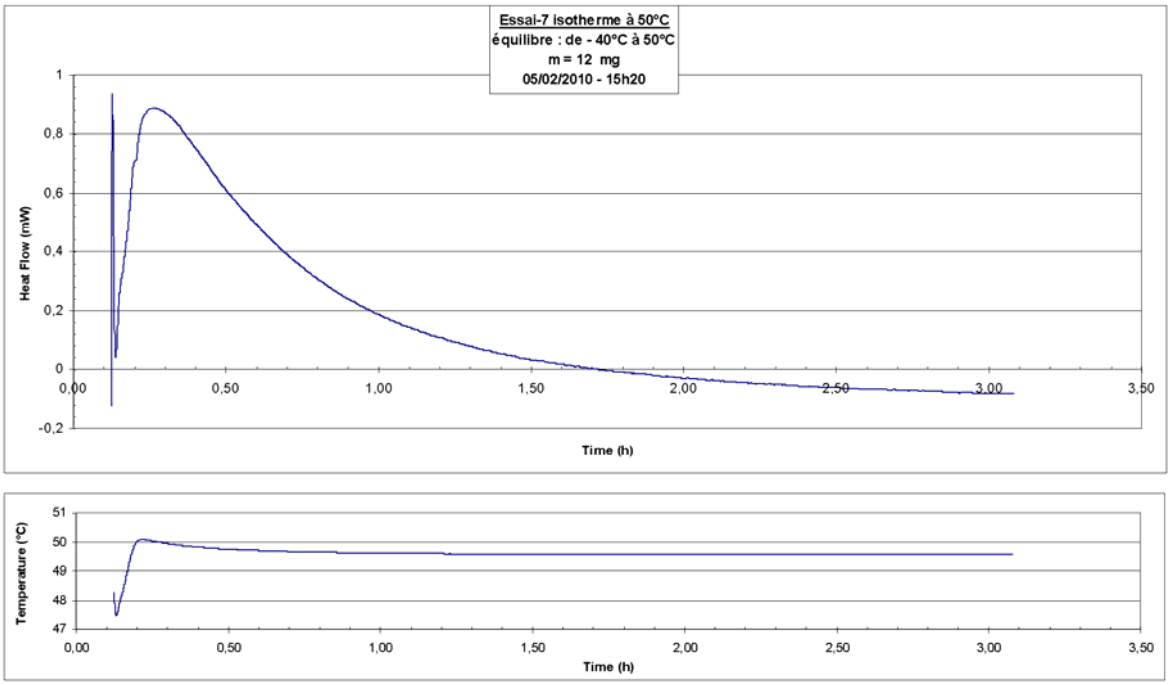


Figure 152 : Essai « DSC » 7, Iso-50°C, Campagne 1

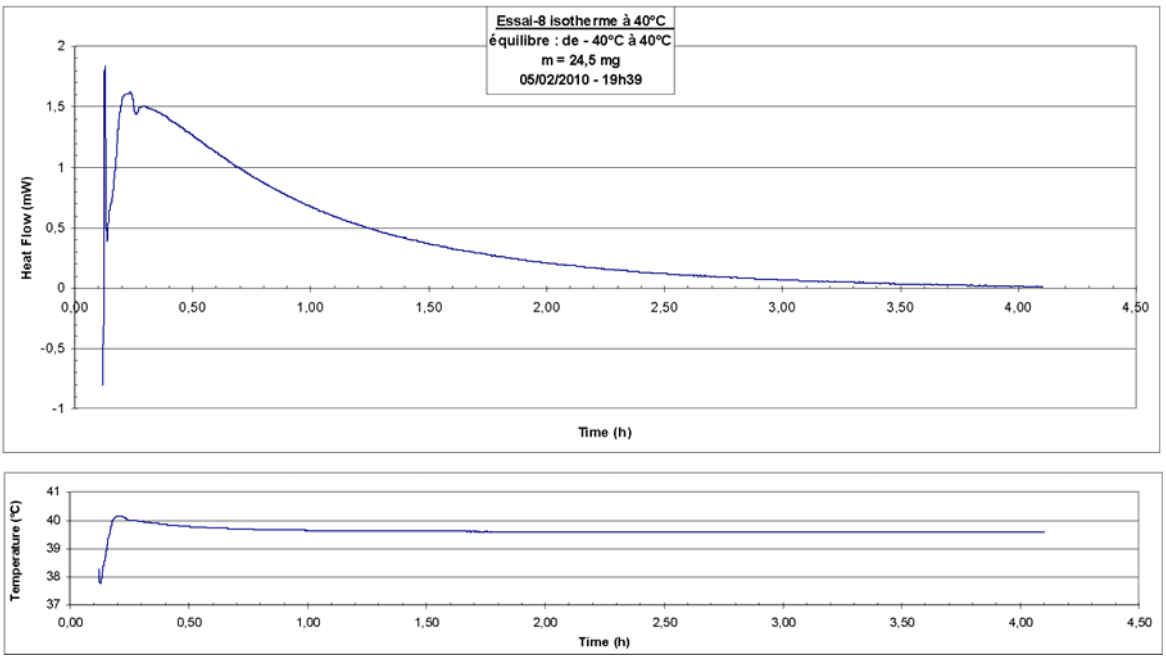


Figure 153 : Essai « DSC » 8, Iso-40°C, Campagne 1

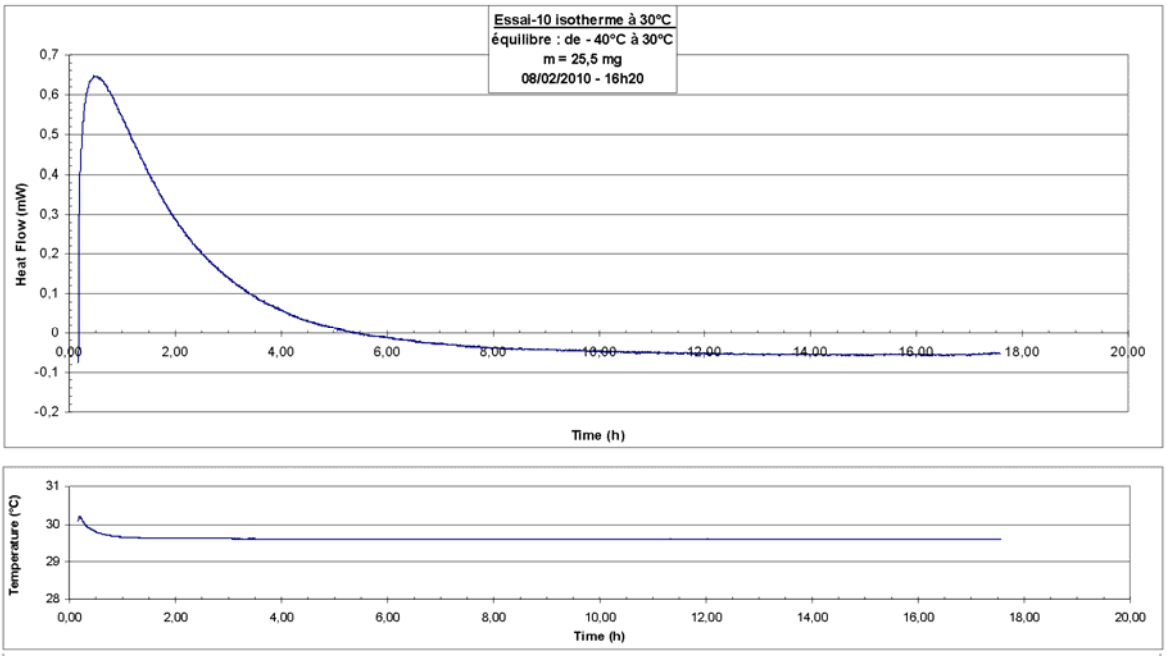


Figure 154 : Essai « DSC » 10, Iso-30°C, Campagne 1

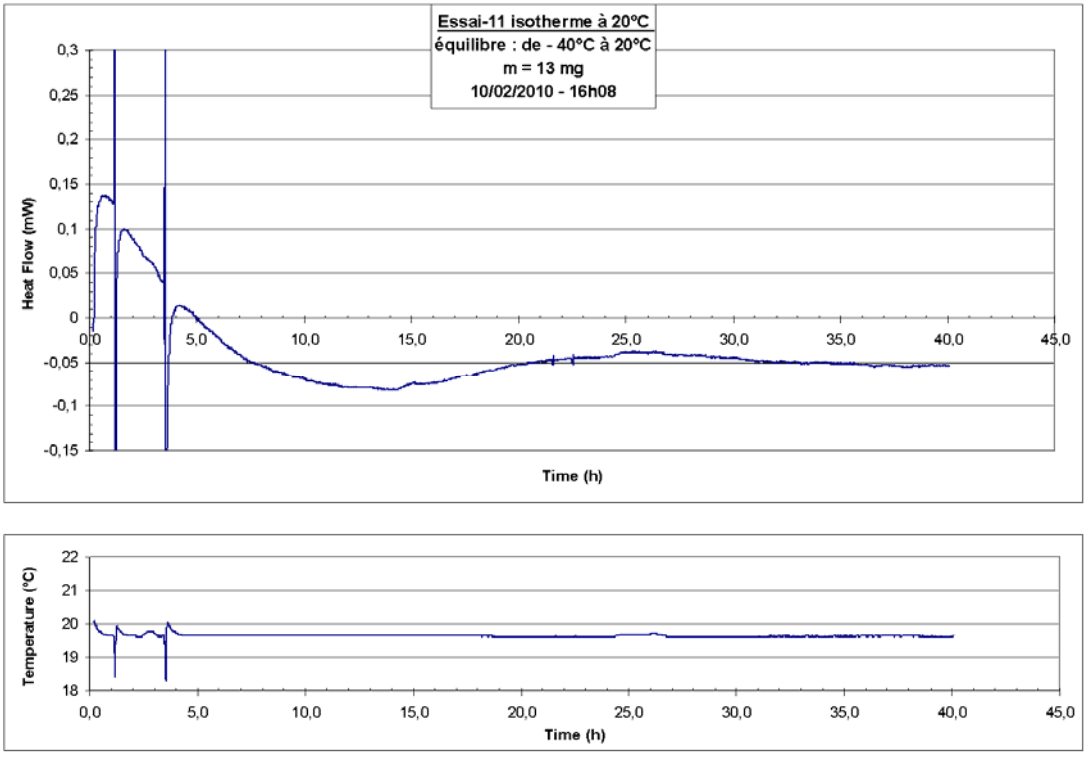


Figure 155 : Essai « DSC » 11, Iso-20°C, Campagne 1

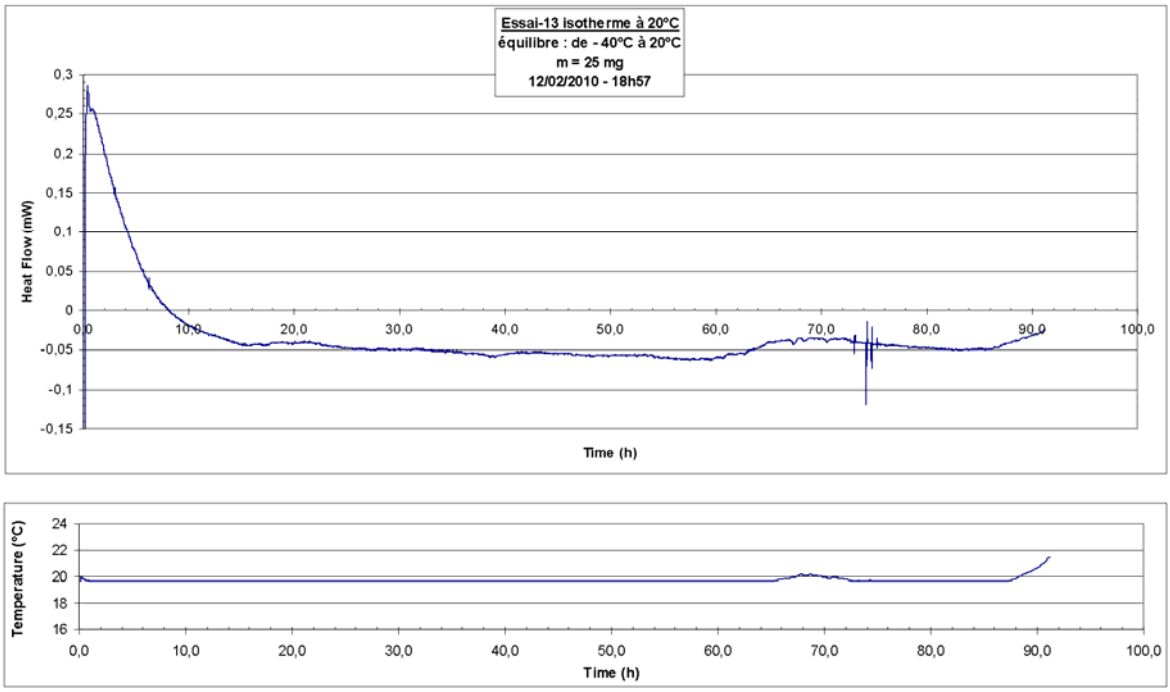


Figure 156 : Essai « DSC » 13, Iso-20°C, Campagne 1

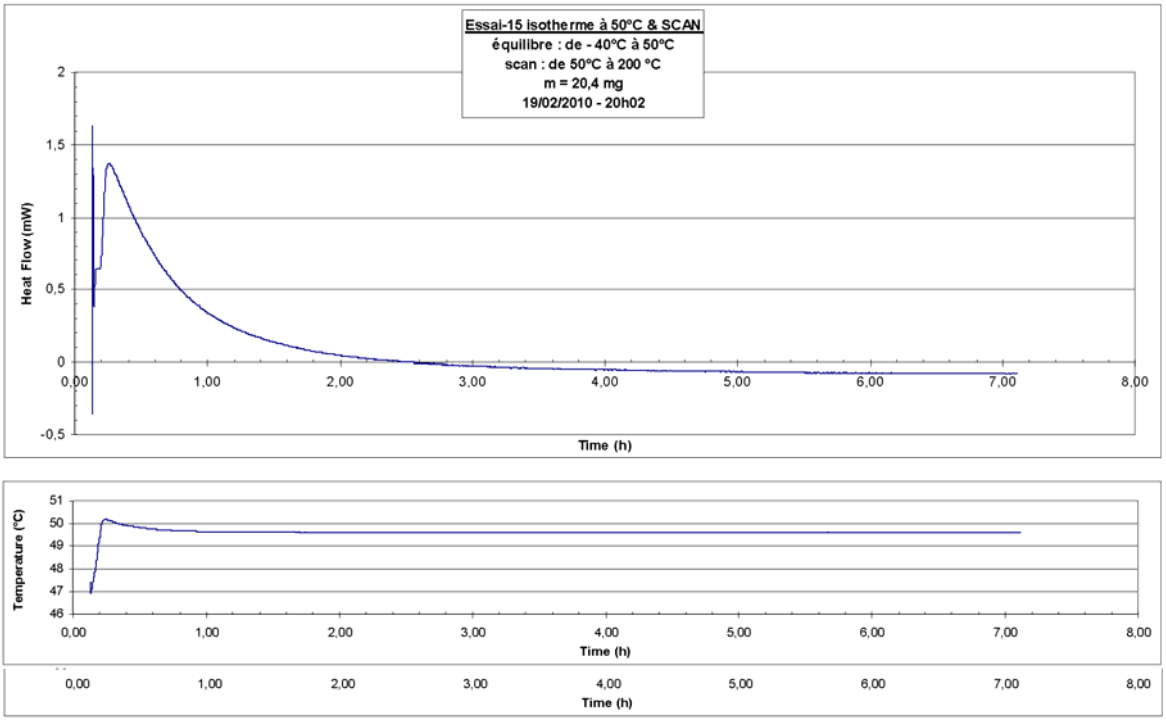


Figure 157 : Essai « DSC » 15, Iso-50°C, Campagne 1

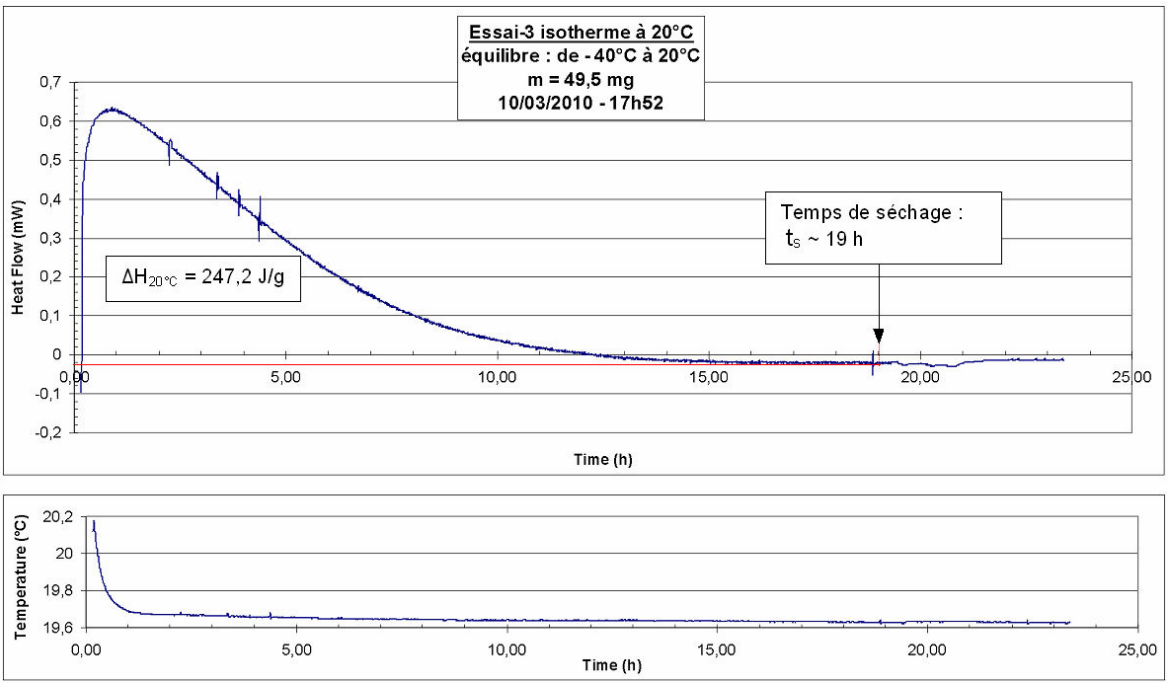


Figure 158 : Essai « DSC » 13, Iso-20°C, Campagne 2

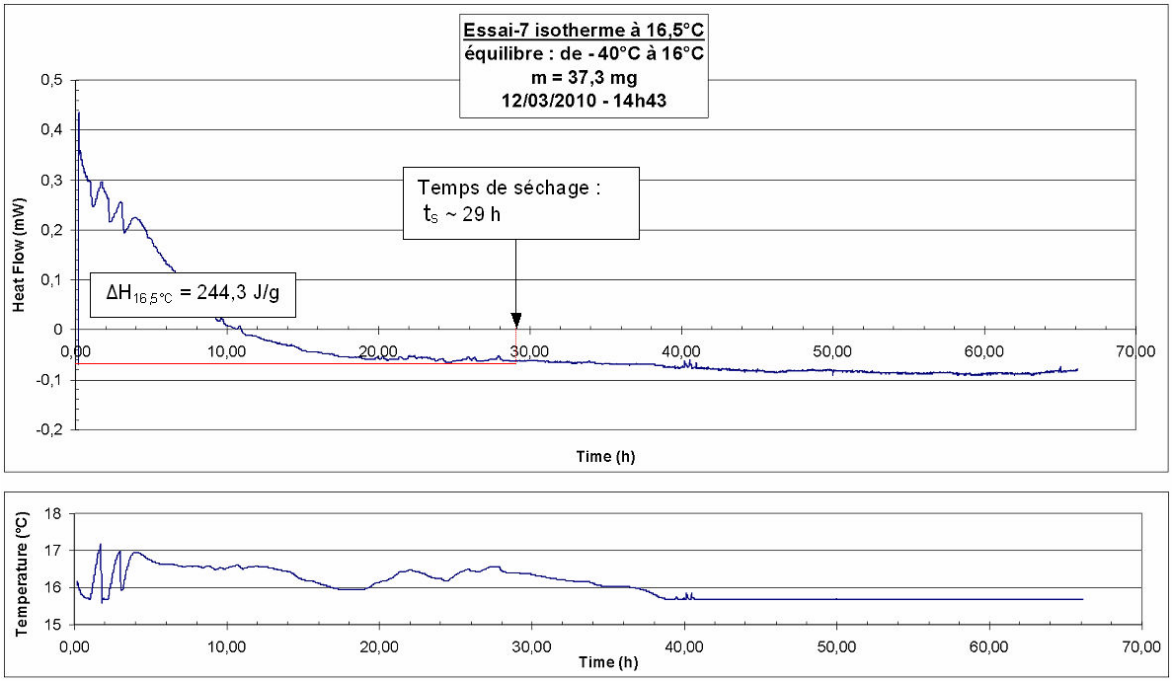
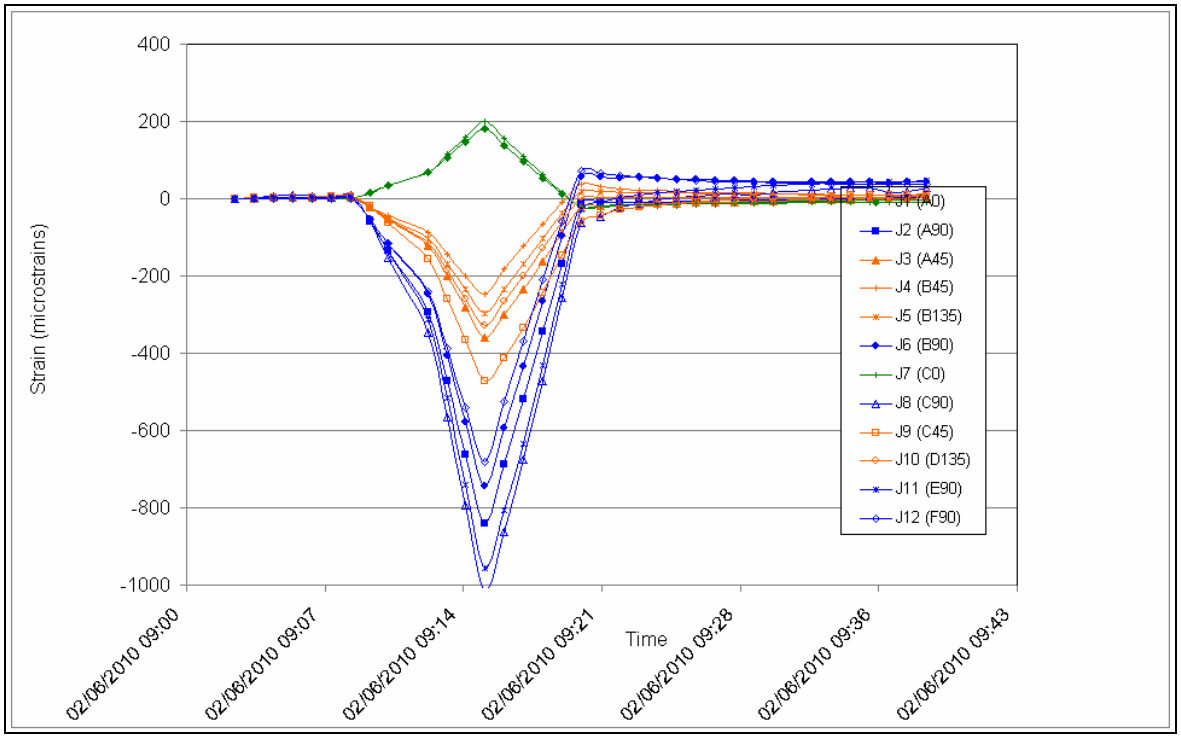


