2 2 AVR. 1996

MESURES DES CONTRAINTES IN-SITU
À LA MINE LOUVICOURT
PROJET IRSST

Robert Corthésy, ing., Ph.D.
Maria Helena Leite, Ph.D.,
Denis E. Gill, ing., Ph.D.

gratuit

EPM/RT-96/07

Département de génie minéral
Département de génie civil
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Campus de l'Université de Montréal
Case postale 6079, Succursale A
Montréal (Québec) H3C 3A7

Tous droits réservés. On ne peut reproduire ni diffuser aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme que ce soit, sans avoir au préalable l'autorisation écrite des auteurs.

Dépot légal, mars 1996
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada

Pour se procurer une copie de ce document, s'adresser:

Les Éditions de l'École Polytechnique
École Polytechnique
Case postale 6079, Succursale A
Montréal (Québec) H3C 3A7
Téléphone: (514) 340-4473
Télécopie: (514) 340-3734

Compter 0,10 $ par page et ajouter 3,00 $ pour la couverture, les frais de poste et la manutention. Regler en dollars canadiens par chèque ou mandat-poste au nom de l'École Polytechnique.

Nous n'honorerons que les commandes accompagnées d'un paiement, sauf s'il y a entente préalable dans le cas d'établissements d'enseignement, de sociétés ou d'organismes canadiens.

SOMMAIRE

Ce rapport présente les résultats de mesures de contraintes qui ont été exécutées du 24 au 29 mai 1995 à la mine Louvicourt.

Ces mesures ont été réalisées dans le cadre d'un projet de recherche de l'IRSST intitulé ***Élaboration d'un modèle de prédiction des contraintes in-situ dans le nord-ouest québécois,*** mené à l'École Polytechnique par les auteurs de ce rapport.

La technique de mesure utilisée dans le cadre du projet est la technique du "doorstopper" modifié. La description de la technique est présentée, suivie de la méthode de calcul des contraintes, du résultat de ces calculs et des hypothèses qui s'y rattachent.

Dans les annexes, sont présentées les données de terrain et de laboratoire sous forme de graphiques. Les contraintes partielles 2D requises pour le calcul des contraintes 3D sont aussi données en annexe.

ABSTRACT

This report shows the results of a stress measurement campaign performed at the Louvicourt mine from May 24 to 29 1995.

These measurements are part of an IRSST research project undertaken at École Polytechnique. The title of the project is ***Élaboration d'un modèle de prédiction des contraintes in-situ dans le nord-ouest québécois.***

The stress measurement technique used in the project is the modified doorstopper technique. The description of the technique is presented, followed by the stress calculation method, the calculated 3D stress tensor and the hypotheses on which this calculation is based.

In appendix, the field and laboratory data are given in graph format. The 2D partial stress tensors used to calculate the 3D stress tensor are also presented in appendix.

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire iii

Abstract iv

Table des matières v

Liste des tableaux vi

Liste des annexes vii

1. Introduction 1

2. Description de la méthode de mesure utilisée 1

3. Hypothèses et méthode de calcul 2

4. Résultats 4

    4.1 Tenseur bidimensionnel 4

    4.2 Tenseur tridimensionnel 5

5. Remarques 8

6. Références 9

ANNEXE A - Méthode de calcul des contraintes avec le doorstopper modifié 10

ANNEXE B - Données de terrain 19

ANNEXE C - Rechargements au laboratoire 23

ANNEXE D - Contraintes partielles 2D 30

ANNEXE E - Devis technique 34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Orientation des sondages

Tableau 2 Contraintes naturelles tridimensionnelles

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A - Méthode de calcul des contraintes avec le doorstopper modifié

ANNEXE B - Données de terrain

ANNEXE C - Rechargements au laboratoire

ANNEXE D - Contraintes partielles 2D

ANNEXE E - Devis technique

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats d'une campagne de mesure de contraintes naturelles menée à la mine Louvicourt près deVal-D'Or. Les mesures ont été faites dans une galerie d'exploration à une profondeur de 855 m du 24 au 29 mai 1995.

Ces mesures ont été réalisées dans le cadre d'un projet de recherche de l'IRSST intitulé, ***Élaboration d'un modèle de prédiction des contraintes in-situ dans le nord-ouest québécois*** et mené à l'École Polytechnique par les trois auteurs de ce rapport.

La localisation des forages a été proposée par le personnel de la mine et l'orientation des forages a été fixée par le personnel de l'École Polytechnique. La profondeur des forages a été choisie de façon à ce que l'excavation affecte au minimum la grandeur et l'orientation des contraintes mesurées. Il était convenu que les coûts des forage étaient assumés par la mine Louvicourt alors que la réalisation des mesures ainsi que leur interprétation étaient la responsabilité de l'École Polytechnique.

2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE UTILISÉE

La méthode du "doorstopper" consiste à coller au centre du fond d'un forage de calibre NX, une cellule (de diamètre inférieur à celui de la carotte récupérée du forage) comportant une rosette à quatre jauges. C'est cette cellule que l'on appelle "doorstopper". La

prolongation du forage permet de réaliser la saignée, libérant ainsi les contraintes agissant sous les jauges. Les déformations récupérées, mesurées et enregistrées suite à cette saignée, sont utilisées dans le calcul des contraintes préalables au forage initial.

Les cellules utilisées dans la présente campagne de mesure sont des cellules conventionnelles, modifiées afin de permettre la mesure en continu des déformations récupérées en cours de saignée, la lecture d'une résistance étalon de 120 ohms (jauge de référence) ainsi que celle de la température en fond de trou (Gill et al., 1987; Corthésy et Gill, 1990). Ces modifications ont été réalisées au Laboratoire de mécanique des roches de l'École Polytechnique. Ces cellules modifiées sont montées directement sur un système d'acquisition de donnée appelé MAI pour *Module Acquisiteur Intelligent*, développé à l'École Polytechnique par les auteurs de ce rapport. Ce module permet la conduite des mesures sans l'encombrement d'un câble conducteur passant dans le train de tige. Le devis technique à l'annexe E contient plus de détails sur la conduite de mesures de contraintes avec cette méthode.

3. HYPOTHÈSES ET MÉTHODE DE CALCUL

Le passage des déformations récupérées lors de la mesure aux contraintes requiert des hypothèses sur les champs de déformations et de contraintes au point de mesure ainsi que sur les relations contrainte-déformation en ce même point. La méthode d'interprétation utilisée

minimise le nombre d'hypothèses simplificatrices habituellement émises avec la méthode d'interprétation standard (isotropie et homogénéité des déformabilités) et nous semble plus appropriée pour le matériau impliqué dans les mesures. Néanmoins, l'interprétation standard peut fort bien être utilisée avec les mêmes données brutes. Tous les détails relatifs aux hypothèses et à la méthode de calcul sont présentés à l'annexe A.

Les carottes de roche récupérées suite aux saignées ont été rechargées au laboratoire. Ces rechargements ont été faits biaxialement et de façon isotrope, perpendiculairement à l'axe des carottes, dans une cellule triaxiale de type Hoek suivant une méthode proposée par Corthésy (1982). Ils permettent de vérifier la réponse des jauges et de calculer les paramètres élastiques reliant les déformations aux contraintes. Ces rechargements ont permis de confirmer que certaines hypothèses à la base des calculs étaient vérifiées. En effet, on a déduit de ces essais sur le site, que la roche sur laquelle les mesures ont été faites est élastique et linéaire. On a déduit aussi de ces essais, que la roche est anisotrope. Le modèle de calcul permet de prendre en ligne de compte les différentes déformabilités de la roche sous les jauges du "doorstopper". L'annexe D contient les résultats de ces rechargements. Ils sont présentés sous forme de graphiques. Le coefficient de Poisson pour chacune des carottes à été obtenu d'essais de compression diamétrale réalisés sur les mêmes carottes après le rechargement biaxial. Les résultats de ces essais sont aussi présentés à l'annexe D sous forme de graphiques.

4. RÉSULTATS

4.1 Tenseur bidimensionnel

L'annexe B rapporte les déformations récupérées lors des saignées sous forme de graphiques. L'examen des graphiques obtenus des mesures de terrain constitue une première évaluation de la qualité de ces dernières. Il ressort de ces graphiques que les mesures dans l'ensemble des trous montrent une très bonne qualité et qu'un bon niveau de confiance peut leur être accordé. De plus, les invariants de déformation permettent une deuxième évaluation de la qualité des mesures. Pour l'ensemble des trous, les invariants montrent un très bon comportement qui comfirme la grande qualité des mesures.

En faisant intervenir les déformabilités déduites des graphiques de l'annexe C, les contraintes calculées à partir de ces déformations récupérées constituent les tableaux de l'annexe D. L'orientation des jauges en fonction du numéro qui leur est attribué dans le présent rapport est la suivante.