Figure 159 : Essai « DSC » 17, Iso-16,5°C, Campagne 2

XVII. ANNEXE P

ANNEXE P : RESULTATS DES ESSAIS BIAXIAUX SUR CAROTTES EN CIMENT CAMPAGNE DE 2010



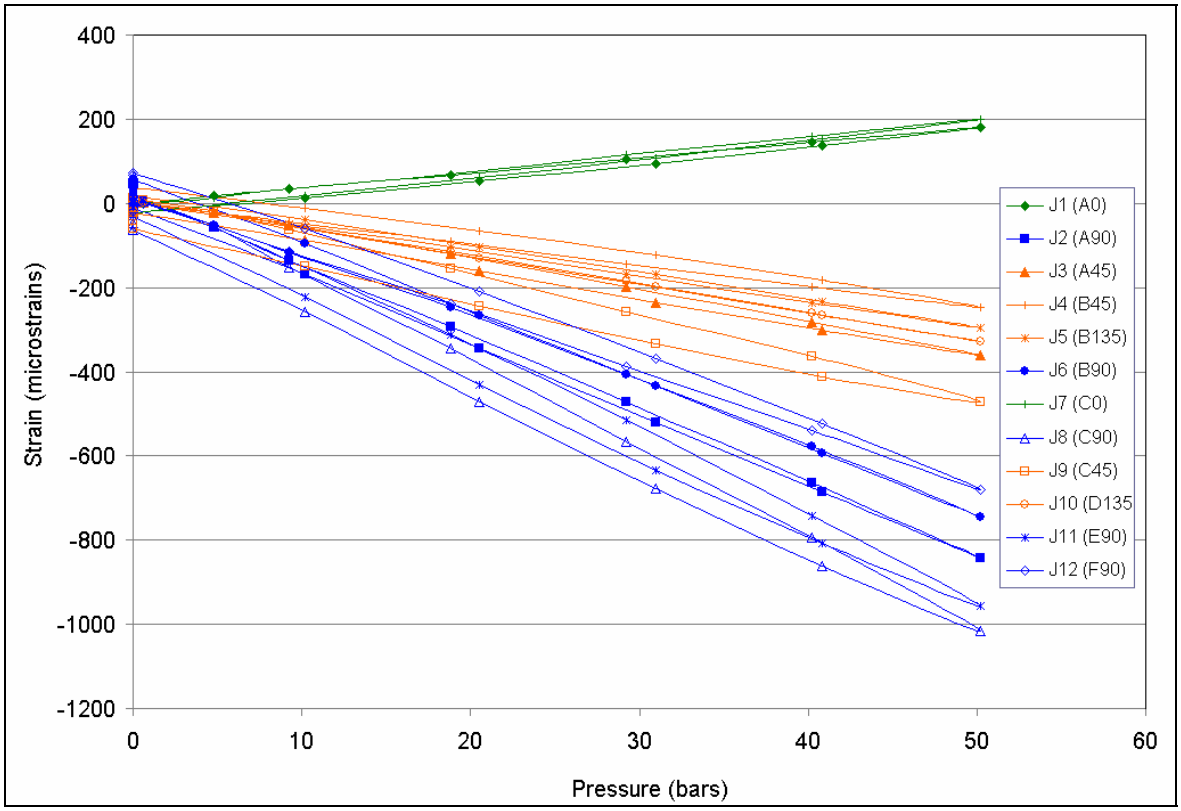
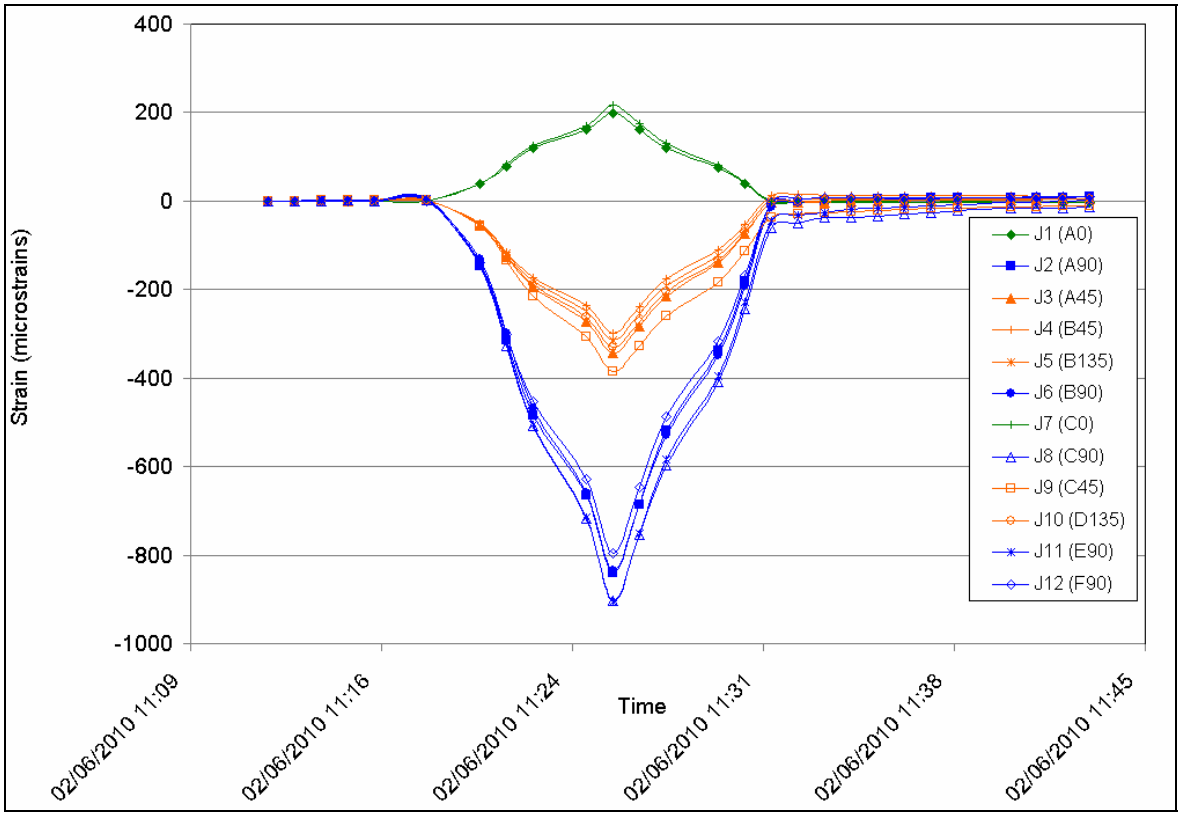


Figure 160 : Essai biaxial 1 – Carotte en ciment – Campagne 2010



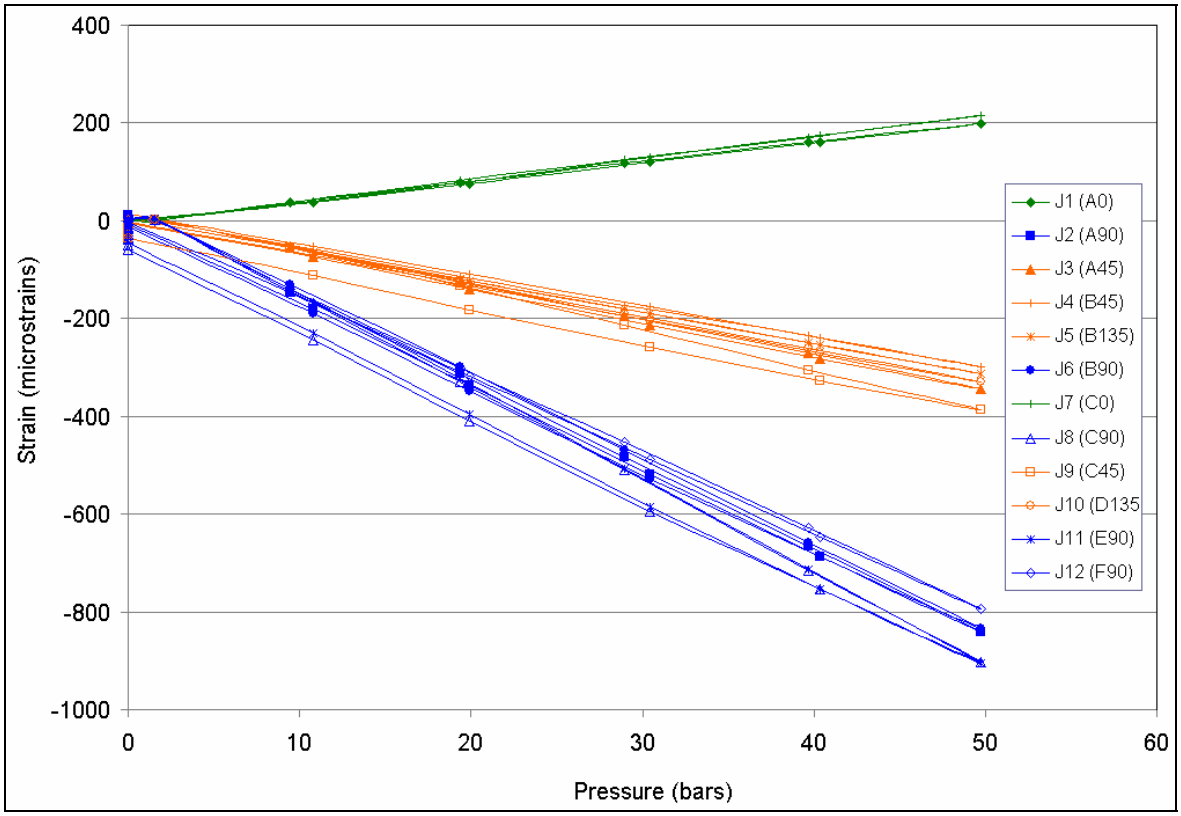
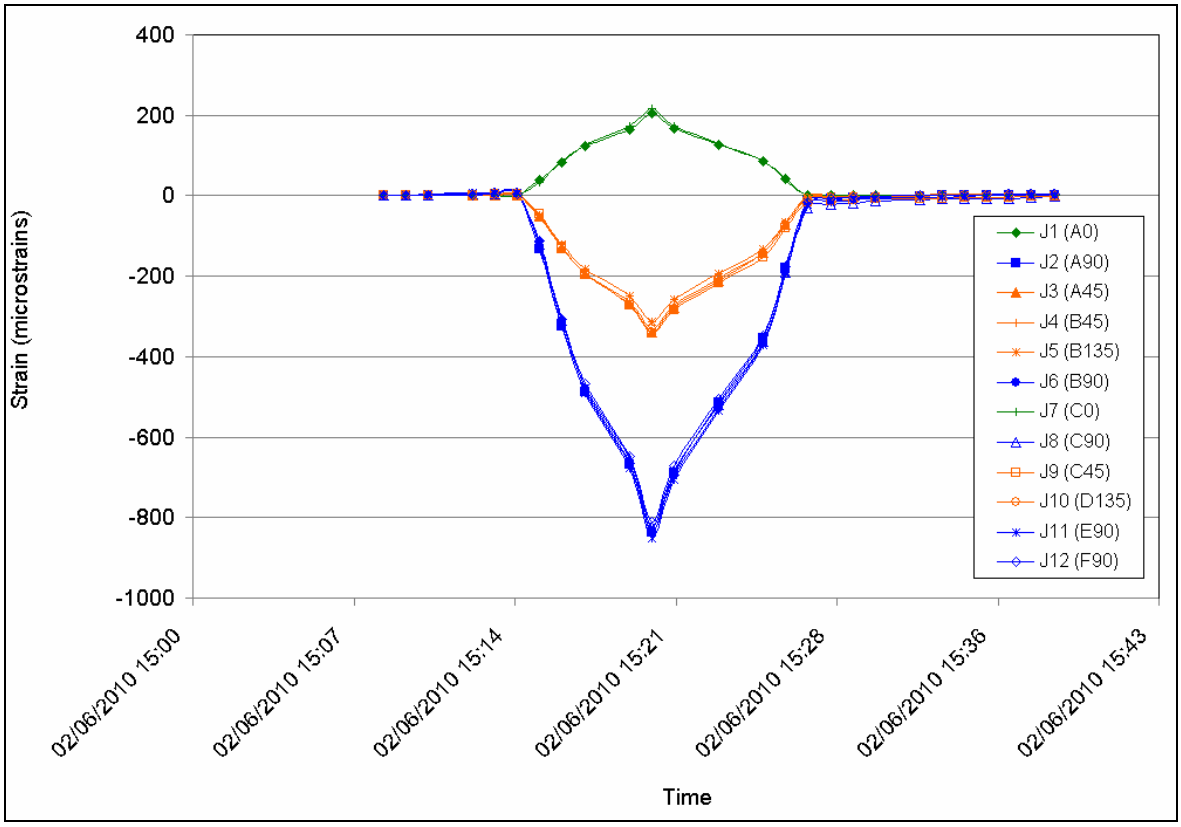


Figure 161 : Essai biaxial 2 – Carotte en ciment – Campagne 2010



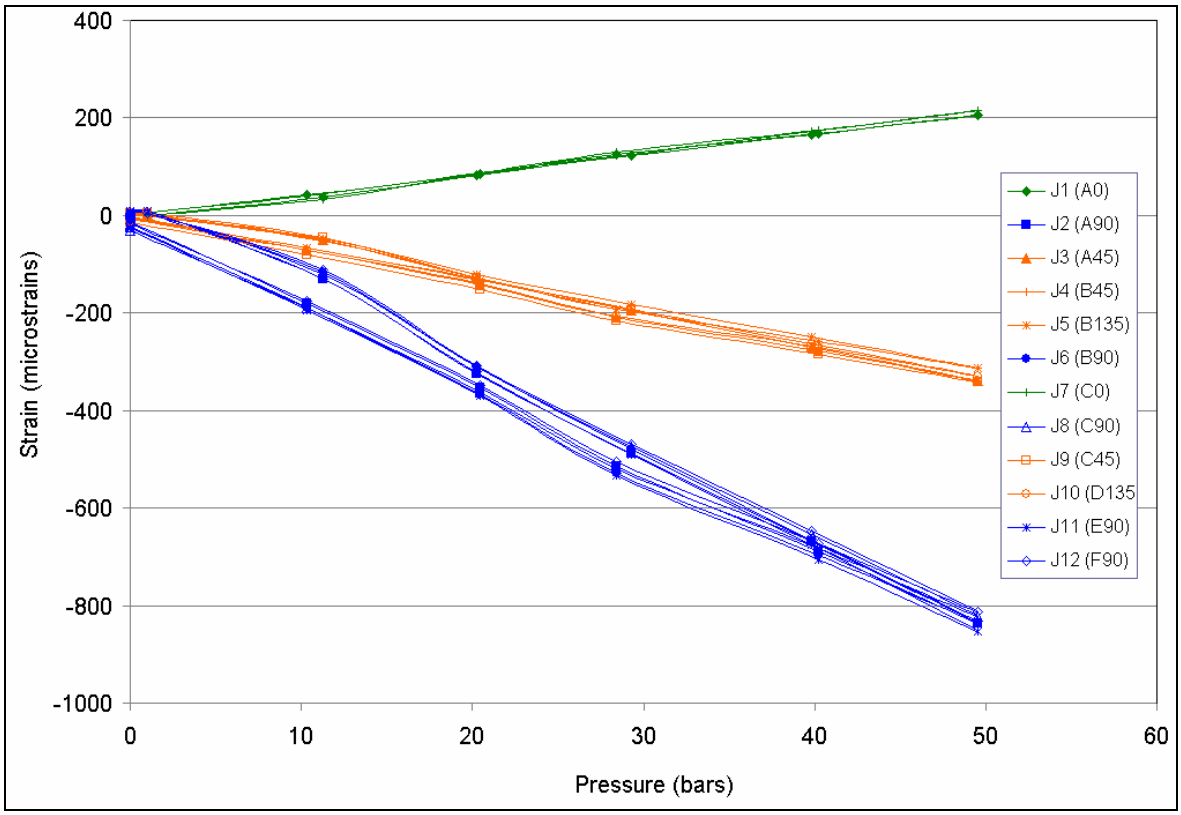
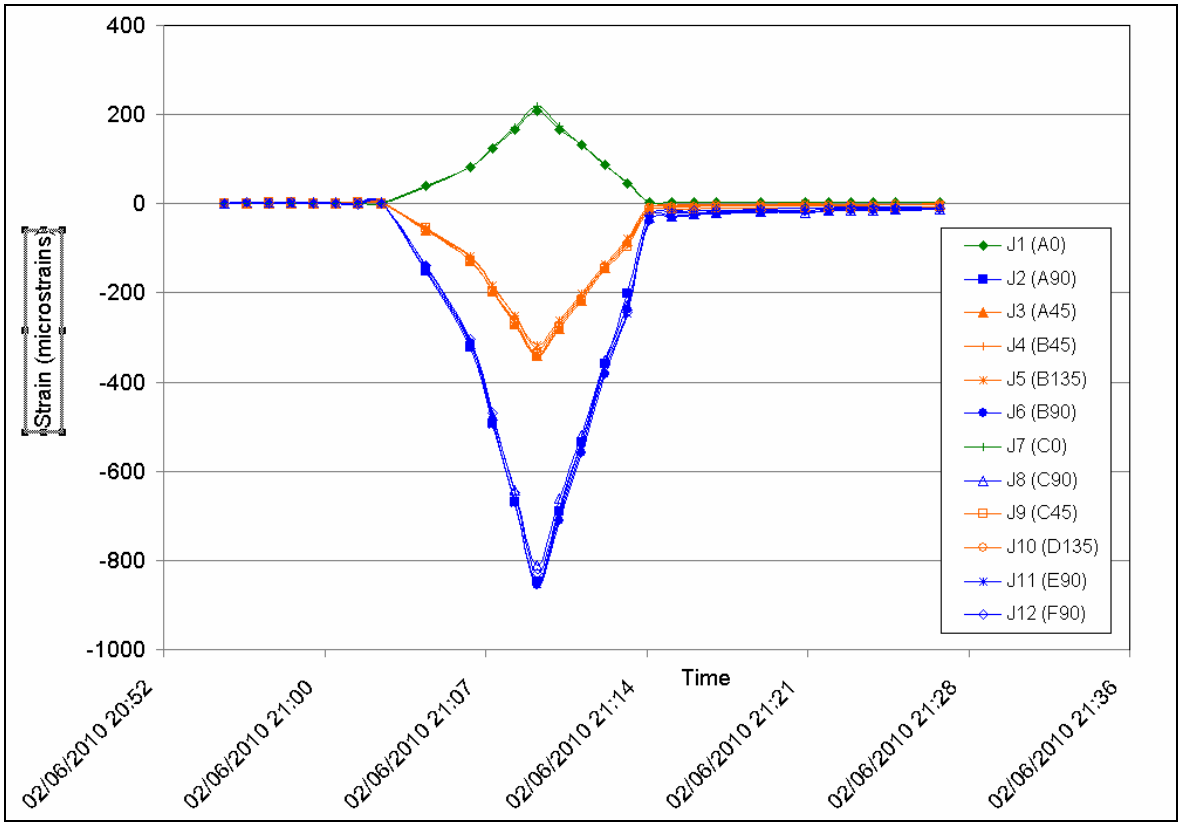