Jauge 1 = jauge 0° (jauge horizontale et axe x)

Jauge 2 = jauge 90° (jauge verticale et axe y)

Jauge 3 = jauge 45° (sens trigonométrique)

Jauge 4 = jauge 135° (sens trigonométrique)

Les tableaux de résultats (annexe D) présentent, pour chaque point de mesure les paramètres élastiques calculés, le rapport d'anisotropie (E1 / E2), l'orientation de l'axe d'anisotropie par rapport à la jauge 1 du "doorstopper", les écarts entre les invariants de déformation du rechargement exprimés en pourcentage, les déformations récupérées suite à la saignée, les contraintes calculées dans le système de référence des jauges (référentiel x'y'), les contraintes principales secondaires et leur orientation par rapport à la jauge 1.

4.2 Tenseur tridimensionnel

Contrairement à ce qui est généralement énoncé, les résultats d'une mesure au doorstopper (section 4.1) pris seuls, ne permettent pas de déterminer les composantes du tenseur de contraintes puisque ce calcul fait intervenir 3 équations pour 4 inconnues. Pour obtenir toutes les composantes du tenseur de contrainte 3D, il est nécessaire de combiner au moins une mesure par forage effectuée dans au moins trois forages d'orientations différentes dans un volume où le tenseur de contrainte peut être considéré constant d'un point à l'autre.

Pour combiner les mesures, il faut les ramener dans un même référentiel NEV. Ce système est habituellement défini par rapport aux points cardinaux et la verticale. Les axes N et E sont horizontaux et pointent respectivement vers le nord et l'est. L'axe V est vertical et pointe vers le haut.

Les trois trous de forage sont reliés géométriquement à ce système de référence. Le

tableau 1 rapporte l'orientation des trois sondages.

Tableau 1 - Orientation des forages

Sondage	Azimut	Plongée (positive vers le haut)
No 1	315°	8°
No 2	270°	6°
No 3	225°	6°

Au tableau 2 sont présentés les résultats des interprétations triaxiales. Les six composantes du tenseur de contrainte sont données par rapport au référentiel NEV (tel que défini précédemment). Les trois contraintes principales et leurs cosinus directeurs par rapport au système NEV sont aussi donnés.

La valeur identifiée *ERREUR STANDARD SUR LA RÉGRESSION* est une indication de l'ajustement des mesures ponctuelles (dans chaque trou) au tenseur de contrainte tridimensionnel supposé homogène dans le volume occupé par les trois mesures. Il ne s'agit en aucun cas d'un indicateur de la qualité des mesures, cette qualité ne pouvant être évaluée qu'à la lumière des courbes de récupération. Le calcul de l'erreur standard sur la régression est détaillé à l'annexe A.

Le tenseur de contraintes 3D donné au tableau suivant a été calculé en utilisant des mesures qui présentent des critères de qualité élevés.

Tableau 2 : Contraintes naturelles tridimensionnelles

ERREUR STANDARD SUR LA REGRESSION = 3.185 MPa

CONTRAINTES DANS LE SYSTEME N-E-V

Sigma N = 28.34 MPa
Sigma E = 27.06 MPa
Sigma V = 10.74 MPa
Tau NE = 2.08 MPa
Tau EV = 13.27 MPa
Tau NV = 1.13 MPa

CONTRAINTES PRINCIPALES

SIGMA 1 = 35.29 Mpa
SIGMA 2 = 27.53 Mpa
SIGMA 3 = 3.32 Mpa

COSINUS DIRECTEURS SYSTEME N-E-V

L 1 = .323	M 1 = .826	N 1 = .461
L 2 = -.947	M 2 = .281	N 2 = .158
L 3 = .001	M 3 = -.488	N 3 = .872

ORIENTATION DES CONTRAINTES PRINCIPALES

SIGMA 1 AZIMUTH = 249° ; PLONGÉE= 27°
SIGMA 2 AZIMUTH = 343° ;PLONGÉE = 9°
SIGMA 3 AZIMUTH = 90° ; PLONGÉE = 61°

5. REMARQUES

5.1 Les déformations récupérées introduites dans les calculs des contraintes proviennent des courbes de données de terrain (annexe B). Ce sont les différences observées sur les courbes de déformation récupérée contre l'avancement de la foreuse entre le palier marquant la fin de la récupération et celui caractérisant la fin de la période de stabilisation préalablement à la saignée.

5.2 Une des hypothèses implicites à la base des méthodes utilisées est que la saignée (prolongement du forage) libère complètement les contraintes agissant au point de mesure.

5.3 Les contraintes calculées à partir des résultats de terrain sont des contraintes ponctuelles. Elles sont affectées par l'hétérogénéité de la masse au point de mesure. De telles contraintes sont représentatives du champ de contrainte dans un volume qui est fonction de l'uniformité de ce champ. Plus le champ est uniforme, plus le volume est important.

5.4 Lors du rechargement permettant le calcul des paramètres élastiques, on suppose le champ de contraintes uniforme dans l'éprouvette et égal à la contrainte appliquée.

5.5 Lors de l'exécution de la saignée, le suivi de la température au point de mesure permet de statuer sur l'éventuelle influence de cette dernière sur la mesure. Dans le cas présent, les variations de température enregistrées étaient négligeables.

6. RÉFÉRENCES

BATUGIN, S.A., NIRENBURG, R.K., (1972), Approximate relation between elastic constants of anisotropic rocks and the anisotropy parameters. Sov. Min. Sci. Vol. 8, no 1, pp.5-8

CORTHÉSY, R., GILL, D.E., (1990): The modified doorstopper cell stress measuring technique. Proc. of the Conference on Stresses in underground structures: Determination, prediction and monitoring, Oct. 2-3, Ottawa, Canada, pp. 23-32.

CORTHÉSY, R. (1982): Développement d'une méthode analytique d'interprétation des mesures de pressions de terrains par la technique du "doorstopper" pour des roches anisotropes et non-linéaires, Mémoire de maîtrise, Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 66 pages.

CORTHÉSY, R., LEITE, M.H., HE, G., GILL, D.E. (1993a): The RPR method for the doorstopper technique: Four or six stress components from one or two boreholes: Rapport technique de l'École Polytechnique de Montréal # EPM/RT/-93/14, 40 p.

CORTHÉSY, R., GILL, D.E., LEITE M.H. (1993b): An integrated approach to rock stress measurement in non linear elastic anisotropic rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr, Vol. 30, no. 4, pp. 395-411.

GILL, D.E., CORTHÉSY, R., OUELLET, J., DUBÉ, P.B., NGUYEN, D. (1987): Improvement to doorstopper and Leeman cell stress measuring techniques. Proc. 2nd Int. Symp. on Field Measurements in Geomachanics, Kobe, Japan, Vol. 1, pp. 75-83.

ZIENKIEWICZ, O.C. (1983): The Finite Element Method, McGraw Hill, 100 pages.

RAHN, W. (1984): Stress concentration factors for the interpretation of doorstopper measurements in anisotropic rocks, Int. Journ. Rock Mech., Vol. 21, No. 6, pp. 313-326.

GRAY, W.M., TOEWS, N.A. (1967): Analysis of accuracy in the determination of the ground stress tensor by means of borehole devices, Proc. 9th US Rock Mech. Symp., pp. 45-78.

-- ANNEXE A --

MÉTHODE DE CALCUL DES CONTRAINTES AVEC LE DOORSTOPPER MODIFIÉ

A.1. Préambule

Les hypothèses à la base des calculs sont:

(i) les mesures des déformations récupérées suite à la saignée sont ponctuelles;
(ii) les jauges n'ont pas de sensibilité transversale;
(iii) la roche est élastique et linéaire;
(iv) la roche est supposée être ponctuellement anisotrope; l'hypothèse de l'isotropie transversale, le plan d'isotropie étant parallèle à l'axe du forage, permet de prendre en ligne de compte les différentes déformabilités de la roche sous les jauges des "doorstopper" (voir section A.5);

A.2. Relations contrainte-déformation en fond de trou

Le référentiel xyz est relié aux axes d'anisotropie, les axes x et z définissant le plan d'isotropie et l'axe y étant perpendiculaire à celui-ci. Compte tenu de l'hypothèse (iv) de la section A.1, nous avons en général d'après Zienkiewicz (1983):

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_1} - \nu_2 \frac{\sigma_y}{E_2} - \nu_1 \frac{\sigma_z}{E_1} \tag{1}$$

$$\epsilon_y = -\nu_2 \frac{\sigma_x}{E_2} + \frac{\sigma_y}{E_2} - \nu_2 \frac{\sigma_z}{E_2} \tag{2}$$

$$\epsilon_z = -\nu_2 \frac{\sigma_x}{E_1} - \nu_2 \frac{\sigma_y}{E_2} + \frac{\sigma_z}{E_1} \tag{3}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{2(1 + \nu_1)}{E_1} \tau_{xz} \tag{4}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_2} \tag{5}$$

et $$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G_2} \tag{6}$$

Les symboles σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz} et τ_{zx} sont les composantes du tenseur de contraintes et ϵ_x, ϵ_y, ϵ_z, γ_{xy}, γ_{yz} et γ_{zx} sont les composantes du tenseur de déformations. Les constantes élastiques sont E_1, E_2, ν_1, ν_2 et G_2. Les constantes E_1 et ν_1 s'appliquent au plan d'isotropie alors que les constantes E_2, ν_2 et G_2 s'appliquent perpendiculairement au plan d'isotropie.