Figure 162 : Essai biaxial 3 – Carotte en ciment – Campagne 2010



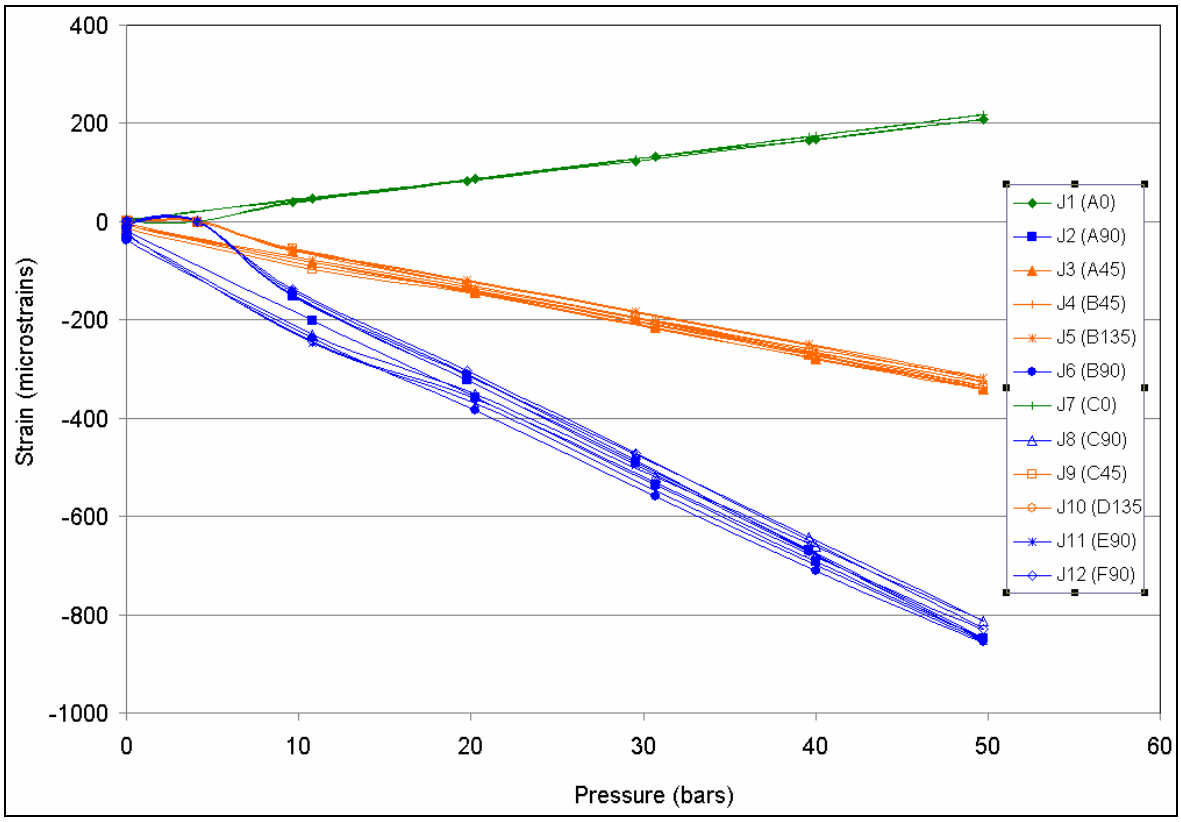
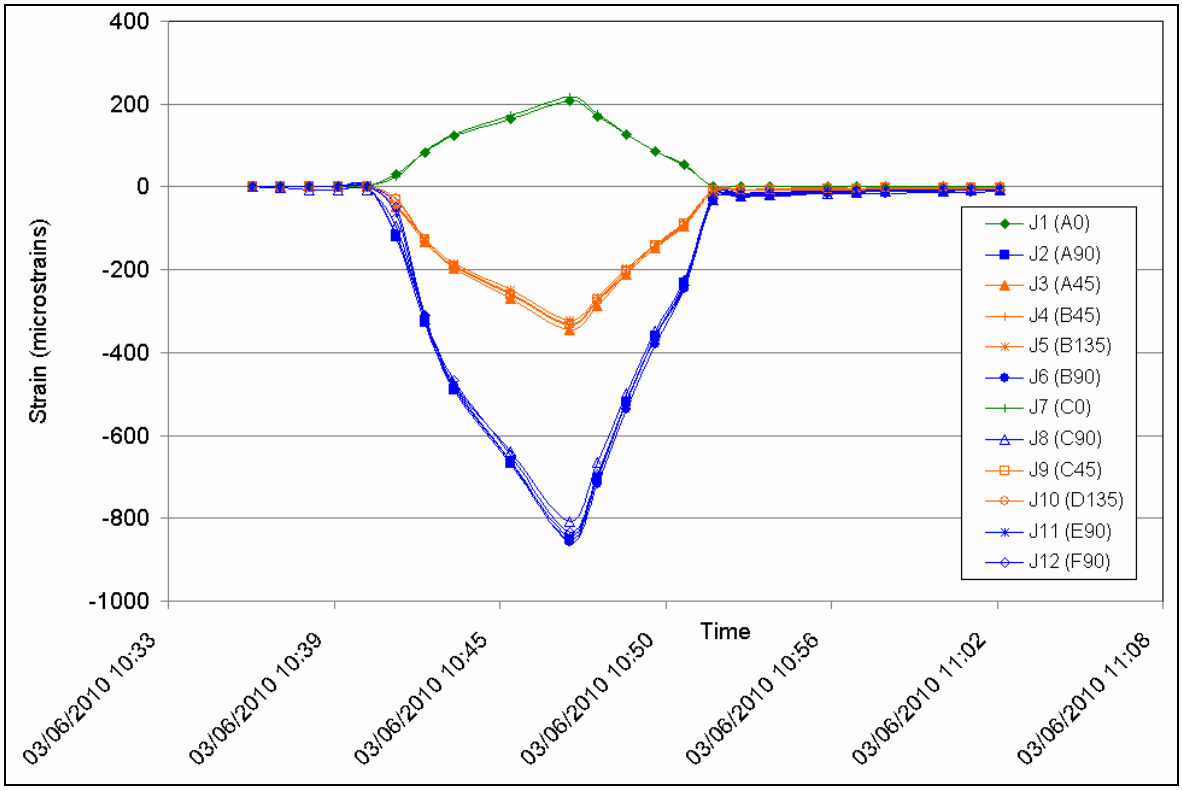


Figure 163 : Essai biaxial 4 – Carotte en ciment – Campagne 2010



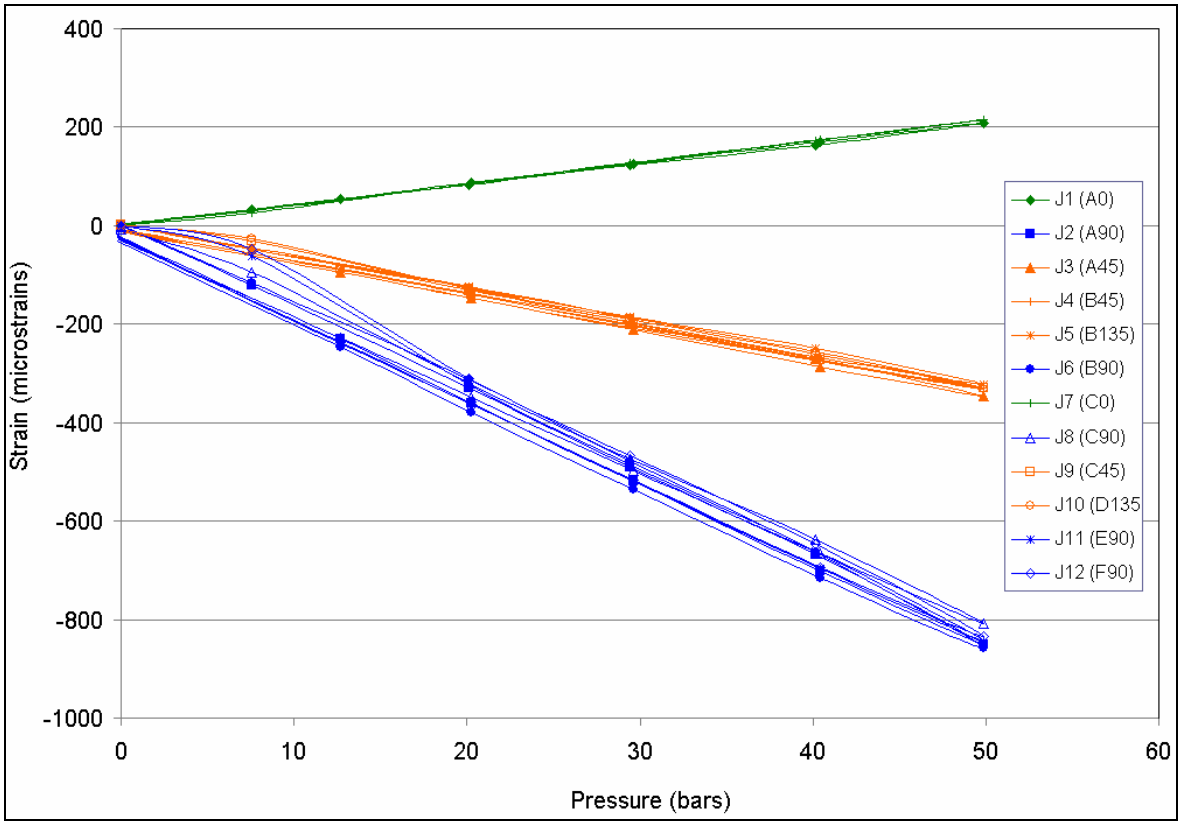
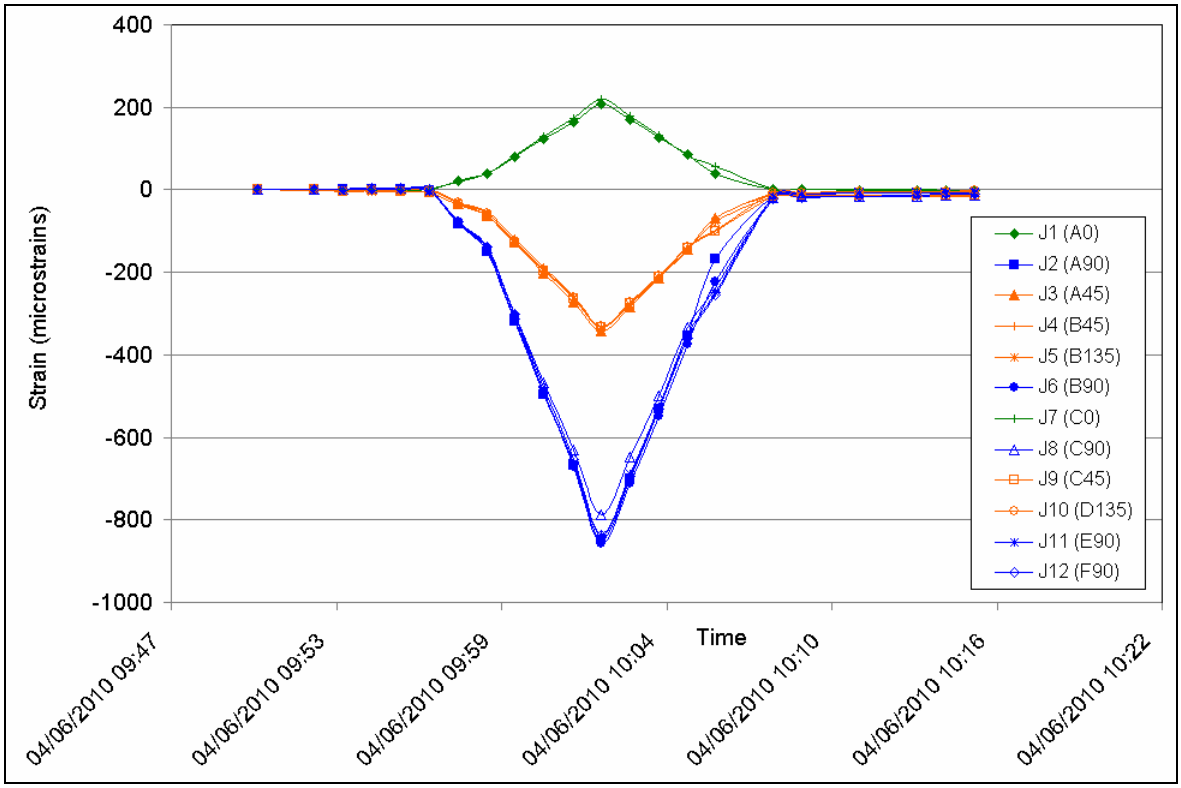


Figure 164 : Essai biaxial 5 – Carotte en ciment – Campagne 2010



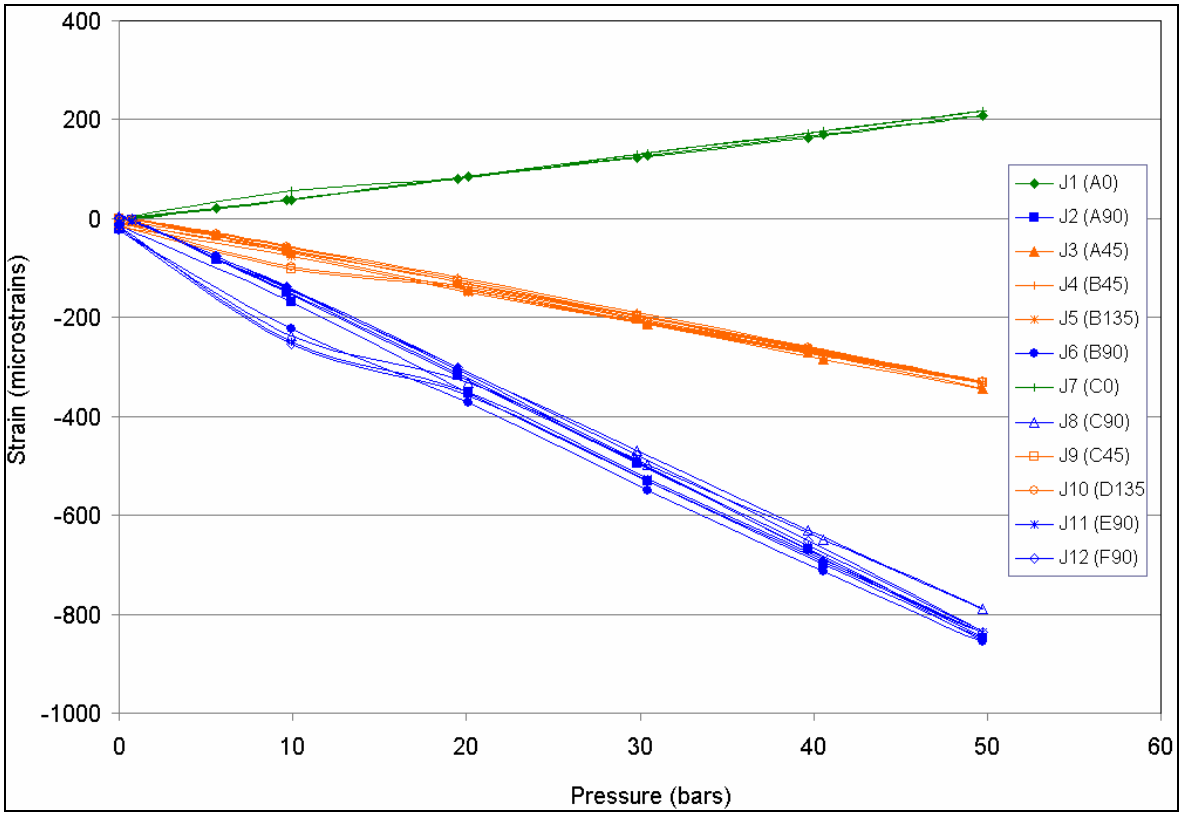
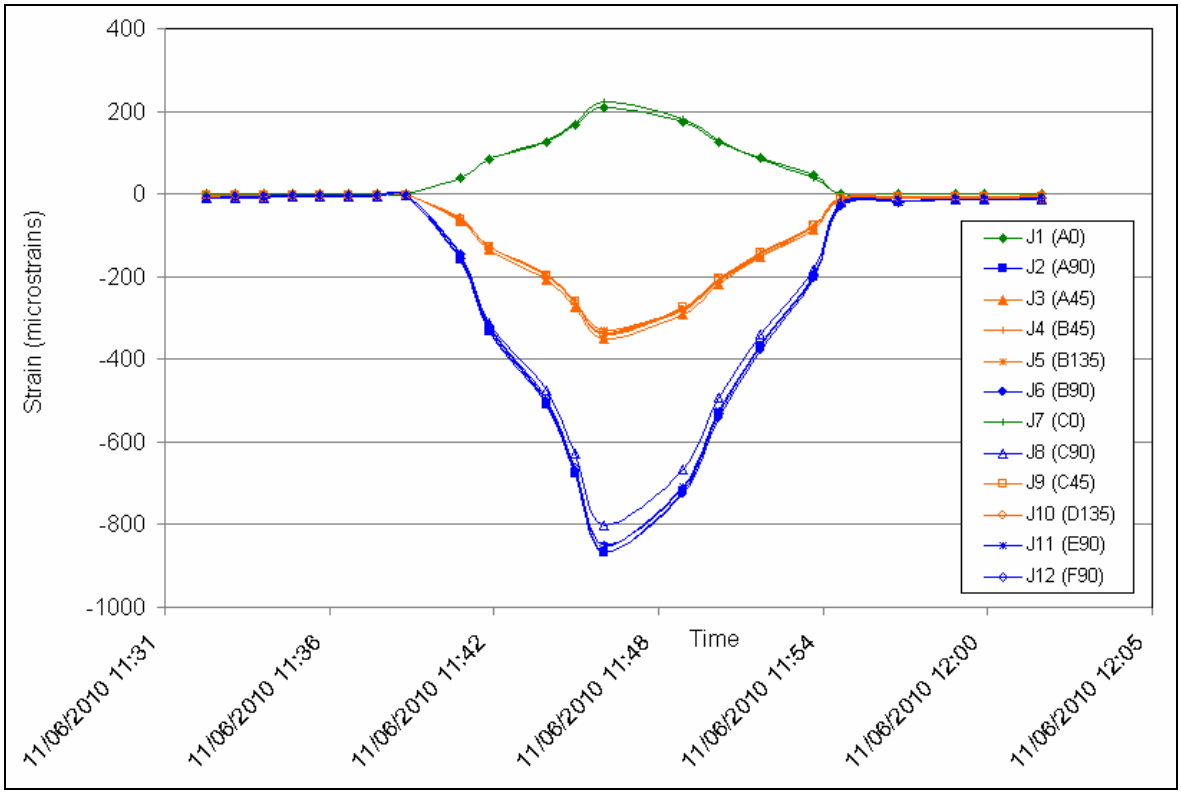


Figure 165 : Essai biaxial 6 – Carotte en ciment – Campagne 2010



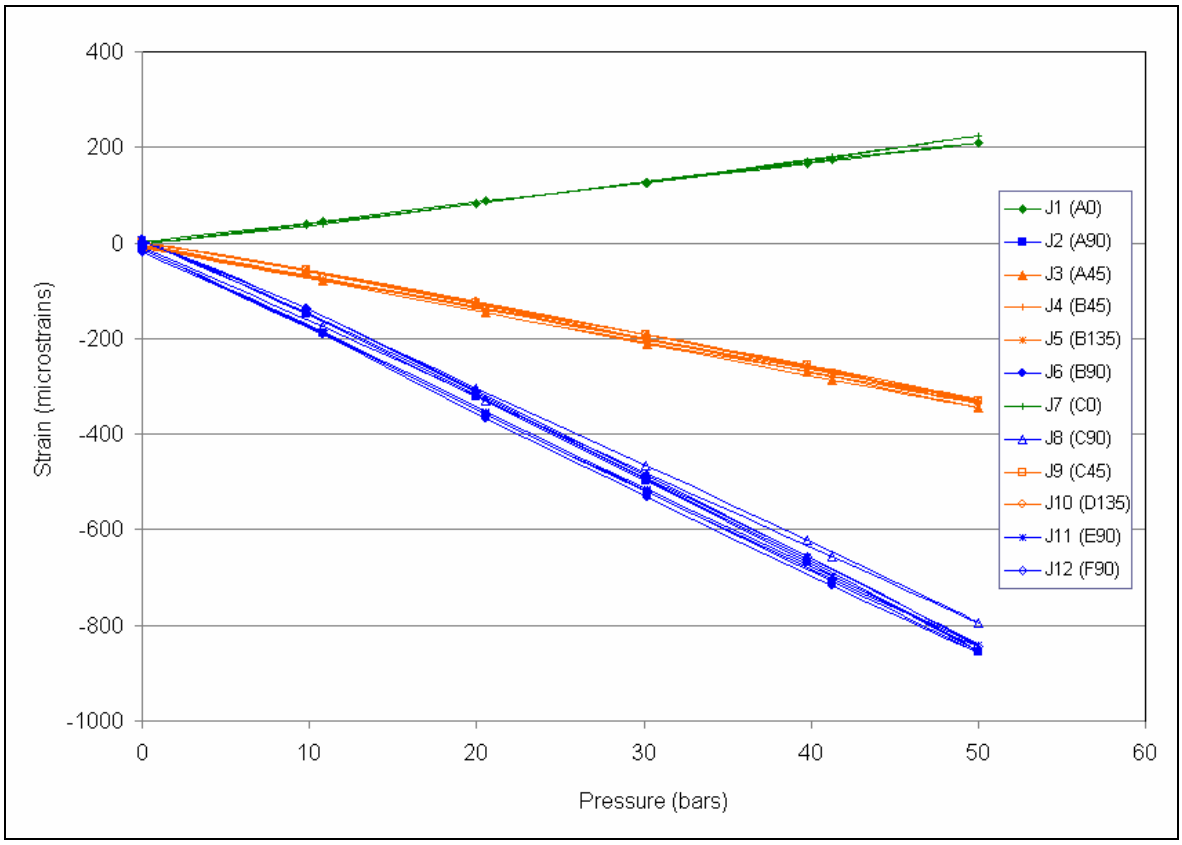


Figure 166 : Essai biaxial 7 – Carotte en ciment – Campagne 2010

XVIII. ANNEXE Q

ANNEXE Q : VARIATION DES PARAMETRES ELASTIQUES DE L'ARGILITE DE TOURNEMIRE EN FONCTION DE LA PRESSION DE CONFINEMENT SELON NIANDOU [1994]

Tableau 32 : Variation des paramètres élastiques de l'argilite de Tournemire en fonction de la pression de confinement selon Niandou (1994)

	Pc [MPa]	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	A_E
		$E_\perp$ [MPa]	$E_{//}$ [MPa]	$\nu_\perp$	$\nu_{//}$	G [MPa]	
Niandou (1994)	1	5554	22446	0,06	0,12	3909	4,04
	5	5969	19810	0,16	0,12	4110	3,32
	10	7422	22013	0,16	0,13	4750	2,97
	20	10321	23243	0,22	0,16	5791	2,25

Pc : Pression de confinement

XIX. ANNEXE R

ANNEXE R : EXEMPLES DE COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION OBTENUES LORS D'ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE REALISES PAR REJEB *ET AL.*, [1999] SUR DES CAROTTES PROVENANT DU TUNNEL ET DE LA GALERIE EST DU SITE EXPERIMENTAL DE TOURNEMIRE

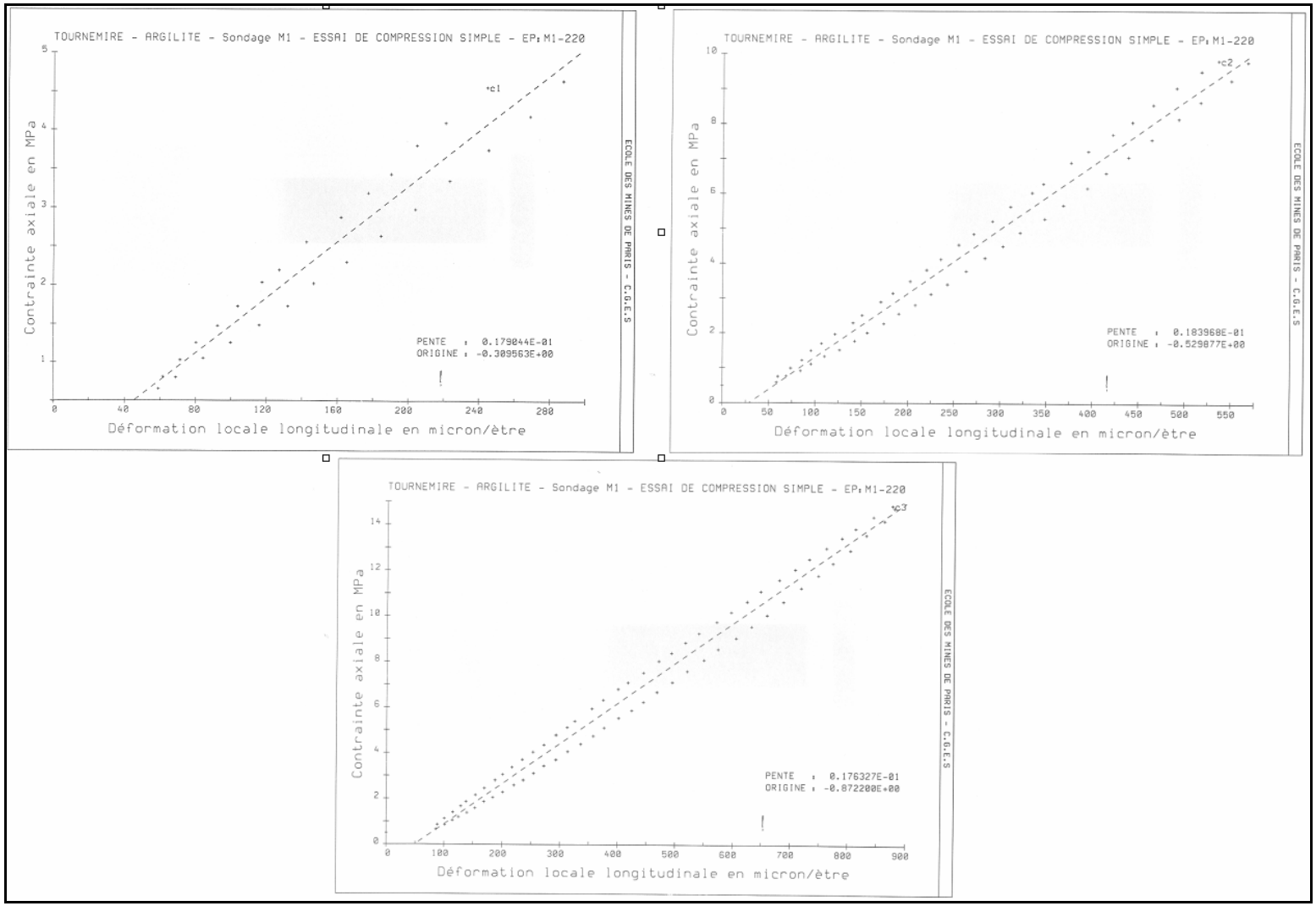


Figure 167 : Essais de compression simple M1-220 [Rejeb et al., 1999]

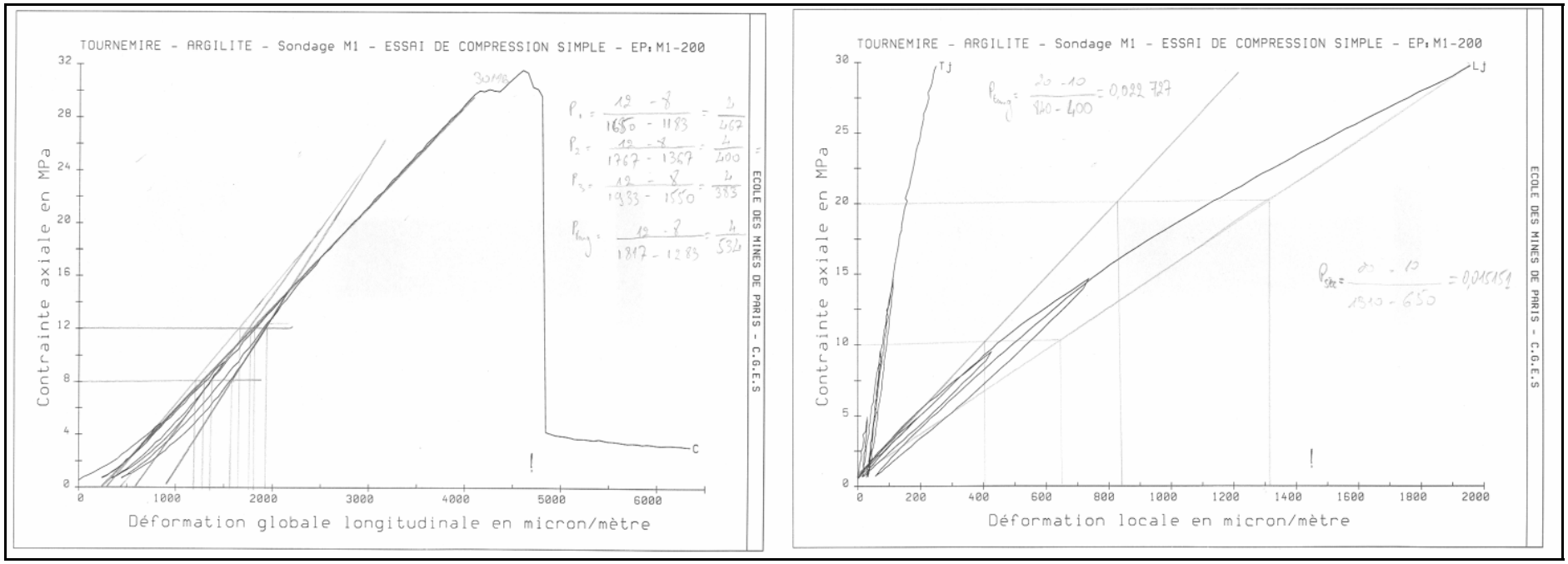


Figure 168 : Essais de compression simple M1-200 [Rejeb et al., 1999]

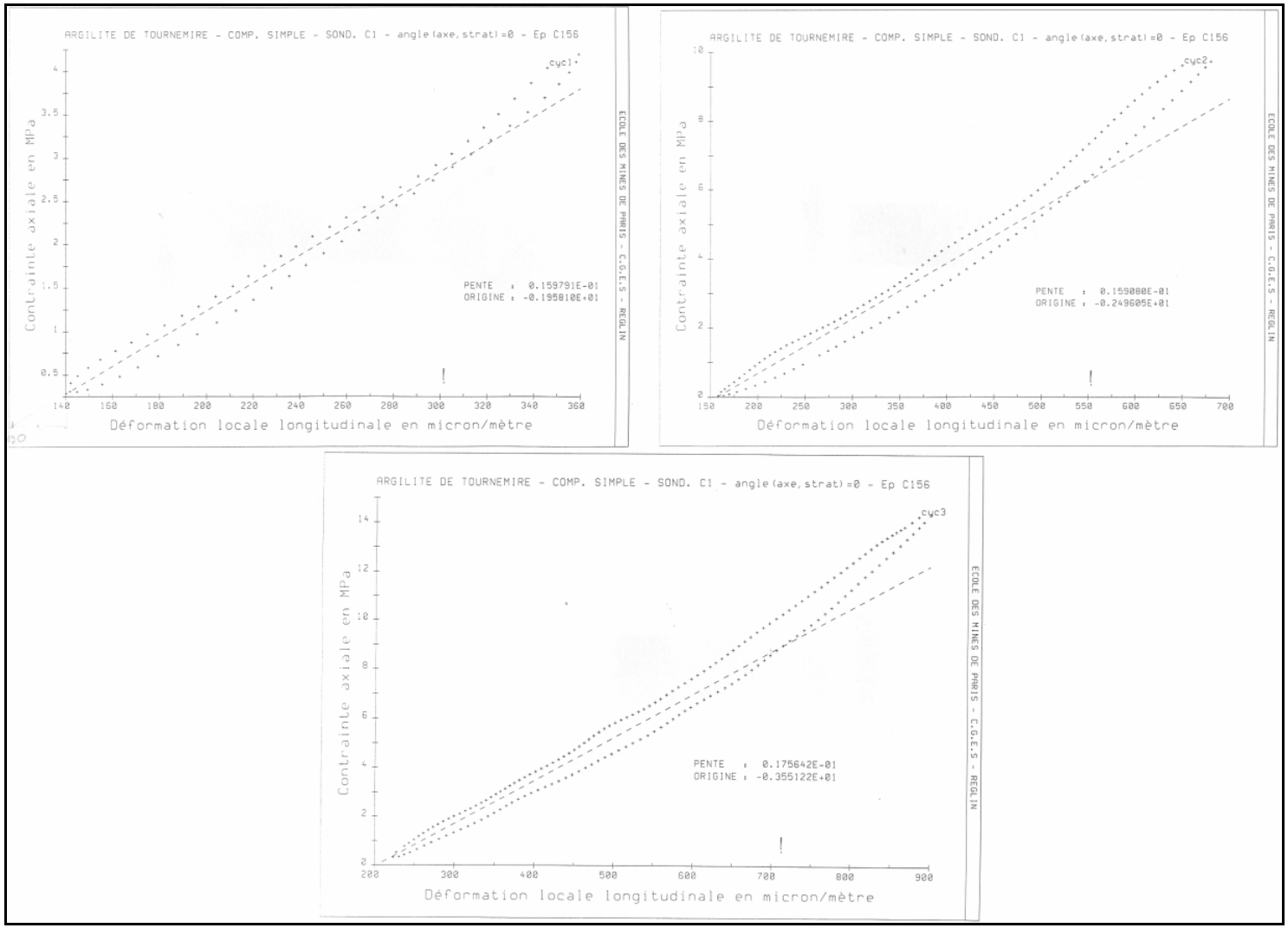


Figure 169 : Essais de compression simple C1-56 [Rejeb et al., 1999]

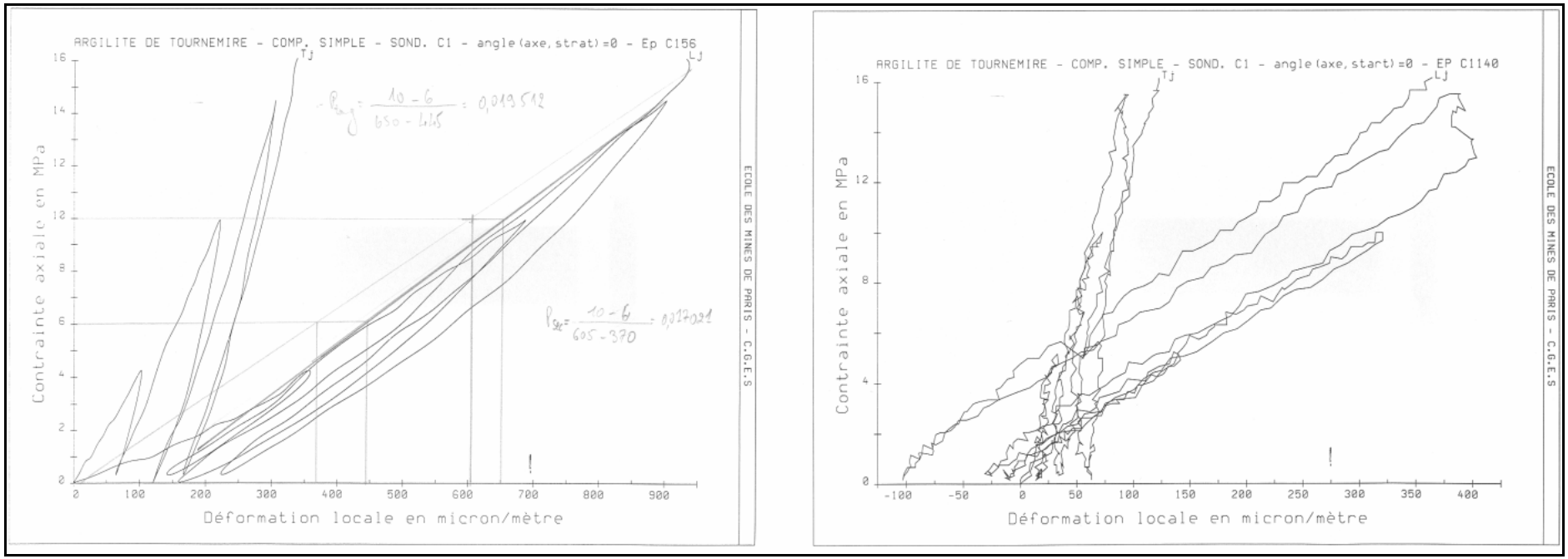


Figure 170 : Essais de compression simple C1-140 [Rejeb et al., 1999]

XX. ANNEXE S

ANNEXE S : MODULES DE YOUNG E_1 ET E_2 DETERMINES A PARTIR DES ESSAIS SUR LES EPROUVETTES EN PROVENANCE DE LA GALERIE EST ET DU TUNNEL LORS DE LA CAMPAGNE MENEE PAR REJEB *ET AL.*, [1999]

		Pression de Con-finement [MPa]	Cycle charge-décharge [MPa]	E_2 [MPa]	
				Module par cycle	Module Moyen
Forage C1	**C1 - 56**	**0**	5	15979	16483
			10	15908	
			15	17564	
	C1 - 140 *	**0**	5	-	-
			10	-	
			15	-	
	C1 - 196	**0**	5	10915	17299
			10	23684	
			15	-	
	C1 - 240	**0**	5	20866	19513
			10	18161	
			15	-	
				Min	16483
				Moyenne	17765
				Max	19513

		Pression de Con-finement [MPa]	Cycle charge-décharge [MPa]	E_1 [MPa]	
				Module par cycle	Module Moyen
Forage VF4	**VF4-1810**	**1**	5	7880	8520
			10	8730	
			15	8950	
	VF4-1825	**2**	5	9860	9610
			10	9800	
			15	9170	
	VF4-1840	**5**	5	10000	8917
			10	8060	
			15	8690	
	VF4-1855	**8**	5	10510	9797
			10	9940	
			15	8940	
	VF4-1855 B	**8**	5	10350	8883
			10	8590	
			15	7710	
	VF4-1870	**10**	5	10450	9870
			10	9900	
			15	9260	
				Min	8520
				Moyenne	9266
				Max	9870

Tableau 33 : Modules de Young E_1 et E_2 déterminés à partir des essais sur les éprouvettes en provenance de la galerie Est.

		Pression de Con-finement [MPa]	Cycle charge-décharge [MPa]	Module d'élasticité E_2 [MPa]	
				Module par cycle	Module Moyen
Forage M1	**M1 - 68**	**0**	5	19077	18443
			10	18090	
			15	18163	
	M1 - 100	**0**	5	20489	20549
			10	20987	
			15	20173	
	M1 - 120	**0**	5	24684	21247
			10	20544	
			15	18513	
	M1 - 150	**0**	5	21867	20659
			10	20865	
			15	19246	
	M1 - 200	**0**	5	23291	21628
			10	21532	
			15	20063	
	M1 - 220	**0**	5	17904	17978
			10	18397	
			15	17633	
	M1 - 255	**0**	5	23236	21253
			10	21167	
			15	19358	
				Min	17978
				Moyenne	20335
				Max	21628

Tableau 34 : Modules de Young E_1 et E_2 déterminés à partir des essais sur les éprouvettes en provenance du Tunnel à 123 m de la galerie Est dans la direction Nord.

XXI. ANNEXE T

ANNEXE T : FORMULES ANALYTIQUES PROPRES A UNE ROCHE ELASTIQUE ISOTROPE SELON HOMAND *ET AL.*, (1993) UTILISES PAR CONTRUCCI, [2006] POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES ELASTIQUES ISOTROPES TRANSVERSES DE L'ARGILITE DE TOURNEMIRE A PARTIR DE MESURE DE VITESSES PAR ULTRASON

$$\nu_{12} = \left\{\left[\boldsymbol{V_P}^2 - 2\times\boldsymbol{V_S}^2\right]/\left[2*\left(\boldsymbol{V_P}^2 - \boldsymbol{V_S}^2\right)\right]\right\}_{\text{forage}\perp\text{au plan danisotropie}}$$

$$\boldsymbol{E}_{12} = \left\{2\times\rho\times\boldsymbol{V_S}^2\times\left(1+\nu_{12}\right)\right\}_{\text{forage}\perp\text{au plan danisotropie}}$$

$$\boldsymbol{G}_{12} = \left\{\rho\times\boldsymbol{V_S}^2\right\}_{\text{forage}\perp\text{au plan danisotropie}}$$

$$\nu_{23} = \left\{\left[\boldsymbol{V_P}^2 - 2\times\boldsymbol{V_S}^2\right]/\left[2*\left(\boldsymbol{V_P}^2 - \boldsymbol{V_S}^2\right)\right]\right\}_{\text{forage // au plan danisotropie}}$$

$$\boldsymbol{E}_{23} = \left\{2\times\rho\times\boldsymbol{V_S}^2\times\left(1+\nu_{23}\right)\right\}_{\text{forage // au plan danisotropie}}$$

XXII. ANNEXE U-1

ANNEXE U-1 : TECHNIQUES UTILISEES POUR GENERER LE MAILLAGE 3D DE L'ESSAI BIAXIAL

Modèle 3D de l'essai biaxial

Présentation du modèle

La modélisation de l'essai biaxial se limitera au modèle 3D puisque l'objectif de ce travail est de déterminer les paramètres élastiques de la roche dans le cas isotrope transverse.

Rappelons ici que pour la création du maillage et pour accéder à des mailles très fines de l'ordre du millimètre nous avons adopté la même démarche que celle utilisée pour la modélisation de l'essai de surcarottage à savoir adopter un facteur d'échelle de 100.

Pour reproduire au mieux la position des jauges de déformation (Figure 2 et Figure 3), nous avons raffiné au maximum le maillage transversalement (Figure 171). Avec CESAR-LCPC nous n'avions pas pu créer plus que 17 mailles disposées de manière orthoradiale sur un quart de cercle, au-delà de cette valeur le logiciel boguait. Afin de conserver l'axisymétrie du maillage nous avons opté pour 16 mailles par quart de cercle, ce qui fait un total de 64 mailles sur la totalité du cercle (Figure 171).