Considérons que les symboles σ''_x, σ''_y, σ''_z, τ''_{xy}, τ''_{yz} et τ''_{zx} sont les composantes du tenseur de contraintes en fond de trou et ϵ''_x, ϵ''_y, ϵ''_z, γ''_{xy}, γ''_{yz} et γ''_{zx} sont les composantes du tenseur de déformations au même point. Les équations (1) à (6) donnent, en fond de trou, dans le cas d'un forage implanté parallèlement à z (contraintes planes dans le plan xy; $\sigma''_z = \tau''_{zx} = \tau''_{yz} = 0$):

$$\epsilon''_x = \frac{\sigma''_x}{E_1} - \nu_2 \frac{\sigma''_y}{E_2} \tag{7}$$

$$\epsilon''_y = \frac{\sigma''_y}{E_2} - \nu_2 \frac{\sigma''_x}{E_2} \tag{8}$$

et $$\gamma''_{xy} = \tau''_{xy} / G_2 \tag{9}$$

Il vient des équations précédentes:

$$\sigma''_x = \left(\frac{\epsilon''_x + \nu_2 \epsilon''_y}{1/E_1 - \nu_2^2/E_2}\right) \tag{10}$$

$$\sigma''_y = \epsilon''_y E_2 + \nu_2 \sigma''_x \tag{11}$$

et $$\tau''_{xy} = G_2 \gamma''_{xy}$$

A.3. Relations entre les contraintes en fond de trou et les contraintes préalables au forage du trou

Il est reconnu que les contraintes en fond de trou (σ''_x, σ''_y, σ''_z, τ''_{xy}, τ''_{yz} et τ''_{zx}) sont reliées aux contraintes préalables (σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz} et τ_{zx}), par les équations suivantes, d'après Rahn (1984):

$$\sigma''_x = a\,\sigma_x + b\,\sigma_y + c\,\sigma_z \tag{13}$$

$$\sigma''_y = a\,\sigma_y + b\,\sigma_x + c\,\sigma_z \tag{14}$$

et $$\tau''_{xy} = (a - b)\,\tau_{xy} \tag{15}$$

où a, b et c sont des facteurs obtenus expérimentalement ou à l'aide de méthodes numériques (Rahn, 1984).
L'utilisation de ces constantes lors des calculs est conforme à l'hypothèse (iv) de la section A.1.

Les équations (13) à (15) peuvent être réécrites comme suit:

$$\sigma_y = \frac{a\,\sigma''_y - b\,\sigma''_x}{a^2 - b^2} - \frac{c(a - b)}{a^2 - b^2}\,\sigma_z \tag{16}$$

$$\sigma_x = \frac{a\,\sigma''_x - b\,\sigma''_y}{a^2 - b^2} - \frac{c(a - b)}{a^2 - b^2}\,\sigma_z \tag{17}$$

et $$\tau_{xy} = \frac{1}{a - b}\,\tau''_{xy} \tag{18}$$

A.4. Invariants et moindres carrés

Les "doorstopper" utilisés comportent 4 jauges. Soit ϵ_1, ϵ_2, ϵ_3 et ϵ_4 les déformations mesurées par chacune de ces jauges. Les invariants ont pour expression:

$$I_1 = \epsilon_1 + \epsilon_2 \tag{19}$$

et $$I_2 = \epsilon_3 + \epsilon_4 \tag{20}$$

Suite à une mesure expérimentale, la comparaison des invariants constitue une des évaluations de la qualité des mesures. Le cas idéal est d'obtenir $I_1 = I_2$.

Si nous définissons le référentiel x'y' comme étant le système de référence des jauges, l'axe x' étant parallèle à la jauge 1 (jauge horizontale) et l'axe y' étant parallèle à la jauge 2 (jauge verticale), les relations entre les déformations en un point conduisent, dans le cas du cylindre récupéré lors de la saignée, à l'expression suivante:

$$\epsilon_i = \epsilon_{x'}\sin^2\Theta_i + \epsilon_{y'}\cos^2\Theta_i - \gamma_{x'y'}\sin\Theta_i\cos\Theta_i \qquad (i = 1, 2, 3 \text{ et } 4) \tag{21}$$

Compte tenu que $\Theta_1 = 0°$, $\Theta_2 = 90°$, $\Theta_3 = 45°$ et $\Theta_4 = 135°$, et qu'il faille procéder par moindres carrés étant donné un plus grand nombre d'équations que d'inconnues, on arrive à:

$$\epsilon_{x'} = (\epsilon_3 - \epsilon_2 + \epsilon_4 + 3\epsilon_1)/4 \tag{22}$$

$$\epsilon_{y'} = (\epsilon_3 - \epsilon_1 + \epsilon_4 + 3\epsilon_2)/4 \tag{23}$$

et $$\gamma_{x'y'} = \epsilon_3 - \epsilon_4 \tag{24}$$

Dans le cas du fond de trou, les équations (22) à (24) tiennent toujours, sauf que ϵ''_i devient ϵ_i, $\epsilon_{x'}$ devient ϵ''_x, ...

A.5. Détermination des constantes élastiques

Les équations (1) à (6) donnent, dans le cas d'une compression biaxiale (radiale) de grandeur P du cylindre, comportant le "doorstopper" et récupéré lors de la saignée:

$$\epsilon_I = P\left(\frac{1}{E_2} - \frac{\nu_2}{E_2}\right) \tag{25}$$

et $$\epsilon_{II} = P\left(\frac{1}{E_1} - \frac{\nu_2}{E_2}\right) \tag{26}$$

où ϵ_I et ϵ_{II} sont des déformations principales dans le plan xy. L'axe principal I est considéré comme étant confondu avec l'axe y, l'axe normal au plan d'isotropie, conformément à l'hypothèse de l'anisotropie transversale ponctuelle (hypothèse iv de la section A.1).

L'obtention des déformations principales requiert l'utilisation de l'équation présentée ci-après:

$$\varepsilon_{,I,II} = \frac{\varepsilon_{x'} + \varepsilon_{y'}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{x'} - \varepsilon_{y'}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{x'y'}}{2}\right)^2} \tag{27}$$

Leur orientation est définie par:

$$\mathrm{tg}\, 2\alpha_{I,II} = \frac{\gamma_{x'y'}}{\epsilon_{x'} - \epsilon_{y'}} \tag{28}$$

L'identification de la valeur de α obtenue de l'équation (28) qui correspond à ϵ_I se fait de la manière usuelle. L'angle α_I se mesure de l'axe y' vers la direction de ϵ_I.

Les équations (25) et (26) permettent d'écrire:

$$E_2 = \frac{P(1 - \nu_2)}{\epsilon_I} \tag{29}$$

et $$E_1 = \frac{P}{\epsilon_{II} + \nu_2 P/E_2} \tag{30}$$

Le module G_2 est calculé comme suit (Batugin et al., 1972)

$$G_2 = \frac{E_1\ E_2}{E_1 + E_2 + 2\nu E_2} \tag{31}$$

alors que ν_2 est considéré égal à ν_1 et égal à υ donné par (Corthésy et al., 1993b)

$$\upsilon = \frac{\lambda\varepsilon_{III} + (\frac{E_2}{E_1})\varepsilon_I}{-\varepsilon_{III} - \lambda\varepsilon_I} \tag{32}$$

où ϵ_I et ϵ_{III} sont respectivement les déformations principales majeure et mineure mesurées sous le doorstopper lors d'un essai de compression diamétrale où la force est appliquée dans la direction de la plus grande déformabilité mesurée lors de l'essai de compression biaxiale isotrope. Le paramètre λ tient compte de l'influence de l'anisotropie sur la distribution de contraintes dans la carotte lors de la compression diamétrale.

En résumé, les résultats d'une compression biaxiale de grandeur P exécutée sur un cylindre, comportant un "doorstopper", récupéré lors d'une saignée (ϵ_1, ϵ_2, ϵ_3 et ϵ_4), sont substitués dans les équations (22) à (24). Puis, à l'aide de l'équation (27), on détermine ϵ_I et ϵ_{II} qui sont à leur tour substituées dans les équations (29) à (32) afin de déterminer les constantes E_1, E_2, G_2 et ν. L'angle α_I, obtenu de l'équation (28) sert à orienter l'axe y qui définit la direction de l'axe d'anisotropie.

A.6. Extension aux trois dimensions

Le tenseur de contrainte tridimensionnel fait intervenir six composantes. Un premier forage donne seulement trois équations indépendantes. Un second trou de forage non parallèle et non perpendiculaire au premier permet d'écrire deux nouvelles équations indépendantes et un dernier forage permet l'obtention de la dernière équation indépendante requises pour le calcul du tenseur 3D.

Afin de minimiser l'effet des erreurs expérimentales, les neuf équations sont utilisées et le système est résolu par la méthode des moindres carrés.

Chaque mesure est exprimée dans un système d'axe xyz, défini précédemment, l'axe z étant confondu avec le forage. Pour combiner les mesures faites dans trois trous de forage non parallèle et obtenir le tenseur de contrainte tridimensionnel, il faut les ramener dans un même référentiel. Celui-ci est généralement un système d'axes NEV (nord, est et verticale).