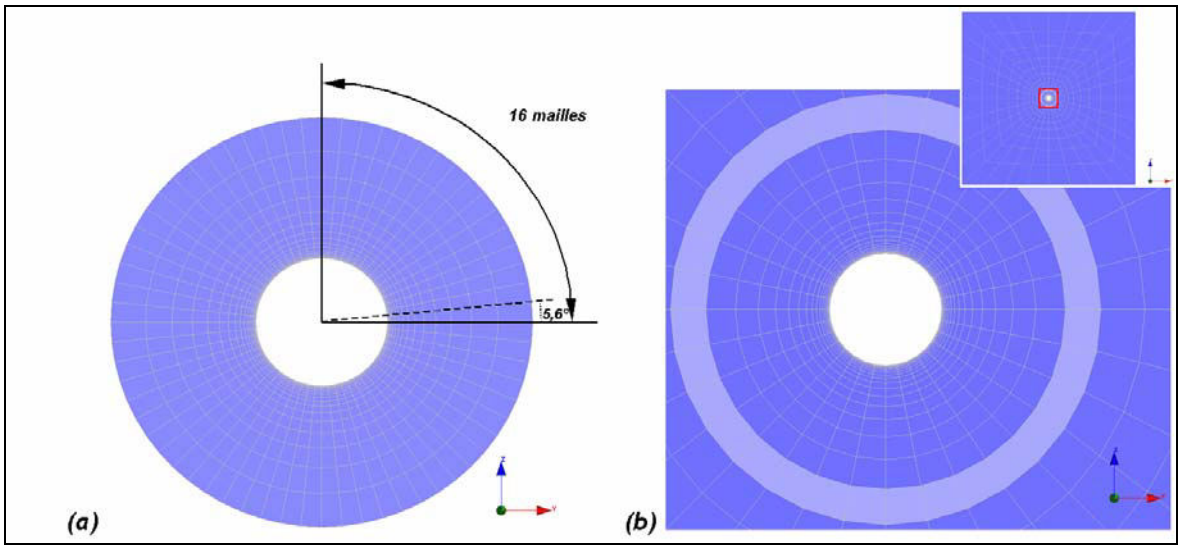


Figure 171 : (a) coupe transversale de l'essai biaxial ; (b) coupe transversale de l'essai de surcarottage

OPTIMISATION DU MAILLAGE

Comme nous l'avons déjà mentionné dans le §.**5.3.1**, nous rappelons que l'objectif de la modélisation est, à partir de l'exploration de l'espace des paramètres élastiques isotropes transverses, de déterminer le jeu de paramètres qui permettra de décrire au mieux le comportement de l'argilite au cours de l'essai biaxial. Ce travail nécessite donc la création d'un grand nombre de modèles, il est donc important de réfléchir sur le modèle optimal pour minimiser au mieux le temps de calcul.

Nous nous sommes intéressés dans cette partie à la distribution des contraintes (radiales et orthoradiales) sur la section transversale centrale qui contient les jauges de déformation (Figure 2 et Figure 172) Le comportement de la roche adopté est un comportement élastique linéaire isotrope transverse.

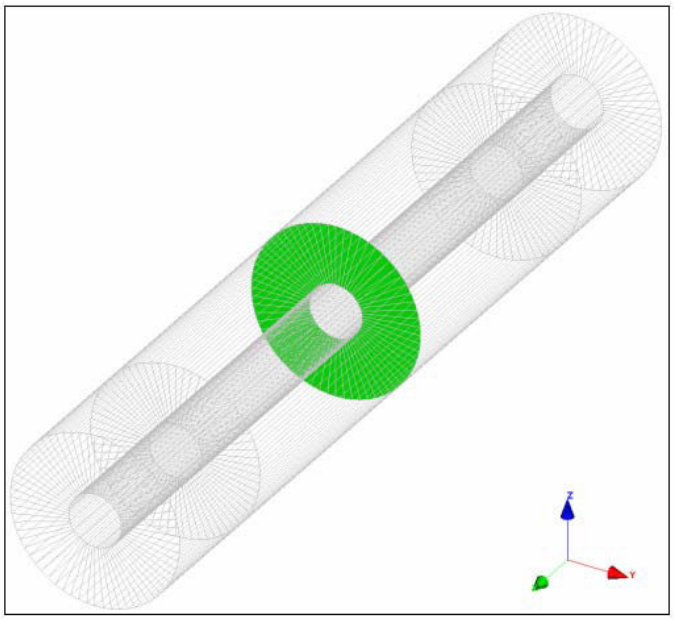


Figure 172 : Section d'étude : section transversale centrale

La première étape de ce travail a consisté en l'optimisation du maillage du modèle à adopter par la suite. Nous avons comparé différents modèles visant à diminuer au maximum le nombre de mailles ainsi que le nombre de phases et donc réduire considérablement le temps de calcul.

Nous avons comparé en premier lieu, un modèle qui reproduit l'essai biaxial en entier (dimension de la carotte, surface de chargement - Figure 173 (a)) avec un deuxième modèle réduit dont les dimensions sont restreintes à la surface de chargement (Figure 173 (b)).

Les résultats montrent que les contraintes enregistrées dans une coupe transversale à l'emplacement des jauges sont égales pour les deux modèles de la Figure 173.

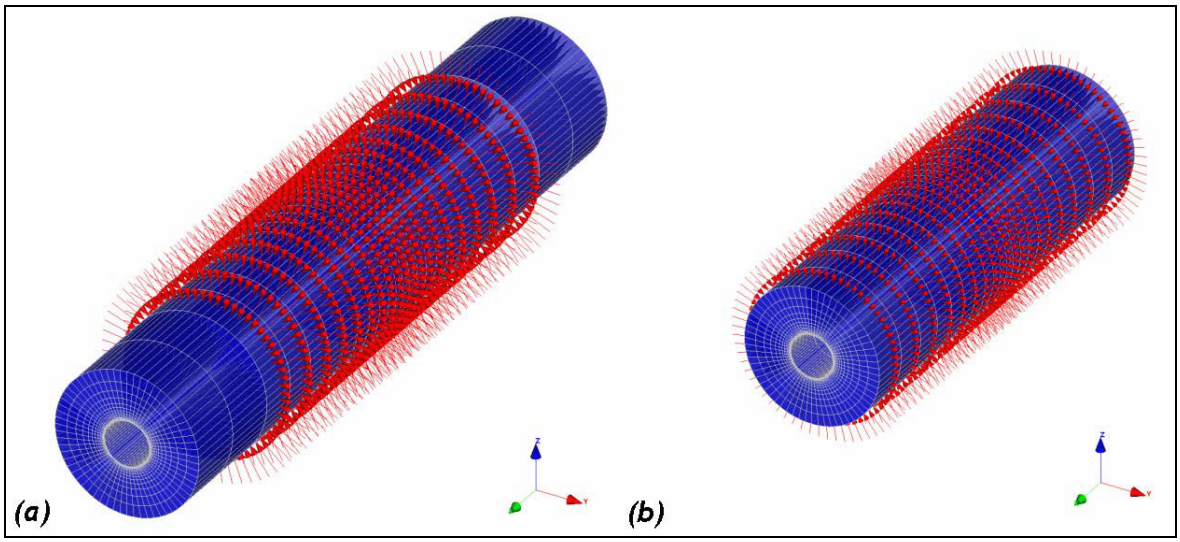


Figure 173 : modélisation de l'essai (a) modèle complet ; (b) modèle réduit

En deuxième lieu, nous avons comparé un modèle contenant cinq phases à un modèle contenant une seule phase. Dans le modèle à cinq phases nous avons reproduit exactement l'essai biaxial réel, ça veut dire que nous avons appliqué un incrément de charge de 10 bars pour chaque phase, alors que pour le modèle à une seule phase nous avons appliqué les 50 bars en une seule fois.

Les résultats du modèle à cinq phases montrent que le comportement de la roche est parfaitement élastique. La distribution des contraintes sur la paroi interne pour un chargement de 50 bars est la même pour les 2 modèles.

Modèle 3D de l'essai biaxial

Pour pouvoir mettre en évidence l'anisotropie de la roche ainsi que l'effet du coefficient de Poisson pour différentes orientations, la prise en compte de la 3ème dimension est nécessaire.

Comme nous l'avons mentionné dans le §.0, nous n'avons pas reproduit explicitement la progression de l'application du chargement au cours du temps (palier de 1 MPa), nous nous sommes contentés d'une seule phase où nous appliquons 5 MPa en même temps. Nous nous sommes contentés aussi de modéliser que la partie de la carotte qui est sollicitée.

L'étude se voulant essentiellement phénoménologique, la couche de l'inclusion n'est pas prise en compte pour l'instant dans la modélisation.

Nous présentons dans la Figure 78 le modèle adopté pour reproduire l'essai biaxial. Le modèle qui a été adopté pour la création des abaques numériques (nécessaires pour la détermination des paramètres élastiques, voir § 5.3.3) est un modèle sans inclusion. Cependant nous démontrons que l'effet de l'inclusion ne dépasse pas 5% en général et pas plus de 3% sur les paramètres élastiques obtenus à partir des deux essais TC35 et TC36.

XXIII. ANNEXE U-2

ANNEXE U-2 : VERIFICATION DU MODELE BIAXIAL 3D

Cas d'un comportement élastique linéaire isotrope, sans prise en compte de l'epoxy

Pour valider le modèle, nous avons procédé à la comparaison de la variation des contraintes radiales et orthoradiales calculées numériquement sur des lignes de coupes (Figure 174) avec leurs valeurs théoriques déduites des formulations analytiques de Kirsch [1968] (Figure 175).

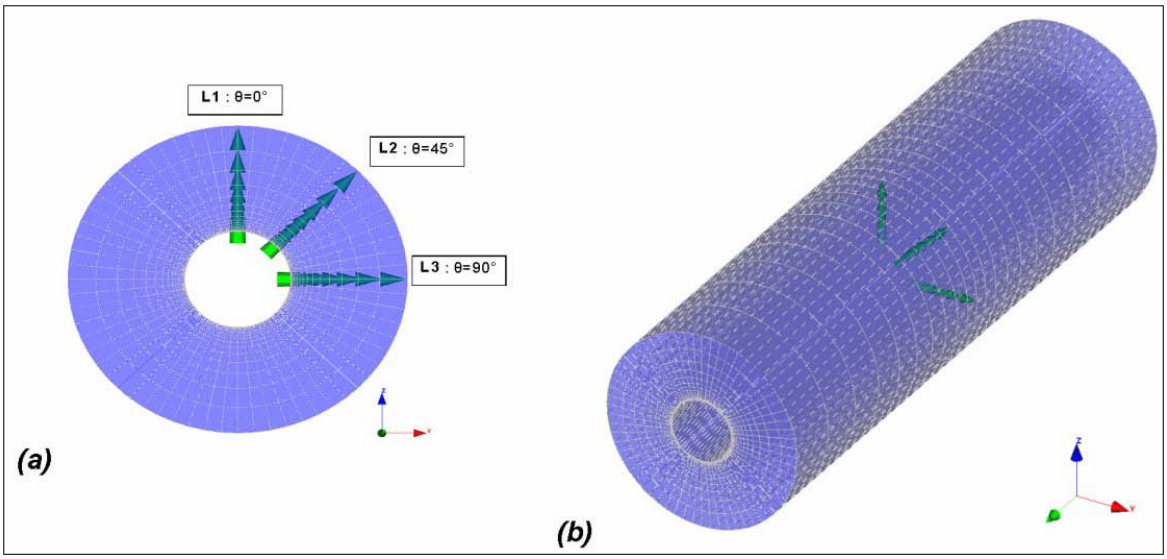


Figure 174 : lignes de coupes utilisées pour la validation du modèle

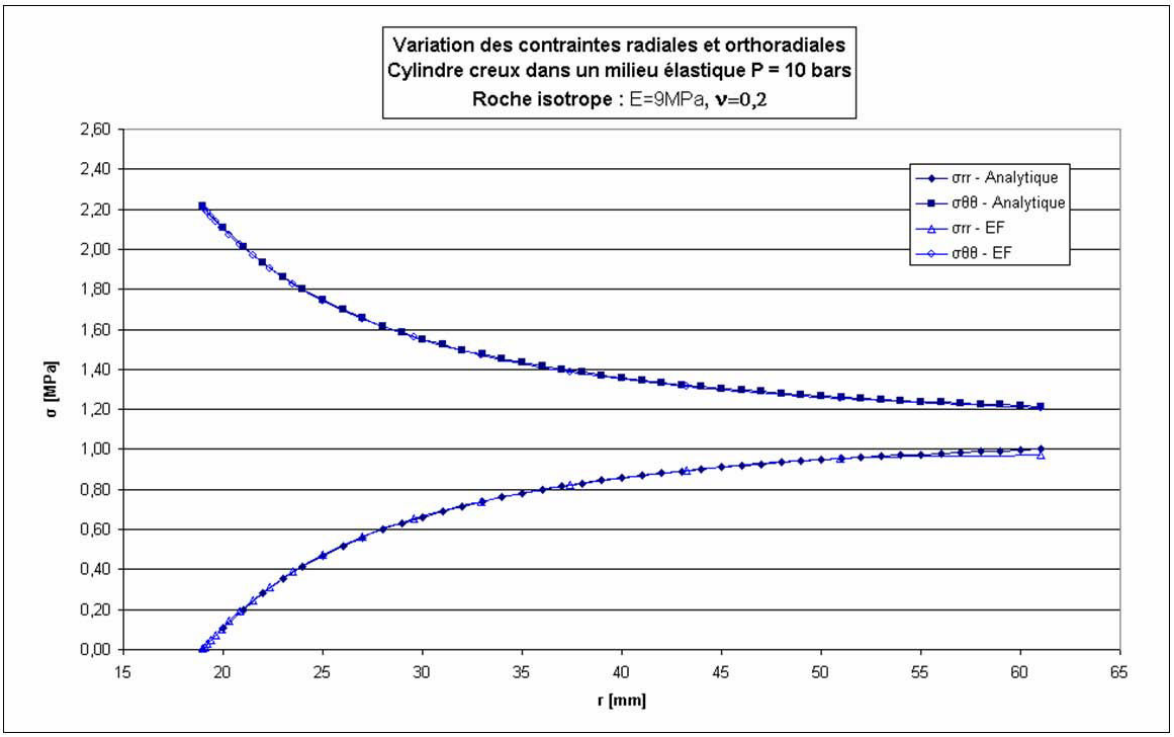


Figure 175 : Contraintes radiales et orthoradiales en fonction de la distance à l'axe de la carotte creuse – Comparaison entre les résultats numériques et les résultats analytiques

Passage des contraintes dans le repère du logiciel aux déformations locales enregistrées sur chaque jauge

A partir du code de calcul CESAR-LCPC nous obtenons les contraintes selon les trois axes du repère cartésien XYZ. Le passage des contraintes aux déformations se fait par l'intermédiaire de la matrice de passage du repère (XYZ) lié au logiciel CESAR-LCPC au repère lié à l'anisotropie (123), de la matrice d'élasticité et d'une matrice de passage du repère lié à l'anisotropie au repère cylindrique (Figure 176).

$$[\varepsilon_{li}]_{i=1...12} = [M] \bullet [\sigma]_{XYZ}$$

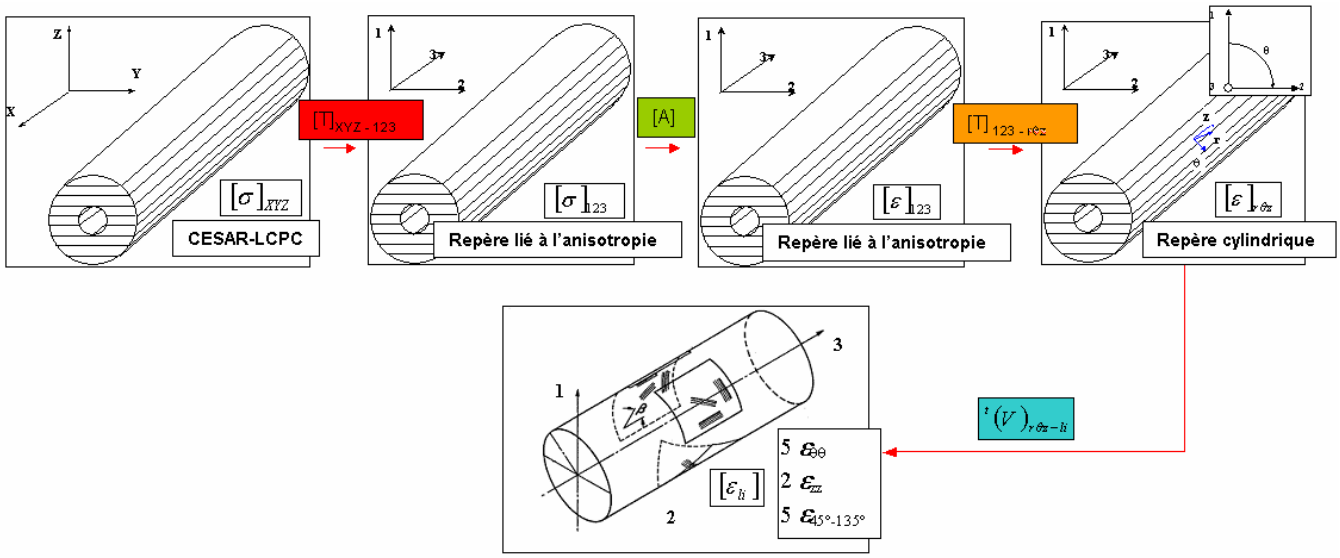


Figure 176 : schéma de passage des contraintes liées au repère du logiciel CESAR-LCPC aux déformations liées au repère cylindrique

Tout le ce qui suit est basé sur les travaux de Brady & Brown [2004] qui figurent dans le livre « Rock Mechanics for underground mining » (troisième édition, ISBN 1-4020-2064-3).

$$
\begin{bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \sigma_{z'} \\ \tau_{y'z'} \\ \tau_{z'x'} \\ \tau_{x'y'} \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
l_{x'}^2 & m_{x'}^2 & n_{x'}^2 & 2m_{x'}n_{x'} & 2n_{x'}l_{x'} & 2l_{x'}m_{x'} \\
l_{y'}^2 & m_{y'}^2 & n_{y'}^2 & 2m_{y'}n_{y'} & 2n_{y'}l_{y'} & 2l_{y'}m_{y'} \\
l_{z'}^2 & m_{z'}^2 & n_{z'}^2 & 2m_{z'}n_{z'} & 2n_{z'}l_{z'} & 2l_{z'}m_{z'} \\
l_{y'}l_{z'} & m_{y'}m_{z'} & n_{y'}n_{z'} & m_{y'}n_{z'}+m_{z'}n_{y'} & n_{y'}l_{z'}+n_{z'}l_{y'} & l_{y'}m_{z'}+l_{z'}m_{y'} \\
l_{z'}l_{x'} & m_{z'}m_{x'} & n_{z'}n_{x'} & m_{x'}n_{z'}+m_{z'}n_{x'} & n_{x'}l_{z'}+n_{z'}l_{x'} & l_{x'}m_{z'}+l_{z'}m_{x'} \\
l_{x'}l_{y'} & m_{x'}m_{y'} & n_{x'}n_{y'} & m_{x'}n_{y'}+m_{y'}n_{x'} & n_{x'}l_{y'}+n_{y'}l_{x'} & l_{x'}m_{y'}+l_{y'}m_{x'}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}
$$

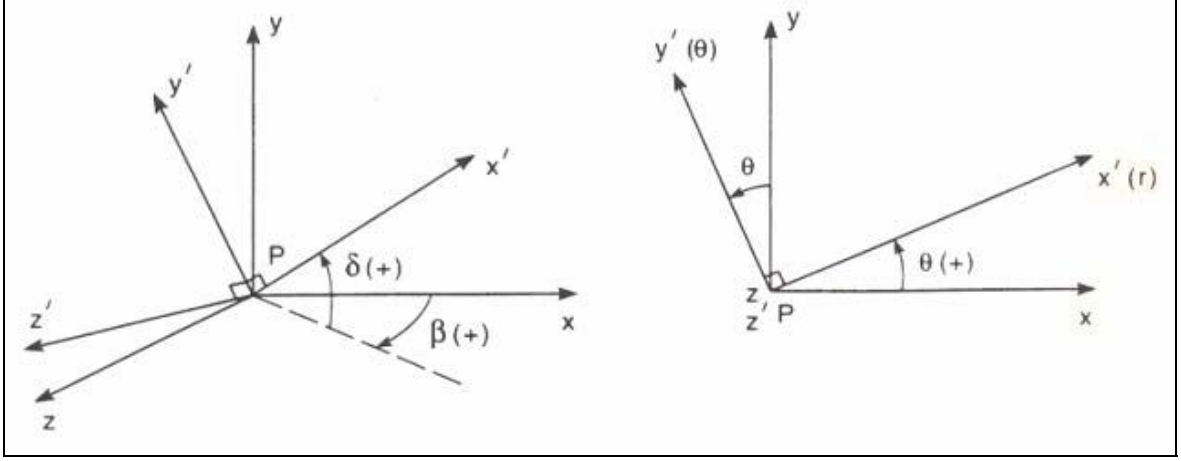


Figure 177 : schéma de passage d'un repère à un autre [Brady & Brown, 2004]

<u>Matrice de passage</u> : $[\sigma]_{XYZ} \rightarrow [\sigma]_{123}$

$$
[T]_{XYZ-123}
\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix}
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}
$$

Matrice d'élasticité A :

$$[A]_{colle}\begin{pmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_c & -\nu_c/E_c & -\nu_c/E_c & 0 & 0 & 0\\ -\nu_c/E_c & 1/E_c & -\nu_c/E_c & 0 & 0 & 0\\ -\nu_c/E_c & -\nu_c/E_c & 1/E_c & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_c)}{E_c} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_c)}{E_c} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_c)}{E_c}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \tau_{23}\\ \tau_{13}\\ \tau_{12}\end{pmatrix}$$

$$[A]_{roche}\begin{pmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{21}/E_2 & 0 & 0 & 0\\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0\\ -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \tau_{23}\\ \tau_{13}\\ \tau_{12}\end{pmatrix}$$

Matrice de passage : $[\varepsilon]_{123} \rightarrow [\varepsilon]_{r\theta z}$

$$[T]_{123-r\theta z}\begin{pmatrix}\varepsilon_{rr}\\ \varepsilon_{\theta\theta}\\ \varepsilon_{zz}\\ \gamma_{\theta z}\\ \gamma_{rz}\\ \gamma_{r\theta}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & \sin 2\theta\\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & -\sin 2\theta\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0\\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0\\ -\sin 2\theta/2 & \sin 2\theta/2 & 0 & 0 & 0 & \cos 2\theta\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{pmatrix}$$

Vecteur de passage : $[\varepsilon]_{r\theta z} \rightarrow [\varepsilon_{li}]$ i=1…12

$$\boxed{{}^{t}(V)_{r\theta z-li}} \qquad [\varepsilon_{li}] = \begin{pmatrix} 0 & \sin^2\psi_i & \cos^2\psi_i & \sin\psi_i\cos\psi_i & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{rr} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{\theta z} \\ \gamma_{rz} \\ \gamma_{r\theta} \end{pmatrix}$$

Cas d'un comportement élastique linéaire isotrope transverse, sans prise en compte de l'epoxy

A notre connaissance, il n'existe pas de formulation théorique générale dans le cas isotrope transverse. Nous nous sommes donc contentés de comparer les résultats numériques obtenus dans le cas d'un comportement isotrope avec ceux obtenues par un comportement isotrope transverse. La comparaison s'est basée sur les déformations orthoradiales calculées le long d'une portion de génératice à la paroi interne de la carotte (Figure 178).