Les cosinus directeurs permettant de relier les systèmes xyz_i (i=1 à 3) au système NEV sont:

$$\begin{aligned} l_1 &= \cos(\delta_i + 90°),\ m_1 = \sin(\delta_i + 90°),\ n_1 = 0 \\ l_2 &= \sin\rho_i\cos\delta_i,\quad m_2 = \sin\rho_i\sin\delta_i,\ n_2 = \cos\rho_i \\ l_3 &= \cos\delta_i\cos\rho_i,\quad m_3 = \sin\delta_i\cos\rho_i,\ n_3 = -\sin\rho_i \end{aligned} \tag{33}$$

où δ_i et ρ_i sont respectivement la plongée et la direction du forage "i", cette direction étant sous forme d'azimuth et la plongée étant considérée positive vers le haut.

En utilisant les relations entre les contraintes en un point, il est possible de relier les expressions des composantes de contraintes obtenues dans chacun des divers forages avec les composantes du tenseur de contrainte dans le référentiel NEV (Gray et Toews, 1967):

$$\{D\} = [J]\{b\} \tag{34}$$

ou sous forme explicite,

$$\begin{vmatrix} \sigma_{xi} \\ \sigma_{yi} \\ \tau_{xyi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} l_{1i}^2 & m_{1i}^2 & n_{1i}^2 & 2\,m_{1i}\,n_{1i} & 2\,n_{1i}\,l_{1i} & 2\,l_{1i}\,m_{1i} \\ l_{2i}^2 & m_{2i}^2 & n_{2i}^2 & 2\,m_{2i}\,n_{2i} & 2\,n_{2i}\,l_{2i} & 2\,l_{2i}\,m_{2i} \\ l_{1i}\,l_{2i} & m_{1i}\,m_{2i} & n_{1i}\,n_{2i} & (m_{1i}\,n_{2i} + n_{1i}\,m_{2i}) & (l_{1i}\,n_{2i} + n_{1i}\,l_{2i}) & (l_{1i}\,m_{2i} + m_{1i}\,l_{2i}) \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \sigma_N \\ \sigma_E \\ \sigma_V \\ \tau_{NE} \\ \tau_{NV} \\ \tau_{EV} \end{vmatrix}$$

où $\{D\}$ est un vecteur contenant les neuf termes de contraintes (σ_{xi} σ_{yi} τ_{xyi}, $i = 1,3$) mesurés avec les "doorstopper", $\{b\}$ est un vecteur contenant les six composantes de contraintes dans le système NEV et $[J]$ la matrice des coefficients comportants les cosinus disrecteurs des trois forages ($i=1,3$).

Soit D_i ($i = 1,9$) les valeurs de contraintes mesurées qui sont entachées d'erreurs expérimentales et d_i ($i = 1,9$) les vraies valeurs de contraintes que l'on obtiendrait s'il n'y avait pas d'erreurs. On peut alors définir l'erreur expérimentale comme suit:

$$e_i = D_i - d_i, \qquad (i= 1,9) \tag{35}$$

alors, de l'équation (35), les valeurs mesurées peuvent s'exprimer de la façon suivante:

$$D_i = d_i + e_i \tag{36}$$

Soit b_j ($j = 1,6$) les valeurs des contraintes qui permettent de minimiser la somme des carrés des erreurs e_i:

$$\sum_{i=1}^{9} (e_i)^2 = Q \tag{37}$$

Pour obtenir le minimum de Q, on pose la condition suivante:

$$\frac{d\,Q}{d\,b_i} = 0 \tag{38}$$

On peut réécrire l'équation (37) comme suit:

$$Q = \sum_{i=1}^{9} (D_i - \sum_{j=1}^{6} J_{ij} b_j)^2 \tag{39}$$

où J_{ij} sont les termes tirés de la matrice [J] de l'équation (34). Si on pose la condition (38) à l'équation (39), les expressions suivantes sont obtenues:

$$\sum_{j=1}^{6} F_{kj}\, b_j = c_k \qquad (k = 1,6) \tag{40}$$

où $$c_k = \sum_{i=1}^{9} D_i\, J_{jk} \tag{41}$$

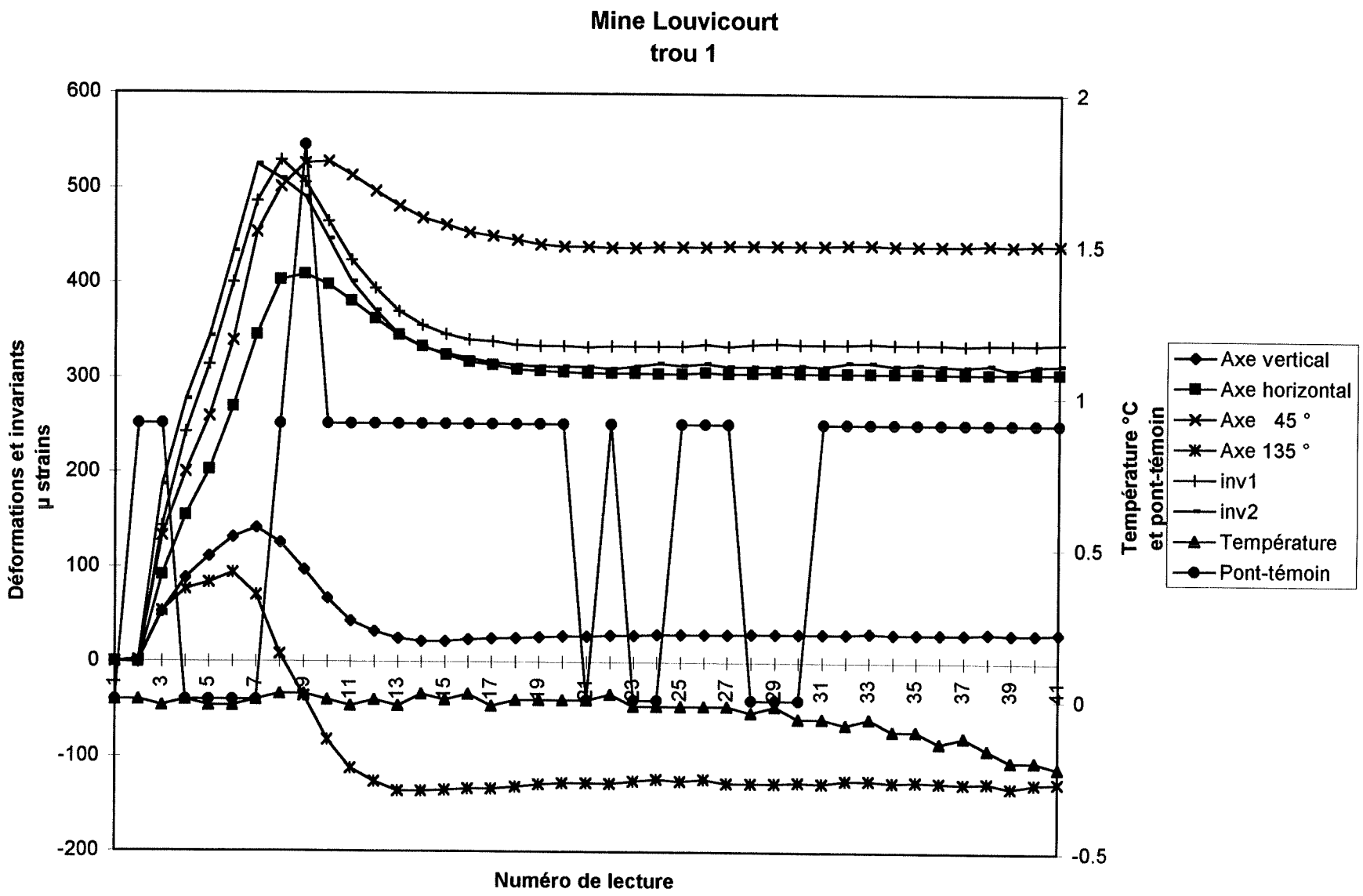
$$F_{kj} = \sum_{i=1}^{9} J_{ij}\, J_{ik} \tag{42}$$

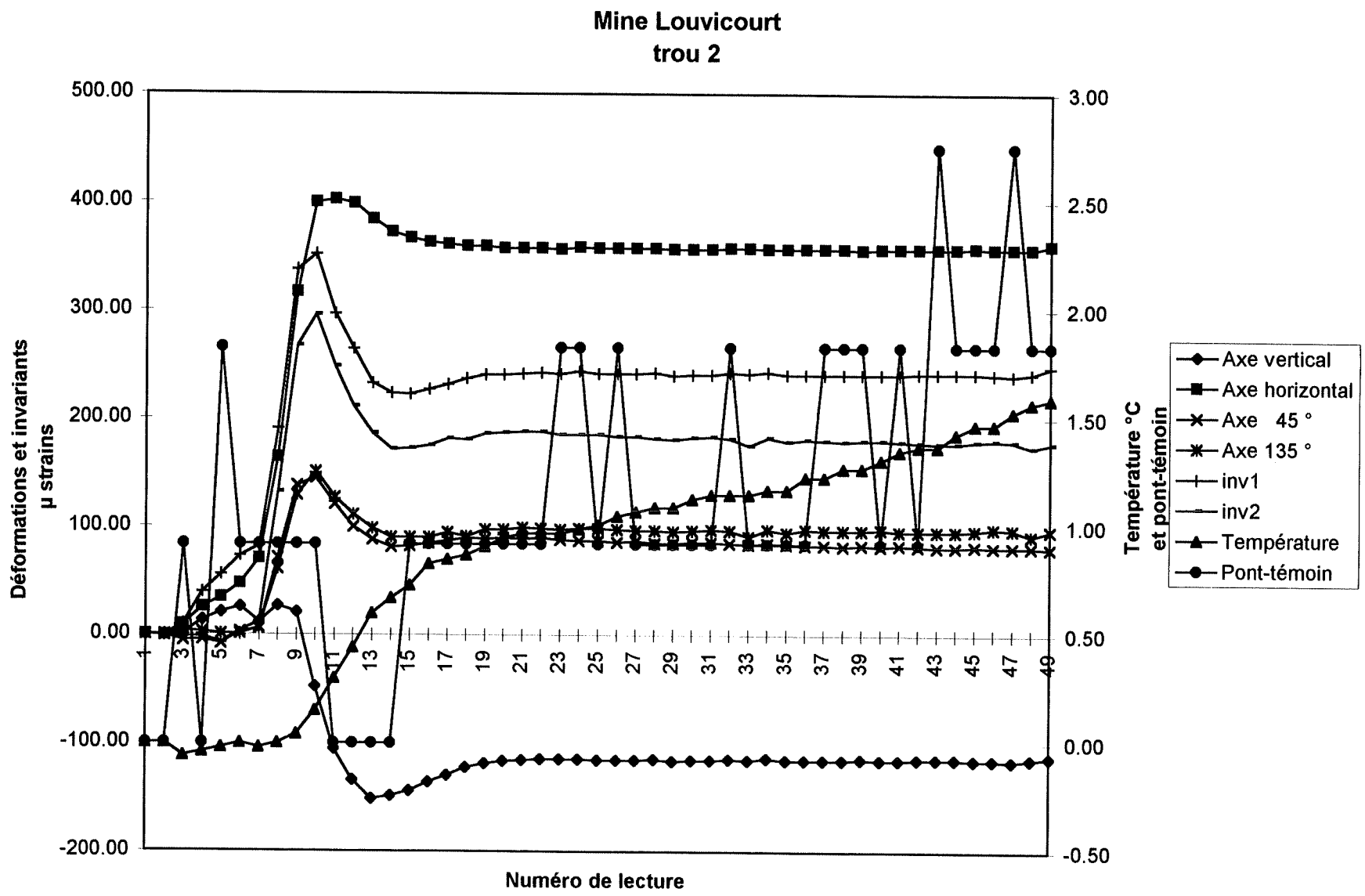
La solution du système d'équations (40) donne les six composantes de contraintes, dans le système NEV, qui minimisent l'équation (37).

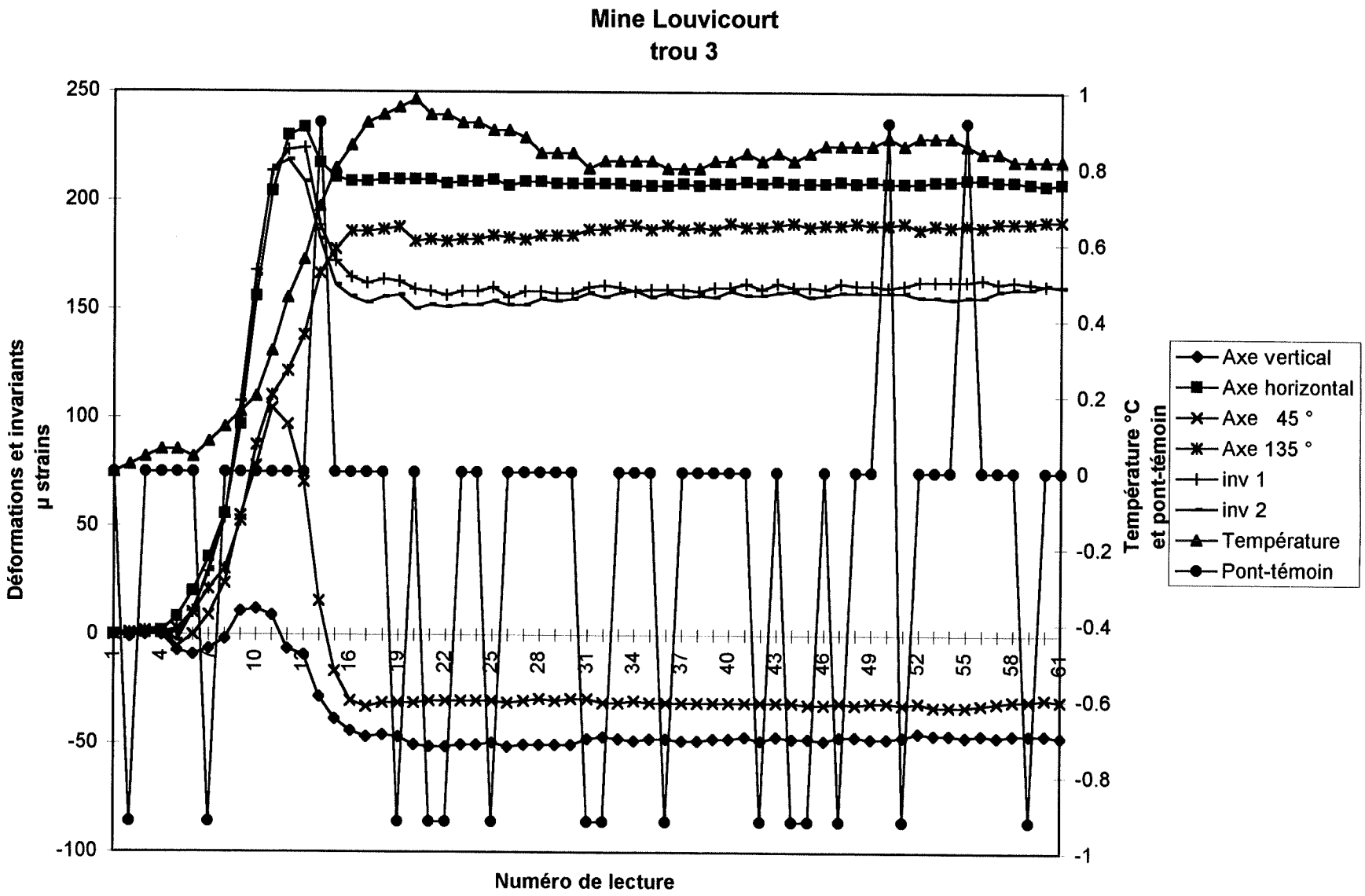
Notons que le radical de [Q divisé par le nombre d'équation disponibles moins le nombre d'équations requises (soit 9 - 6 = 3)], nous donne la valeur de l'erreur standard dont il est fait mention à la section 4.2.