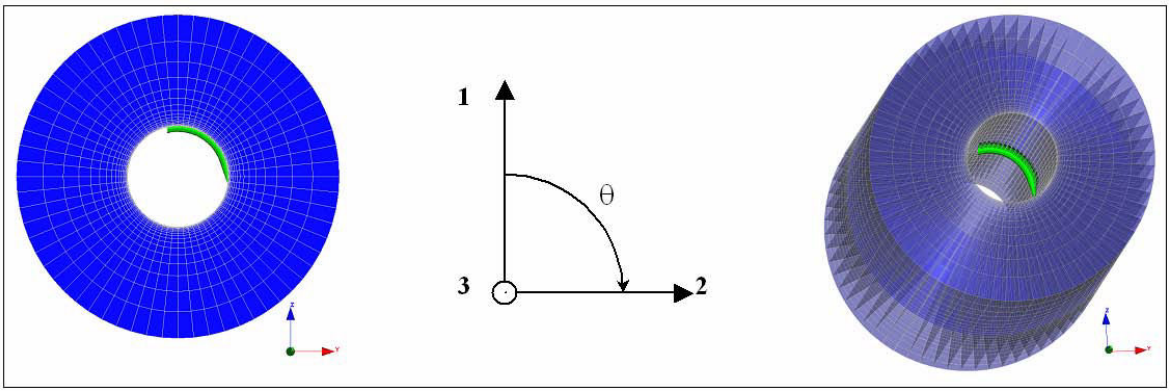


Figure 178 : Ligne de coupe LC représentant les différentes positions des jauges de déformation utilisée pour la détermination des déformations orthoradiales et axial

Nous avons testé différentes orientations du plan d'anisotropie (Figure 179). Les paramètres adoptés pour ces différents cas sont présentés dans le Tableau 35.

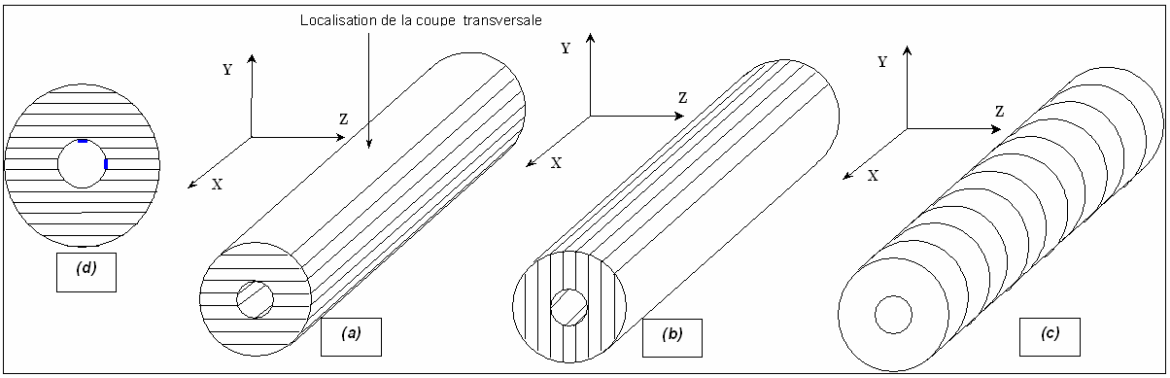


Figure 179 : Différentes orientations de la stratification par rapport à l'axe de la carotte creuse.

	(a)	*(b)*	*(c)*	*iso*
$E_{\perp}$ = 9 GPa	E_y	E_z	E_x	
$E_{//}$ = 24 GPa	E_x	E_y	E_y	E
$\nu_{\perp}$ = 0,2	ν_{yx}	ν_{zx}	ν_{xy}	
$\nu_{//}$ = 0,15	ν_{xz}	ν_{xy}	ν_{yz}	ν
G = 4 GPa	G_{yx}	G_{zx}	G_{xy}	

Tableau 35 : Paramètres utilisés pour la validation du modèle en isotrope transverse pour les différentes orientations du plan de stratification

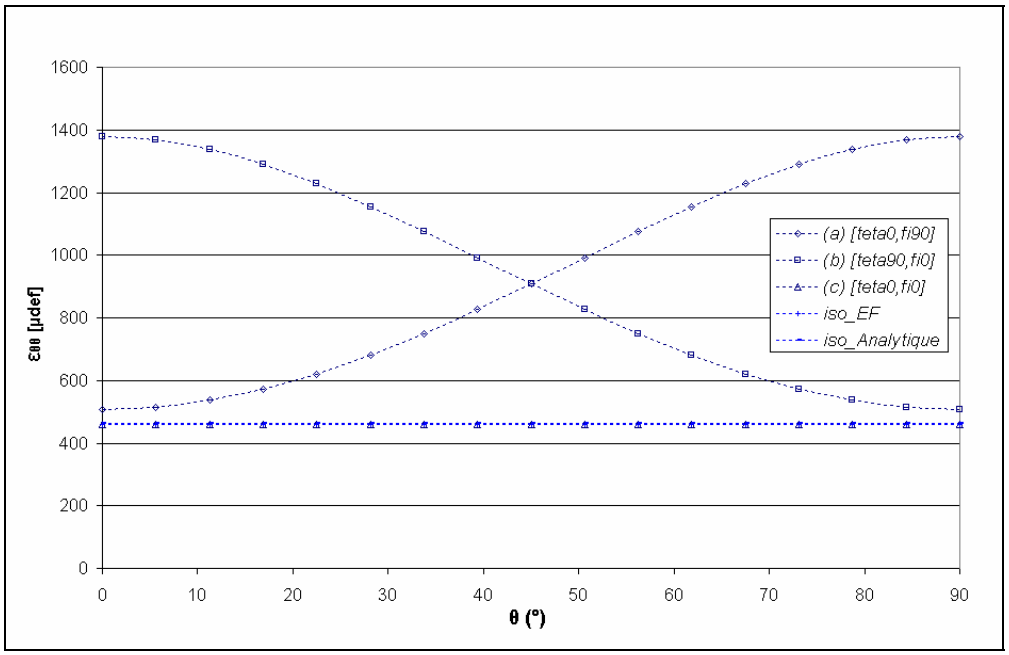


Figure 180 : variations des déformations orthoradiales le long de la coupe LC pour différents cas d'étude

La Figure 180 montre que les résultats du cas (a) sont symétriques à ceux obtenus pour le cas (b). D'autre part, le cas (c) conduit aux mêmes résultats qu'un modèle isotrope.

Prise en compte de l'époxy

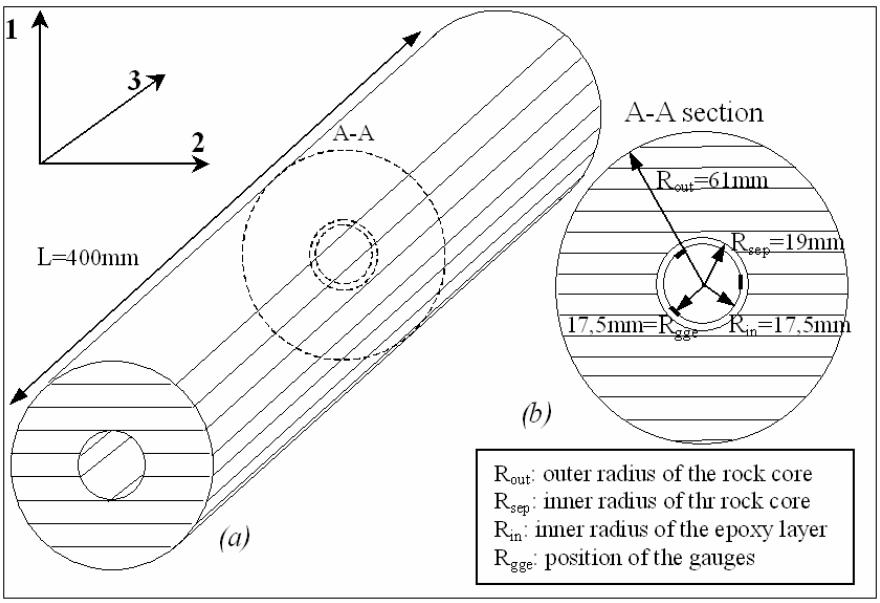


Figure 181 : (a) schéma 3D du modèle avec inclusion, (b) section transversale du modèle en présence des deux corps concentriques : roche – inclusion.

Concernant la vérification du modèle comportant l'inclusion en présence d'une roche isotrope transverse (voir Figure 181), nous avons testé certaines règles mécaniques énoncées par Worotnicki (1993), à savoir :

- Continuité des déplacements ($U_{\theta\theta}$, U_{zz} et U_{rr}) sur l'interface roche- inclusion (voir Figure 182) ;
- Continuité de la contrainte radiale σrr et discontinuité des contraintes orthoradiales et axiale ($\sigma_{\theta\theta}$ et σ_{zz}) sur l'interface roche- inclusion (voir Figure 183)
- Continuité des déformations ($\varepsilon_{\theta\theta}$, ε_{zz} et ε_{rr}) sur l'interface roche- inclusion (voir Figure 184) ;

Dans ce cas le comportement de l'inclusion est élastique linéaire isotrope : E_c = 2600 MPa et v_c = 0,4.

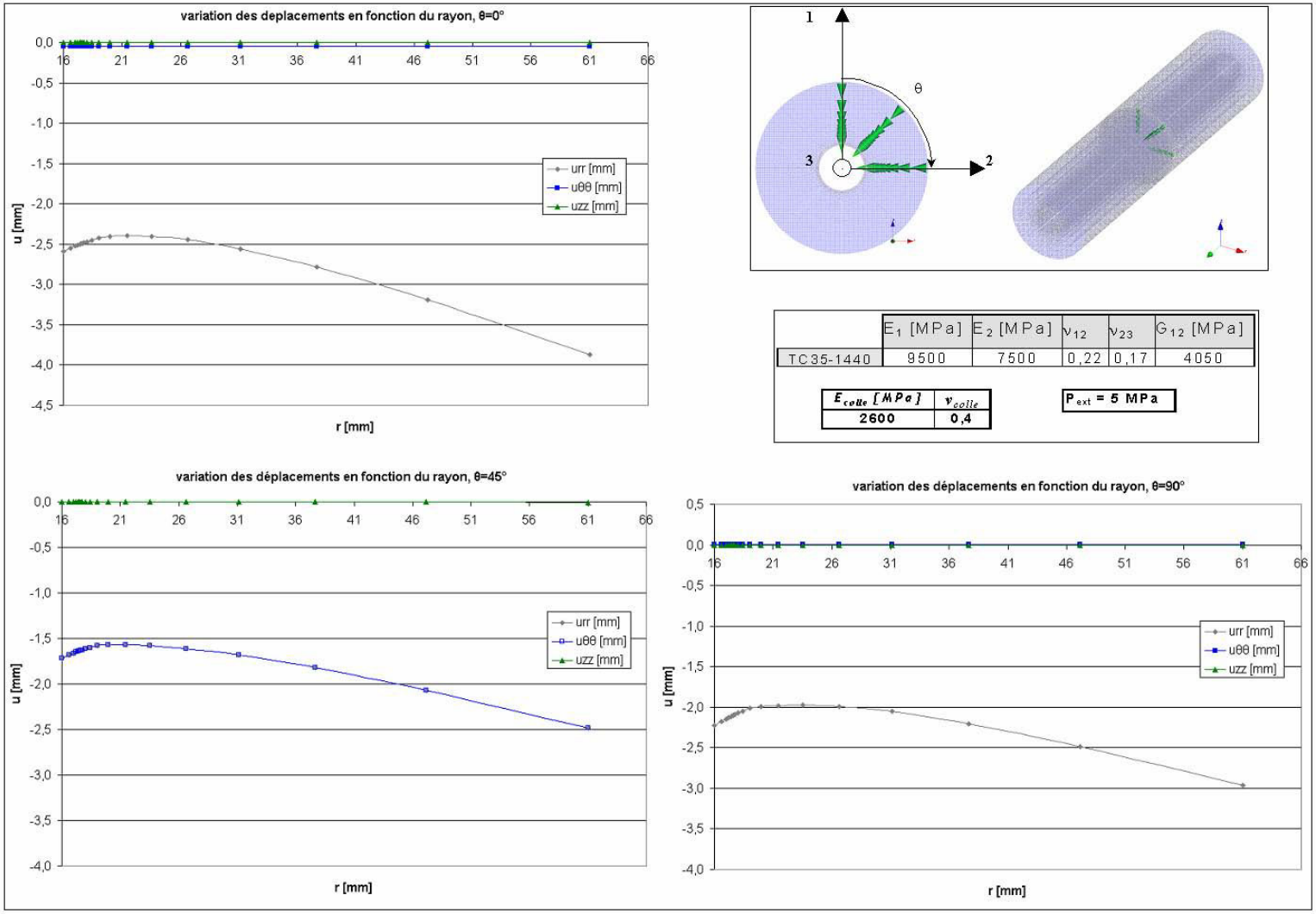


Figure 182 : Variation des deplacement le long de lignes de coupe (θ = 0°, 45° et 90°) prises dans une section transversale, modèle roche anisotrope & inclusion isotrope

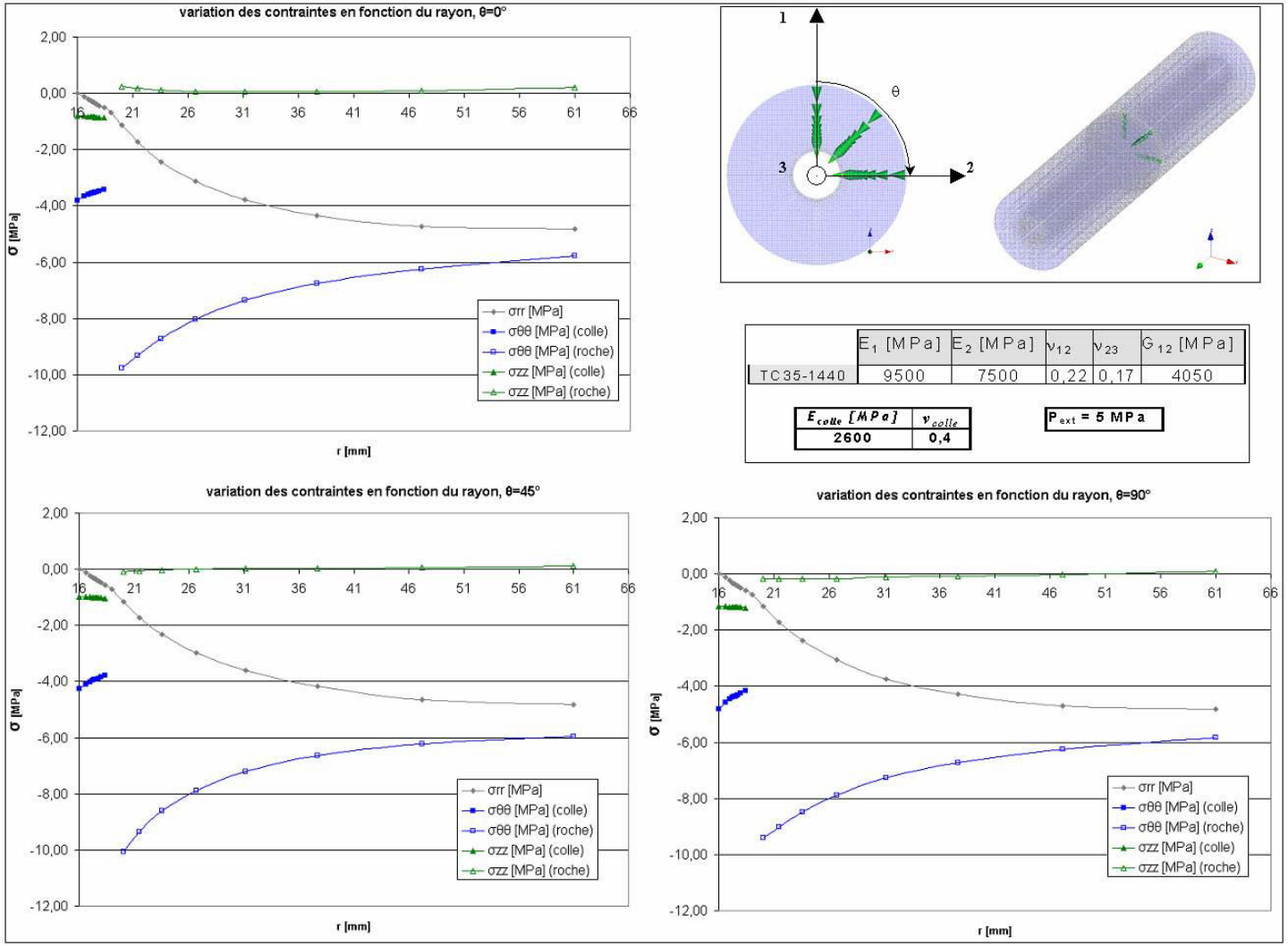


Figure 183 : Variation des déformations le long de lignes de coupe (θ = 0°, 45° et 90°) prises dans une section transversale, modèle roche anisotrope & inclusion isotrope

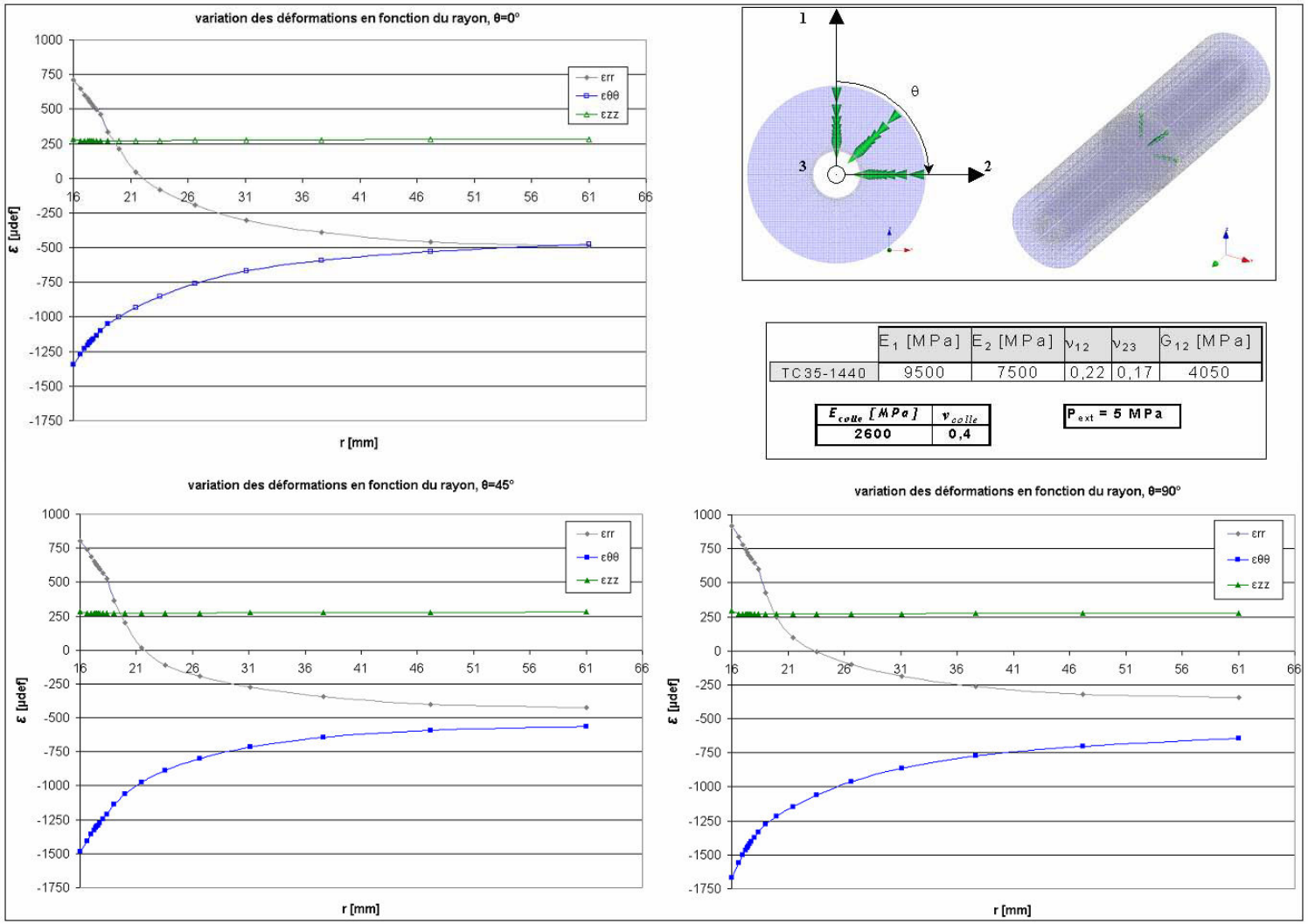


Figure 184 : Variation des déformations le long de lignes de coupe (θ = 0°, 45° et 90°) prises dans une section transversale, modèle roche anisotrope & inclusion isotrope