-- ANNEXE B --

DONNÉES DE TERRAIN

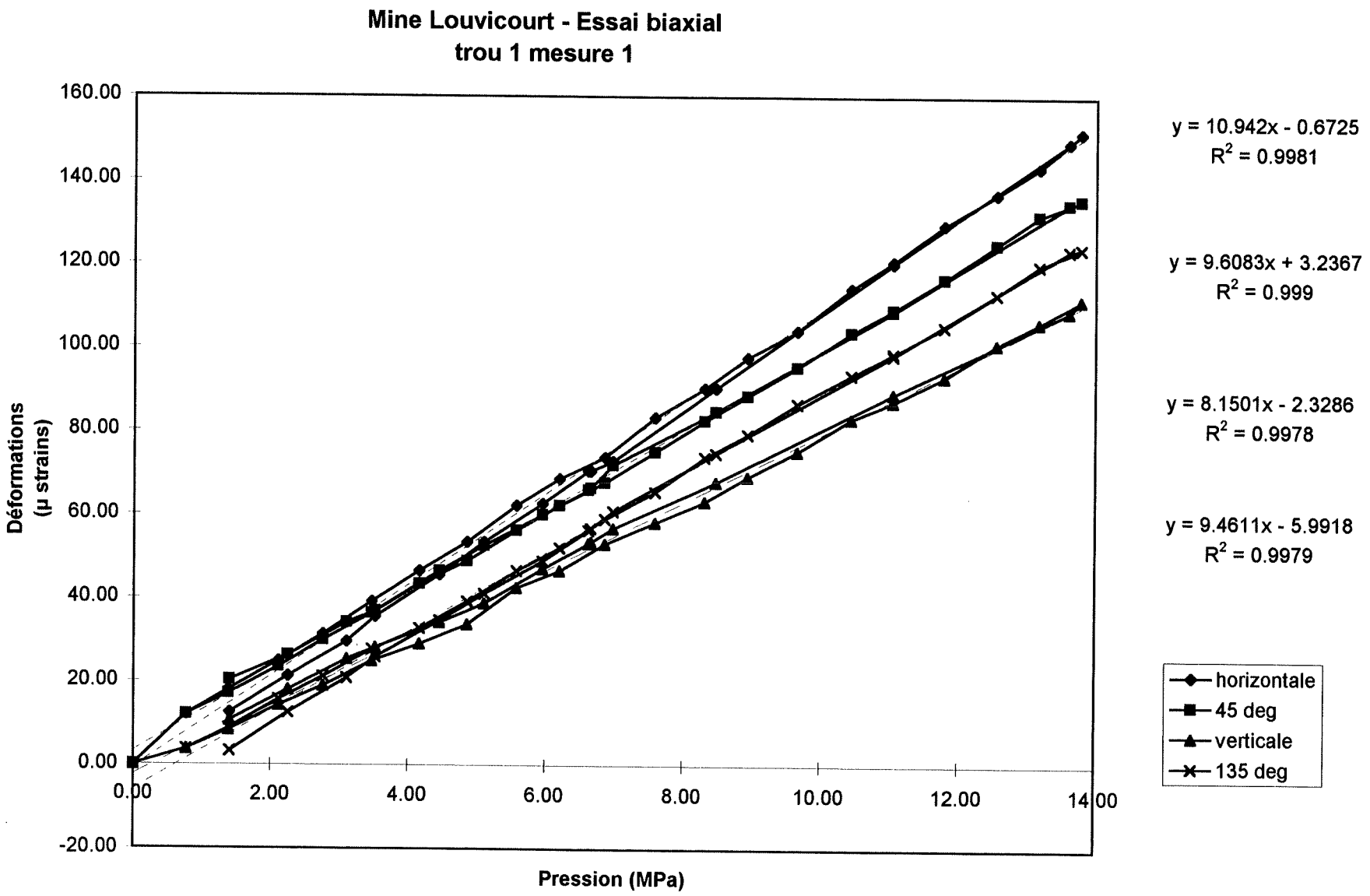

Mine Louvicourt
trou 1
Déformations et invariants
µ strains
Température °C
et pont-témoin
Numéro de lecture
600
500
400
300
200
100
0
-100
-200
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
1
3
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
25
27
29
31
33
35
37
39
41
Axe vertical
Axe horizontal
Axe 45 °
Axe 135 °
inv1
inv2
Température
Pont-témoin

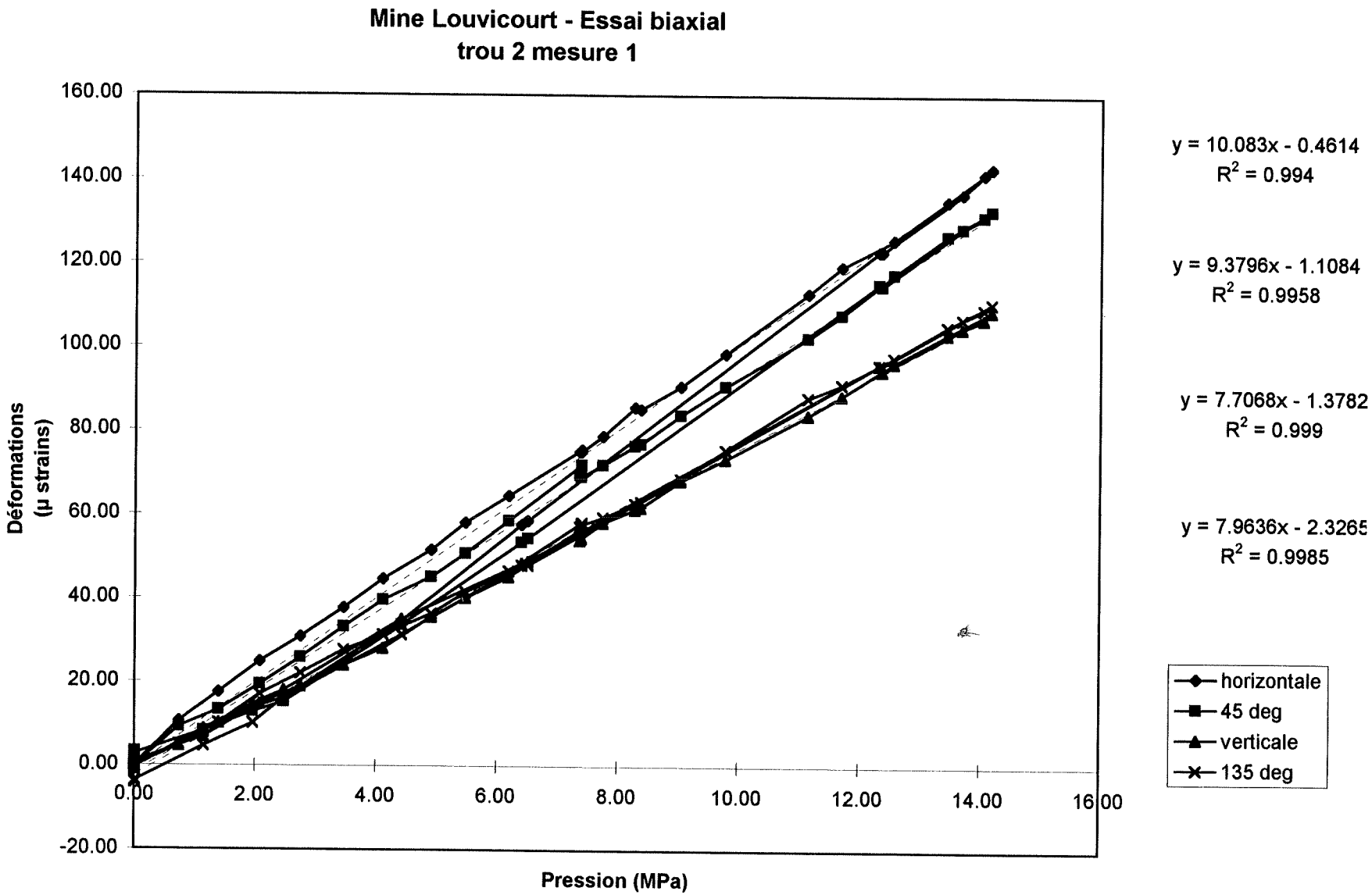

Mine Louvicourt
trou 2
Déformations et invariants
µ strains
Température °C
et pont-témoin
Numéro de lecture
500.00
400.00
300.00
200.00
100.00
0.00
-100.00
-200.00
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
0.00
-0.50
1
3
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
25
27
29
31
33
35
37
39
41
43
45
47
49
Axe vertical
Axe horizontal
Axe 45 °
Axe 135 °
inv1
inv2
Température
Pont-témoin

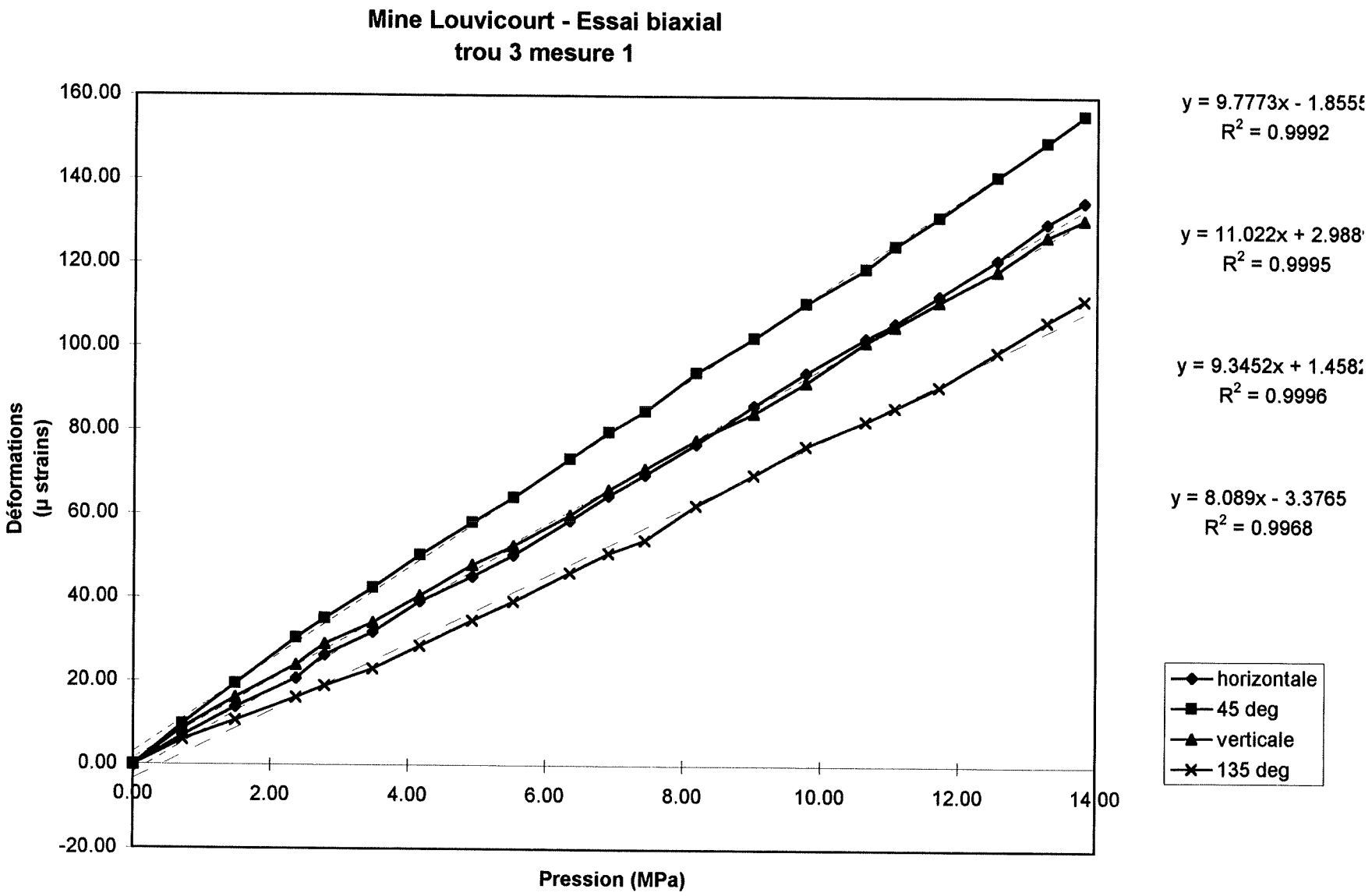

Mine Louvicourt
trou 3
Déformations et invariants
µ strains
Température °C
et pont-témoin
Numéro de lecture
250
200
150
100
50
0
-50
-100
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
1
4
7
10
13
16
19
22
25
28
31
34
37
40
43
46
49
52
55
58
61
Axe vertical
Axe horizontal
Axe 45 °
Axe 135 °
inv 1
inv 2
Température
Pont-témoin