XXIV. ANNEXE V

ANNEXE V : VALEURS DE DEFORMATIONS OBTENUES A PARTIR DU MODELE NUMERIQUE EN UTILISANT CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DETERMINES A PARTIR DES ESSAIS EN LABORATOIRE (§ 5.1.6)

	$\varepsilon_{\theta\theta}$ (max) *[µdef]*				
	J2 (A90)	*J6 (B90)*	*J8 (C90)*	*J11 (E90)*	*J12 (F90)*
TC35-1440	**-642**	**-1328**	**-1001**	**-641**	**-1328**

	ε_{zz} (max) *[µdef]*	
	J1 (A0)	*J7 (C0)*
TC35-1440	**152**	**152**

	$\varepsilon_{\theta\theta}$ (max) *[µdef]*				
	J2 (A90)	*J6 (B90)*	*J8 (C90)*	*J11 (E90)*	*J12 (F90)*
TC36-1530	**-1313**	**-620**	**-1001**	**-641**	**-1328**

	ε_{zz} (max) *[µdef]*	
	J1 (A0)	*J7 (C0)*
TC36-1530	**152**	**152**

Tableau 36 : Valeurs de déformations obtenues à partir du modèle numérique en utilisant caractéristiques élastiques déterminés à partir des essais en laboratoire (§ 5.1.6)

XXV. ANNEXE W

ANNEXE W : DEFORMATIONS OBTENUES A PARTIR DES MODELES BIAXIAUX SANS EPOXY ET AVEC EPOXY POUR L'ESSAI TC35 ET TC36 EN UTILISANT LES CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DETERMINEES A PARTIR DE LA METHODE NUMERIQUE (TABLEAU 19)

		TC35		
		Mesures	*Ecart*	Model
$\varepsilon_{\theta\theta}$	*J2*	-1124	**0%**	-1127
	J6	-1395	**0%**	-1393
	J8	-1204	**1%**	-1220
	J11	-1412	**2%**	-1382
	J12	-1149	**2%**	-1132
ε_{zz}	*J1*	271	**3%**	262
	J7	252	**4%**	262
Indice d'écart ξ			**4%**	

		TC36		
		Mesures	*Ecart*	Model
$\varepsilon_{\theta\theta}$	*J2*	-1367	**5%**	-1293
	J6	-1009	**3%**	-983
	J8	-1168	**5%**	-1110
	J11	-992	**3%**	-988
	J12	-1287	**1%**	-1305
ε_{zz}	*J1*	252	**3%**	245
	J7	235	**4%**	245
Indice d'écart ξ			**5%**	

Tableau 37 : Comparaison entre les déformations mesurées et celles obtenues par modélisation de l'essai biaxial pour l'essai TC35 et TC36

		TC35-Model		
		Avec époxy	*Ecart*	Sans époxy
$\varepsilon_{\theta\theta}$	*J2*	-1209	**7%**	-1127
	J6	-1494	**7%**	-1393
	J8	-1291	**6%**	-1220
	J11	-1486	**7%**	-1382
	J12	-1215	**7%**	-1132
ε_{zz}	*J1*	264	**1%**	262
	J7	264	**1%**	262

		TC36-Model		
		Avec époxy	*Ecart*	Sans époxy
$\varepsilon_{\theta\theta}$	*J2*	-1395	**7%**	-1293
	J6	-1052	**7%**	-983
	J8	-1193	**7%**	-1110
	J11	-1065	**7%**	-988
	J12	-1382	**6%**	-1305
ε_{zz}	*J1*	247	**1%**	245
	J7	247	**1%**	245

Tableau 38 : Comparaison entre les déformations obtenues par un modèle avec époxy et un modèle sans époxy pour les essais TC35 et TC36

XXVI. ANNEXE X

ANNEXE X : PARAMETRES ELASTIQUES DETERMINES PAR DES ESSAIS BIAXIAUX (DANS LES CONDITIONS DU SITE) ET UNIAXIAUX-TRIAXIAUX (EN LABORATOIRE) DETERMINES LORS DES DIFFERENTES CAMPAGNES D'ESSAIS GEOMECANIQUES (ESSAIS DE SURCAROTTAGES ET BIAXIAUX) MENEES PAR L'INERIS ET D'AUTRES INSTITUTS A TRAVERS LE MONDE, EXISTANTES DANS LA LITTERATURE.

Tableau 39 : Paramètres élastiques déterminés par des essais biaxiaux (dans les conditions du site) et uniaxiaux-triaxiaux (en laboratoire) déterminés lors des différentes campagnes d'essais géomécaniques (essais de surcarottages et biaxiaux) menées par l'INERIS (tableau 1) et d'autres instituts à travers le monde, existantes dans la littérature (tableau 2).

Référence	Année	Matériaux	Essai de caractérisation	
			biaxial	Uniaxial/Triaxial
Etude méthodologique en milieu anisotrope Adaptation des méthodes de mesures des contraintes naturelles : réalisation d'une campagne de mesures	1991	schiste	E_1 E_2 = 118 GPa ν_{12} = 0,47 ν_{23} G_{12}	E_1 = 39 GPa E_2 = 111 GPa ν_{12} = 0,17 ν_{23} = 0,14 G_{12} = 7 GPa
Mesure de contraintes naturelles dans des marnes par surcarottage en gros diamètre	1993	marne	E = 15 GPa $\nu = 0,3$	- -
Mont Terri Undercoring	1997	Argile (Sandy facies)	– – – – –	E_1 = 4,1 GPa E_2 = 12,2 GPa ν_{12} = 0,17 ν_{23} = 0,13 G_{12} = 1,2 GPa
Mesures de contraintes naturelles à l'unité de l'exploitation. La Houve Secteur 7.2.2 "HBL"	2001	grès de Merlebach	- -	E = 36 GPa $\nu = 0,18$
Mesures de contraintes réalisées à l'U.E, Merlebach, dans la voie de base du panneau Dora 1250à la cote 740 "HBL"	2002	grès de Merlebach	E = 30,6 GPa $\nu = 0,18$	E = 51,3 GPa $\nu = 0,21$
Mesures de contraintes sur le site de Gardanne « HBCM»	2002	calcaire	E = 24,4 GPa $\nu = 0,25$	E = 68,5 GPa $\nu = 0,3$
Campagne de mesures de contraintes dans le laboratoire du Mont Terri par surcarottage en utilisant la cellule « CSIRO »	2004	Argile (Shady facies)	(pas possible) - - - -	E_1 = 9 GPa E_2 = 22,5 GPa ν_{12} = 0,15 ν_{23} = 0,14 G_{12} = 2,1 GPa
Mesures de contraintes sur le site de Valabre Clément C. [2008]	2008	gneiss de Valabre	E_{min} = 18 - 23 Gpa E_{max} = 33 - 41 GPa ν_{max} = 0,06 - 0,19 ν_{min} = 0,05 - 0,06 -	E_1 = 32 - 48 GPa E_2 = 56 - 60 GPa ν_{12} = 0,12 - 0,17 ν_{23} = 0,09 - 0,15 -

Titre	Auteurs	Année	Cellule	Matériaux	Essai de caractérisation	
					biaxial	Uniaxial/Triaxial
Udapting the use of the CCBO cell in Japan : overcoring case studies	Y Obara K. Sugawara	2003	CCBO[1]	Calcaire	E = 50 - 63 GPa $\nu = 0{,}28$	- -
Quality control of overcoring stress measurement data	M. Hakala J.A. Hudson R. Christiansson	2003	Borre Probe	Diorite	E = 63 - 92 GPa $\nu = 0{,}26$ - $0{,}4$ E = 54 - 66 GPa $\nu = 0{,}17$ - $0{,}24$	- -
In situ rock stress determination in deep boreholes at the Underfround Research Laboratory	P.M. Thompson N.A. Chandler	2004	DDGS[2]	Granite	E = 17 - 26 GPa $\nu = 0{,}26$	- -
New developments in the Integrated Stress Determination Method and their application to rock stress data at the Aspö HRL, Sweden	D. Ask	2005	CSIRO	Granite	E = 61,5 GPa $\nu = 0{,}26$	E = 75 GPa $\nu = 0{,}23$
Stress measurements in deep boreholes using the Borre (SSPB) probe (exp. Europe, Asia, North America)	J. Sjöberg H. Klasson	2003	Bore Probe SSPB[3]		E = GPa $\nu =$	- -
ISRM Suggested Methods for rock stress estimation Part 2 : overcoring methods	J. Sjöberg R. Christiansson J.A. Hudson	2003	Bore Probe		E = GPa $\nu =$	- -

[1]Compact Conical Ended Borehole Overcoring

[2]Deep Doorstopper Gauge system

[3]Swedish State Power Board

XXVII. ANNEXE Y

ANNEXE Y : ESSAIS UNIAXIAUX ET TRIAXIAUX REALISE EN LABORATOIRE SUR EPROUVETTES EN CIMENT – CAMPAGNE 2010

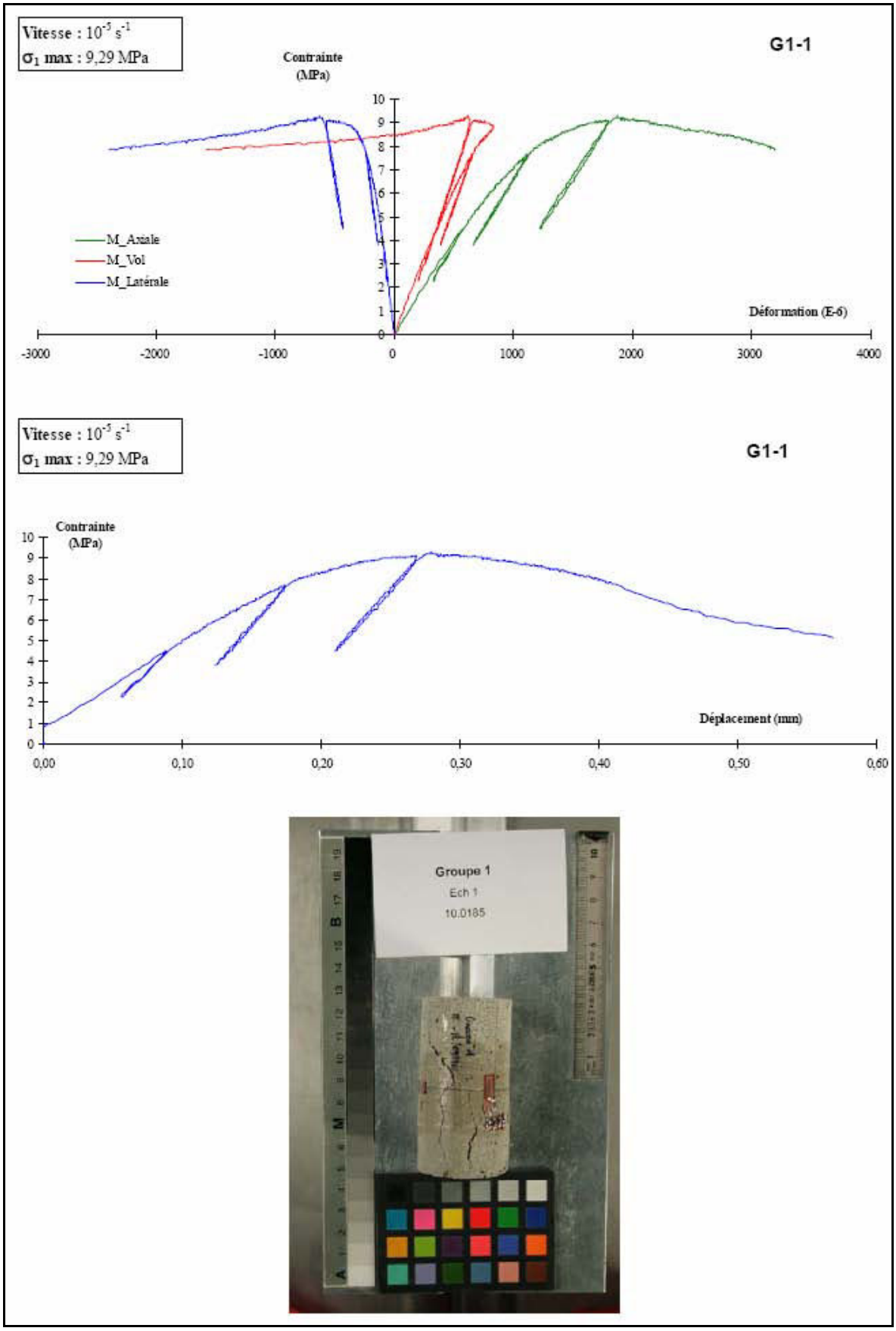


Figure 185 : Essai uniaxail G1-1 – Eprouvette en ciment – Campagne 2010

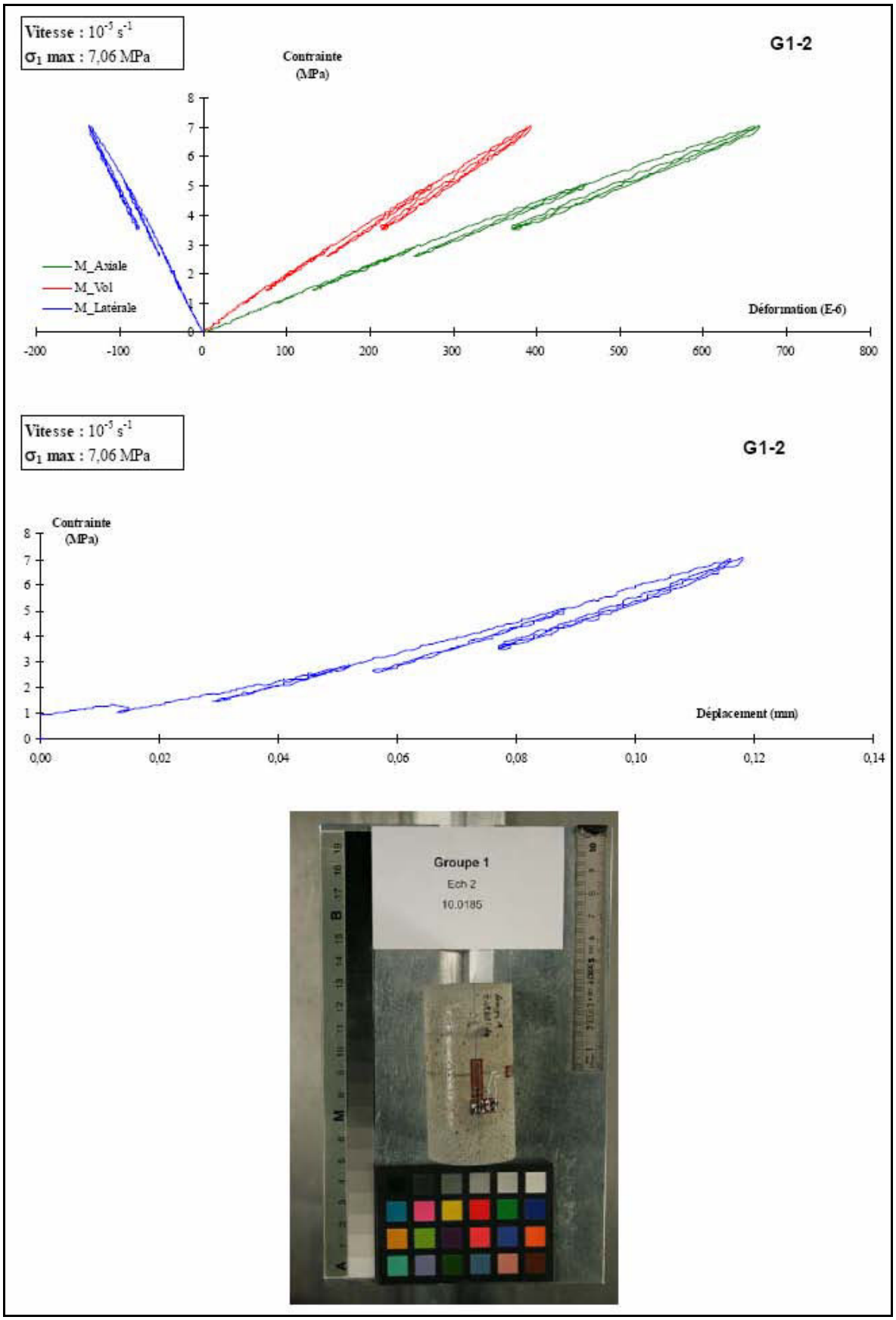


Figure 186 : Essai uniaxail G1-2 – Eprouvette en ciment – Campagne 2010

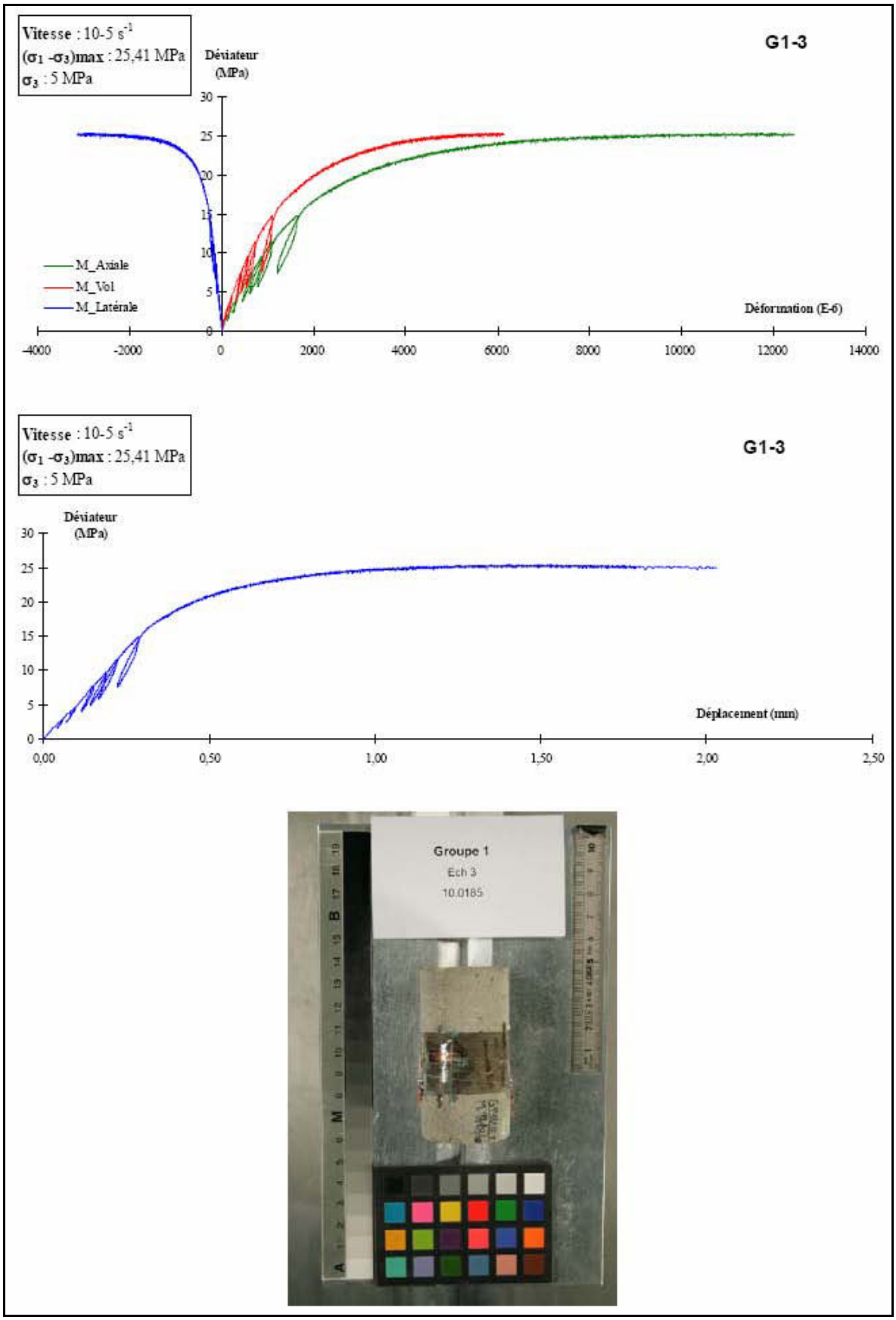


Figure 187 : Essai triaxial G1-3 – Eprouvette en ciment – Campagne 2010

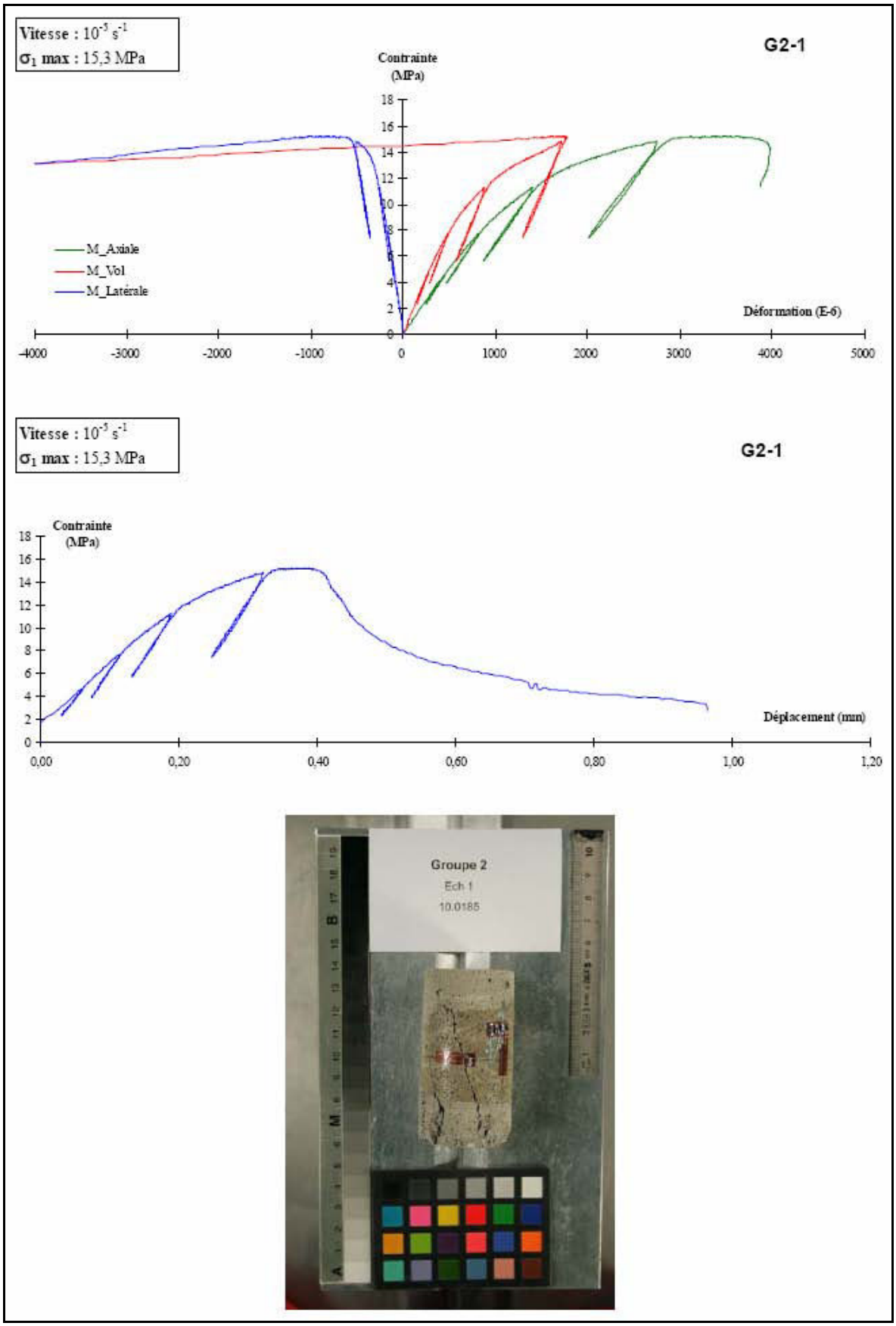


Figure 188 : Essai uniaxail G2-1 – Eprouvette en ciment – Campagne 2010

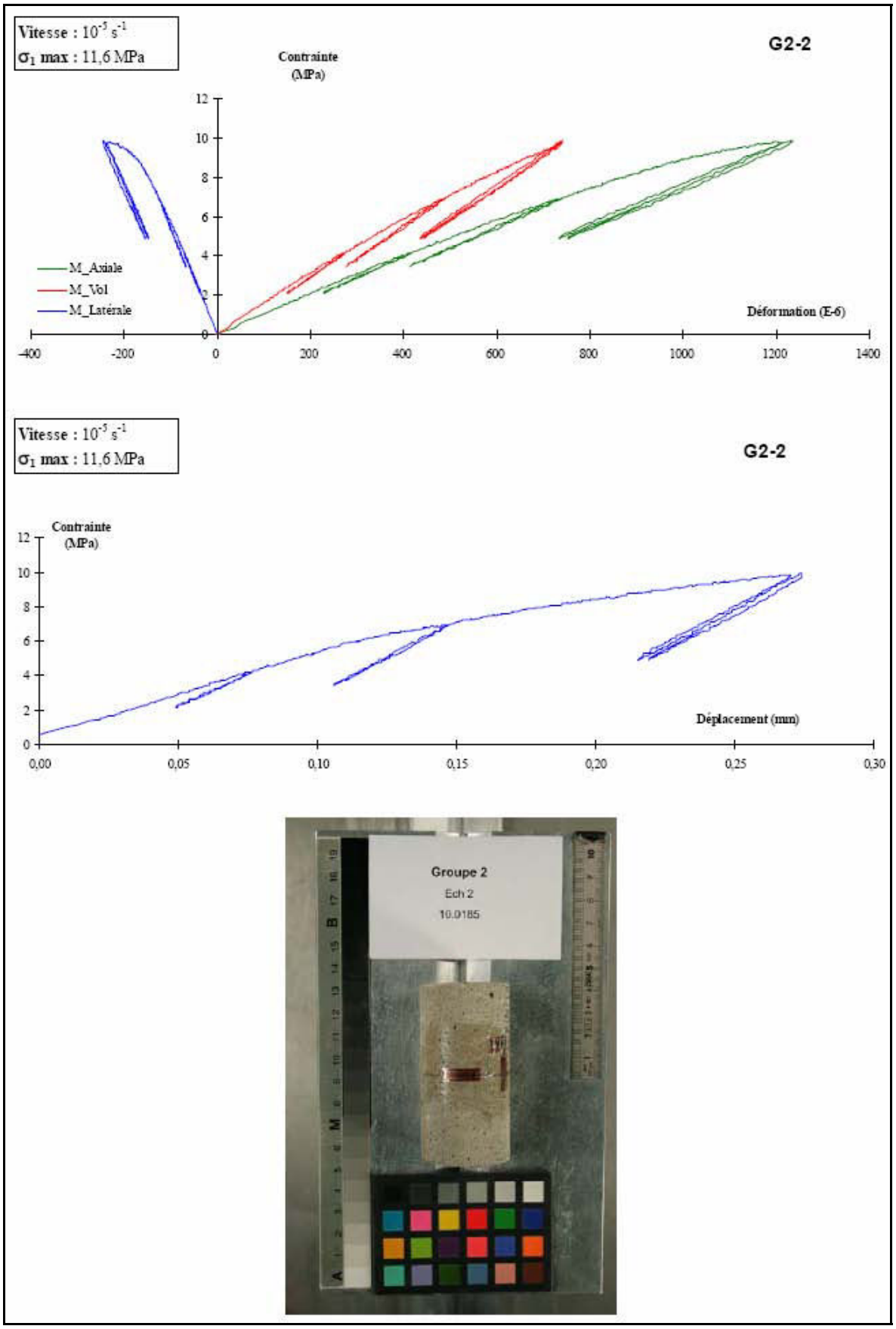


Figure 189 : Essai uniaxail G2-2 – Eprouvette en ciment – Campagne 2010

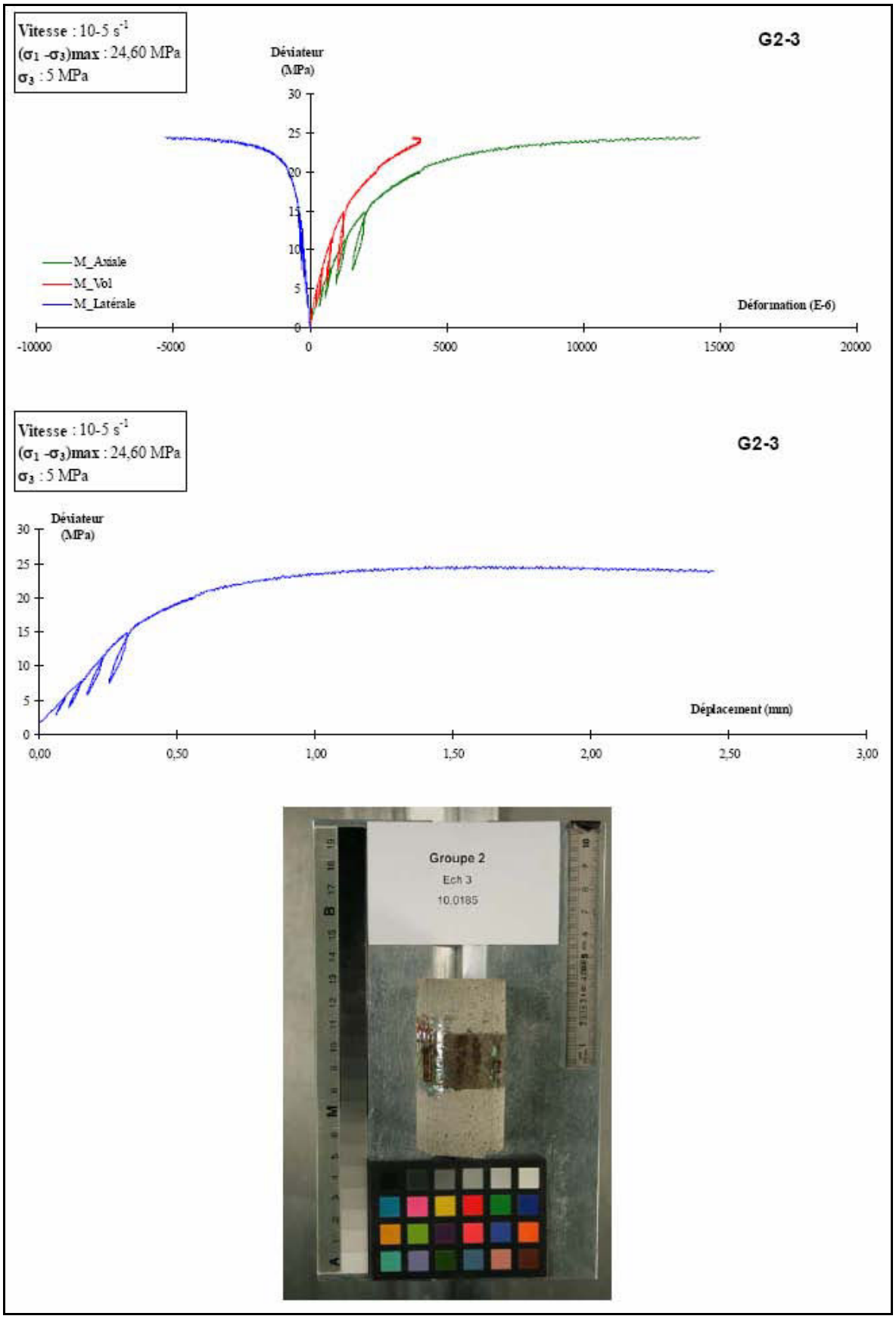


Figure 190 : Essai triaxial G2-3 – Eprouvette en ciment – Campagne 2010

XXVIII. ANNEXE Z-1

ANNEXE Z-1 : CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DU CIMENT DETERMINES POUR CHAQUE ESSAI UNIAXIAL ET TRIAXIAL REALISE EN LABORATOIRE SUR EPROUVETTES – CAMPAGNE DE 2010

Groupe	Echantillon	Référence	Cycle [MPa]	E [GPa]	ν
Mélange 1	Echantillon 1 (essai pas très satisfaisant)	G1-1	5	8,60	0,19
			8	8,10	0,21
			9	7,80	0,25
	Echantillon 2	G1-2	3	12,70	0,21
			5	11,85	0,20
			7	11,50	0,20
Mélange 2	Echantillon 1	G2-1	5	11,21	0,22
			8	10,68	0,21
			11	10,19	0,21
			15	9,35	0,22
	Echantillon 2	G2-2	4	10,70	0,18
			7	10,50	0,17
			10	9,90	0,19
		Valeur moyenne		10,68 ± 1,48	0,20 ± 0,02

Tableau 40 : Paramètres élastiques du ciment déterminés à partir d'essais uniaxiaux en laboratoire sur éprouvettes

Groupe	Référence	Pc [MPa]	Déviateur [MPa]	E [GPa]	ν
Mélange 1 Echantillon 3	G1-3	5	3	22,20	0,21
			5	18,45	0,21
			8	17,00	0,25
			10	16,23	0,21
			12	16,50	0,20
			15	15,70	0,20
Mélange 2 Echantillon 3	G2-3	5	6	17,6	0,22
			8	15,20	0,21
			11	14,70	0,21
			15	15,20	0,22
		Valeur moyenne		16,29 ± 1,23	0,21 ± 0,01

Tableau 41 : Paramètres élastiques du ciment déterminés à partir d'essais triaxiaux en laboratoire sur éprouvettes

XXIX. ANNEXE Z-2

ANNEXE Z-2 : RESEAU D'ENDOMMAGEMENT POUVANT ETRE REPERES SUR LA PAROI INTERNE DE CAROTTE CREUSE UTILISEE LORS DE L'ESSAI BIAXIAL

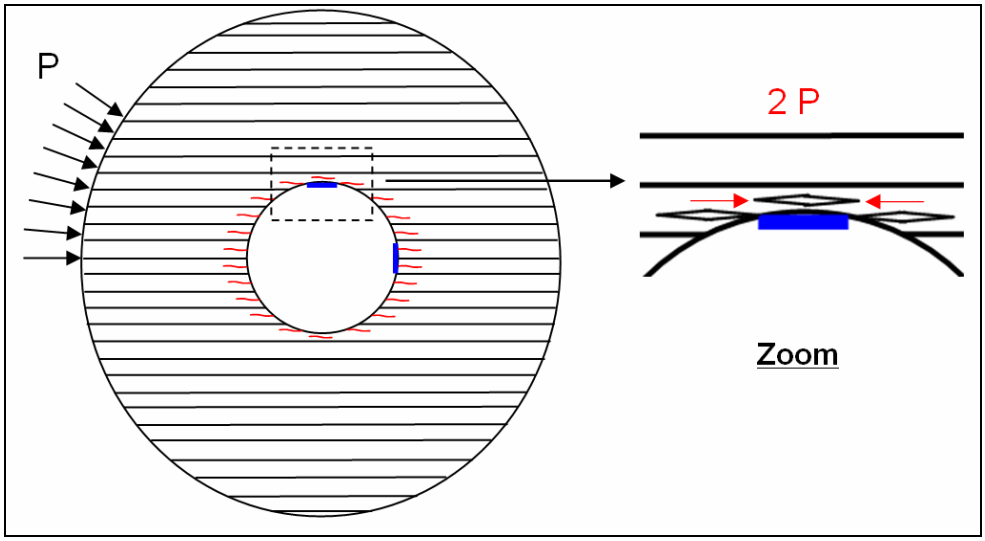


Figure 191 : réseau d'endommagement horizontal

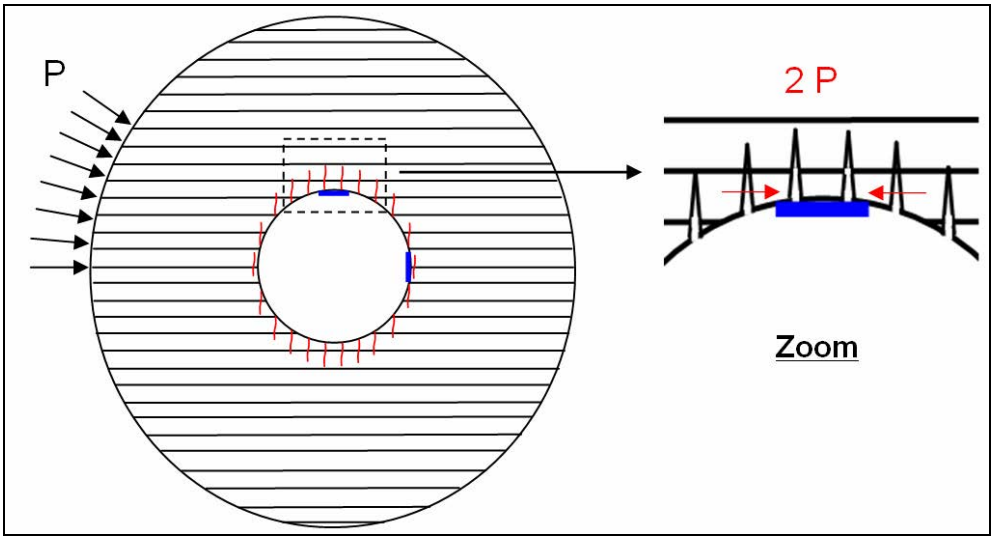


Figure 192 : réseau d'endommagement vertical

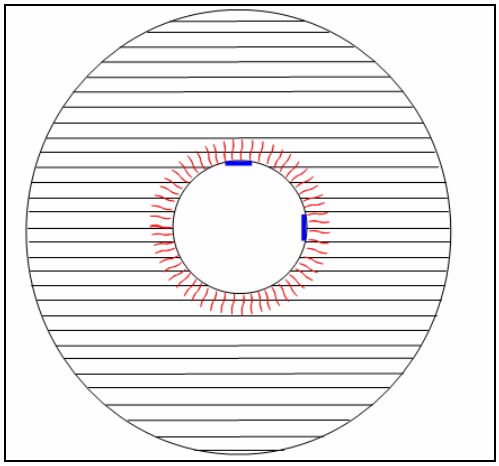


Figure 193 : réseau d'endommagement en étoile

INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :
Monsieur Denis FABRE, Professeur, CNAM, Paris

Monsieur Frédéric PELLET, Professeur, INSA, LGCIE, Villeurbanne

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur Abdelmonem BEN OUANAS

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANDŒUVRE CEDEX

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, une thèse intitulée :

"Interprétation de mesures de déformation en forage en terrain anisotrope : retour d'expérience de l'utilisation de cellules CSIRO dans l'argilite de Tournemire (Aveyron)"

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : **« Mécanique - Génie Civil »**

Fait à Vandoeuvre, le 16 novembre 2010
Le Président de l'I.N.P.L.,
F. LAURENT

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE - NANCY

TEL. 33/03.83.59.59.59
FAX. 33/03.83.59.59.55

Interprétation de mesures de déformation en forage en terrain anisotrope : retour d'expérience de l'utilisation de cellules CSIRO dans l'argilite de Tournemire (Aveyron)

Résumé : En géomécanique, la caractérisation de l'état de contrainte et de la rhéologie d'un massif rocheux peut être obtenue en mesurant la réponse en déformation du terrain sous l'effet d'une sollicitation connue. Une méthode parmi d'autres consiste à recourir pour cela à une cellule de mesure intégrée (comportant des capteurs de déformation orientés selon différentes directions) installée dans un forage et rendue solidaire du massif par l'intermédiaire d'une colle époxy. Ce principe de mesure est utilisé, notamment, pour déterminer l'état de contraintes *in situ* par la méthode dite de « surcarottage » et les caractéristiques élastiques de la roche à partir de l'essai « biaxial ».

Entre novembre 2005 et janvier 2006, une campagne d'essais géomécaniques de ce type a été menée dans l'argilite de Tournemire (Aveyron, France), à l'aide des cellules CSIRO. Les mesures de déformation obtenues ont révélé des phénomènes inhabituels qui ont rendu délicate la détermination des caractéristiques élastiques anisotropes de la roche et impossible l'accès aux contraintes du site.La présente thèse a pour objectif de contribuer, par la recherche d'explications à l'origine de ces phénomènes, d'une part, à l'amélioration de la connaissance du comportement de l'argilite de Tournemire et, d'autre part, à l'amélioration du protocole de mesure et d'interprétation de déformations obtenues par cellules CSIRO.Notre démarche consiste, dans un premier temps, à émettre un certain nombre d'hypothèses explicatives des phénomènes observés par la recherche bibliographique. Dans un deuxième temps, nous testons ces hypothèses à travers la modélisation analytique et numérique des essais de surcarottage et biaxiaux, puis à travers la réalisation de nouvelles expérimentations *in situ* et en laboratoire sur l'argilite, mais aussi sur des matériaux-tests (ciment, échantillon de colle).

Nous concluons que les phénomènes inhabituels observés résultent, pour l'essentiel, des conditions de mise en œuvre *in situ* des cellules CSIRO. En particulier, nous mettons l'accent sur les artéfacts induits par le comportement visco-plastique de la colle époxy lorsqu'elle n'est pas parfaitement polymérisée. Le rôle de l'endommagement de la roche généré par les opérations de forage est également discuté. Nous en tirons des recommandations pratiques pour la réalisation de nouveaux essais dans des conditions similaires.

Mots clefs : mesures de déformation, caractéristiques élastiques anisotropes, état de contrainte, argilite de Tournemire, modélisation, colle époxy, endommagement.

Interpretation of the hole's strain measurements in anisotropic field: feedback from the use of CISRO cells in the Tournemire argillite (Aveyron).

Abstract: In Geomechanics, determining the state of stress and the rheology of rock massive can be obtained by measuring the strain response of the ground under the effect of a known stress. A method among others is to use a cell integrated (with strain gauges oriented in different directions) installed in a borehole and secured to the mass through an epoxy glue. This measurement is used, notably, to determine the stress state in situ by the « overcoring » method and the elastic parameters of the rock from the « biaxial » test.

Between November 2005 and January 2006, a geomechanical testing campaign was conducted in the argillaceous formation of the Tournemire experimental site (Aveyron, France) using CSIRO Hi cells. The strain measurements obtained during overcoring and biaxial tests, have shown unusual phenomena, which have made difficult the determination of anisotropic elastic parameters of the rock and the access to the site stress. Therefore, through researches for explanations of the origin of these phenomena, this thesis aims to improve and to contribute to the understanding of argillite Tournemire's behaviour and to upgrade the measurement protocol as well as the interpretation of cells CSIRO's strain.Our approach is, firstly, to issue a number of hypotheses to explain certain, phenomena observed in literature. In a second step, we test these hypotheses through analytical and numerical modelling of the biaxial and overcoring tests then through the realization of new experiments in situ within laboratory on argillite, and also on materials tests (cement, sample of glue).

We conclude that the unusual phenomena observed are essentially the result of the conditions for implementing in situ CSIRO's cell. In particular, we focus on the artefacts induced by the visco-plastic behaviour of the epoxy glue when it is incompletely polymerised. The role of damage on the rock generated by drilling operations is also discussed. We draw some practical recommendations for implementing new tests under similar conditions.

Keywords: strain measurement, anisotropic elastic parameters, state of stress, Tournemire argillite, modelling, epoxy glue, damage.