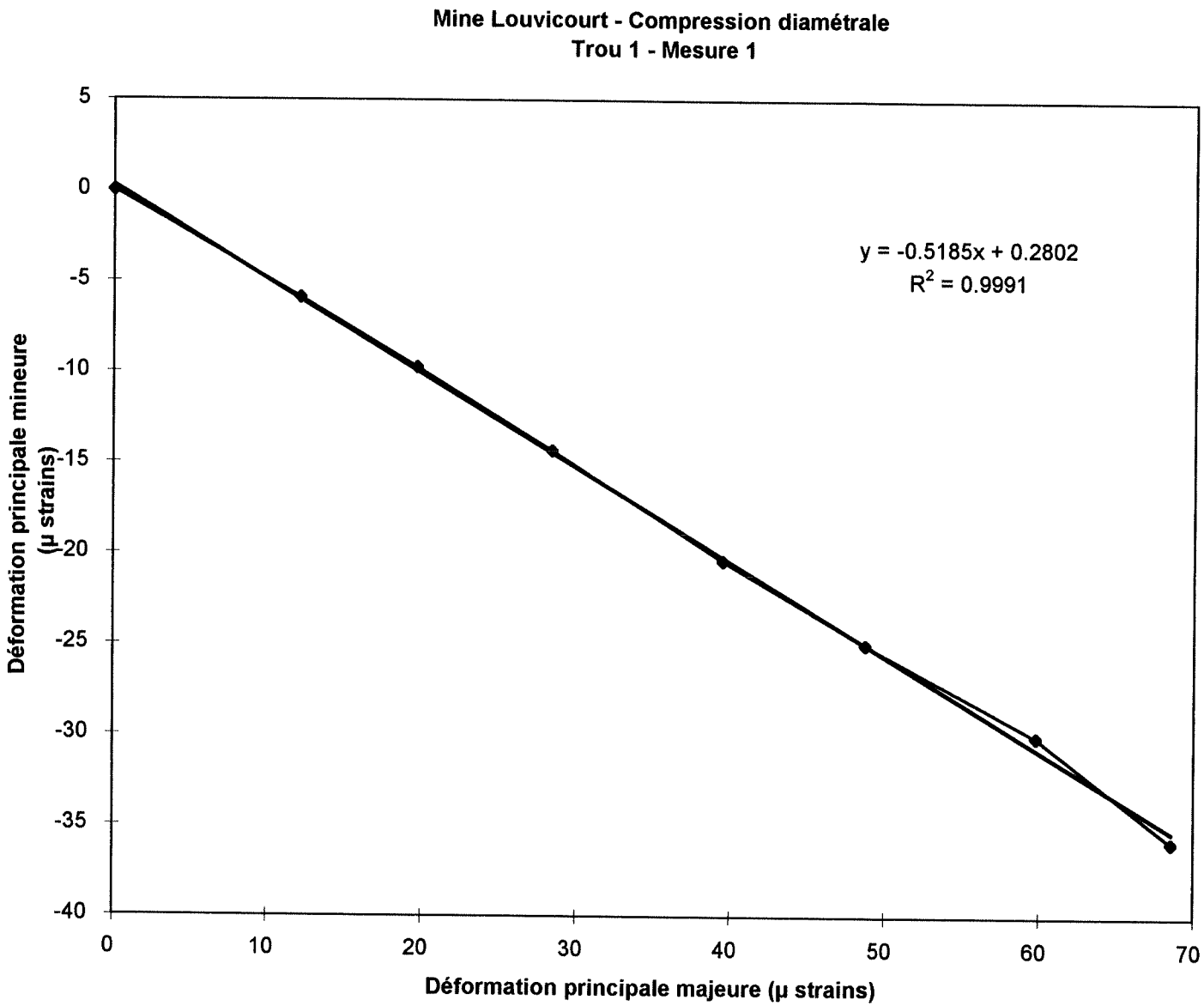
-- ANNEXE C --

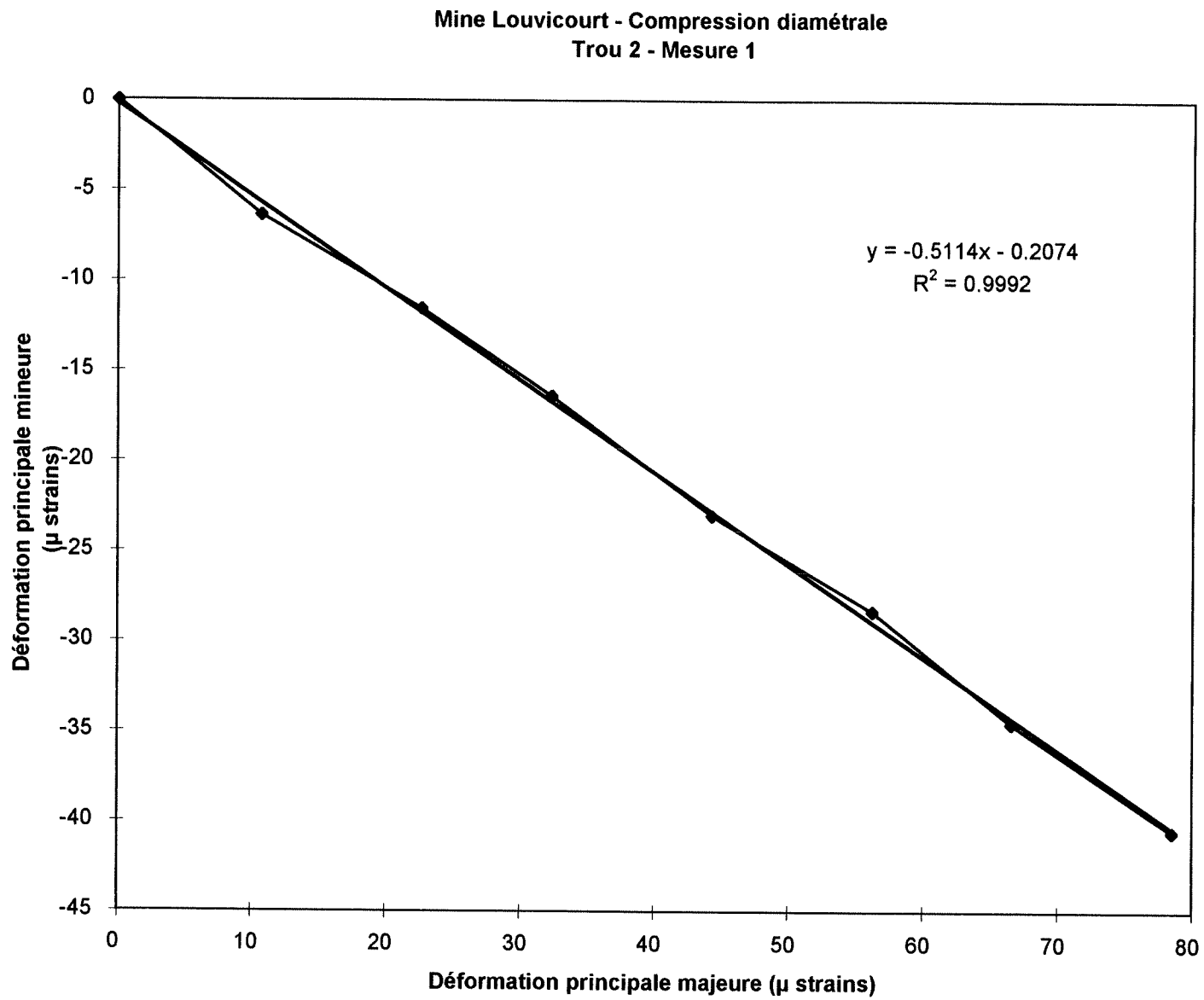
RECHARGEMENTS AU LABORATOIRE

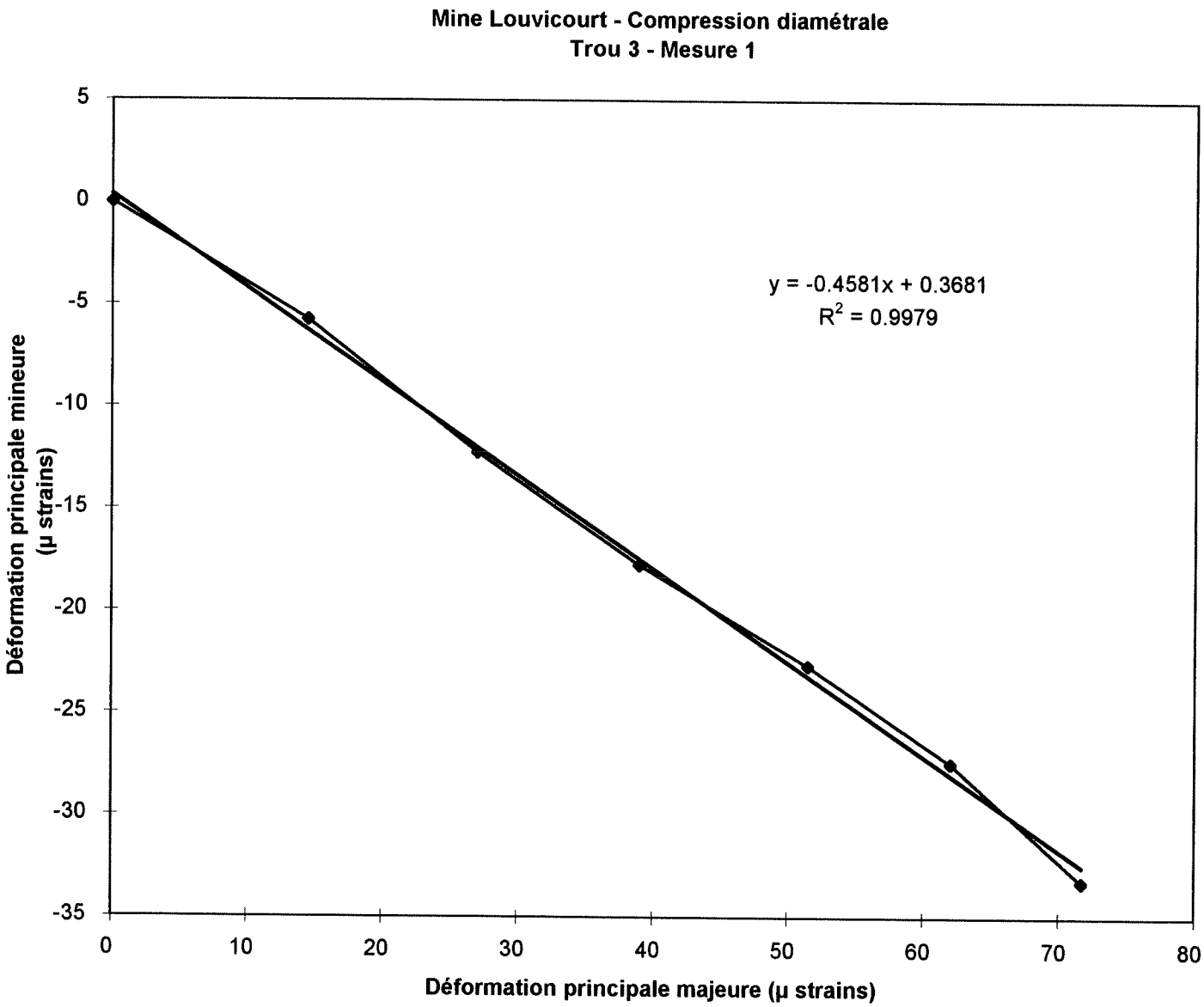

Mine Louvicourt - Essai biaxial
trou 1 mesure 1
Déformations
(µ strains)
160.00
140.00
120.00
100.00
80.00
60.00
40.00
20.00
0.00
-20.00
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
12.00
14.00
Pression (MPa)
y = 10.942x - 0.6725
R2 = 0.9981
y = 9.6083x + 3.2367
R2 = 0.999
y = 8.1501x - 2.3286
R2 = 0.9978
y = 9.4611x - 5.9918
R2 = 0.9979
horizontale
45 deg
verticale
135 deg


Mine Louvicourt - Essai biaxial
trou 2 mesure 1
Déformations
(µ strains)
160.00
140.00
120.00
100.00
80.00
60.00
40.00
20.00
0.00
-20.00
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
12.00
14.00
16.00
Pression (MPa)
y = 10.083x - 0.4614
R2 = 0.994
y = 9.3796x - 1.1084
R2 = 0.9958
y = 7.7068x - 1.3782
R2 = 0.999
y = 7.9636x - 2.3265
R2 = 0.9985
horizontale
45 deg
verticale
135 deg


Mine Louvicourt - Essai biaxial
trou 3 mesure 1
Déformations
(µ strains)
160.00
140.00
120.00
100.00
80.00
60.00
40.00
20.00
0.00
-20.00
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
12.00
14.00
Pression (MPa)
y = 9.7773x - 1.855
R2 = 0.9992
y = 11.022x + 2.988
R2 = 0.9995
y = 9.3452x + 1.458
R2 = 0.9996
y = 8.089x - 3.3765
R2 = 0.9968
horizontale
45 deg
verticale
135 deg


Mine Louvicourt - Compression diamétrale
Trou 1 - Mesure 1
y = -0.5185x + 0.2802
R2 = 0.9991
Déformation principale mineure (µ strains)
Déformation principale majeure (µ strains)
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
-40
0
10
20
30
40
50
60
70


Mine Louvicourt - Compression diamétrale
Trou 2 - Mesure 1
y = -0.5114x - 0.2074
R2 = 0.9992
Déformation principale mineure (µ strains)
Déformation principale majeure (µ strains)
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
-40
-45
0
10
20
30
40
50
60
70
80


Mine Louvicourt - Compression diamétrale
Trou 3 - Mesure 1
y = -0.4581x + 0.3681
R2 = 0.9979
Déformation principale mineure (µ strains)
Déformation principale majeure (µ strains)
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
0
10
20
30
40
50
60
70
80

-- ANNEXE D --

CONTRAINTES PARTIELLES 2D

RESULTATS MESURE # LOUVIC_1
==========

RECHARGEMENT BIAXIAL EN LABORATOIRE
==========
JAUGE 1 A 10 MPa = 109.5 (udef)
JAUGE 2 A 10 MPa = 81.5 (udef)
JAUGE 3 A 10 MPa = 96.1 (udef)
JAUGE 4 A 10 MPa = 94.5 (udef)
ECART MOYEN ENTRE LES INVARIANTS = 0 %

MODULE E1 = 85413.53 (MPa)
MODULE E2 = 68907 (MPa)
MODULE G2 = 30963.19 (MPa)
COEFFICIENT DE POISSON = .246
ANGLE DE L'AXE D'ANISOTROPIE P/R A LA JAUGE # 1 = 1.63 DEGRES
DEGRE D'ANISOTROPIE (E1/E2) = 1.239548

MESURES IN SITU
==========
DEFORMATIONS RECUPEREES
JAUGE # 1 = 305.7 (udef)
JAUGE # 2 = 30.3 (udef)
JAUGE # 3 = 440.9 (udef)
JAUGE # 4 = -124.3 (udef)
ECART ENTRE LES INVARIANTS = 5 %

CONTRAINTES DANS LE SYSTEME DE REFERENCE DES JAUGES

// JAUGE 0 DEGRES = 17.24412 (MPa) + (.48) * CONTRAINTE // AU FORAGE
// JAUGE 90 DEGRES = 7.351297 (MPa) + (.48) * CONTRAINTE // AU FORAGE
CONTRAINTE DE CISAILLEMENT = 12.50003 (MPa)

CONTRAINTES PRINCIPALES SECONDAIRES

MAJEURE = 25.74083 (MPa) + (.48) * CONTRAINTE // AU FORAGE
MINEURE = -1.145421 (MPa) + (.48) * CONTRAINTE // AU FORAGE

CONTRAINTE SECONDAIRE MAJEURE P/R A LA JAUGE # 1 = 34 DEGRES
(LE SENS TRIGONOMETRIQUE EST CONSIDERE POSITIF)

JAUGE # 1 = JAUGE 0 DEGRES = JAUGE HORIZONTALE
JAUGE # 2 = JAUGE 90 DEGRES = JAUGE VERTICALE

RESULTATS MESURE # LOUVIC_2
==========

RECHARGEMENT BIAXIAL EN LABORATOIRE
==========
JAUGE 1 A 10 MPa = 100.8 (udef)
JAUGE 2 A 10 MPa = 77.1 (udef)
JAUGE 3 A 10 MPa = 93.8 (udef)
JAUGE 4 A 10 MPa = 79.6 (udef)
ECART MOYEN ENTRE LES INVARIANTS = 2 %

MODULE E1 = 93775.75 (MPa)
MODULE E2 = 74479.12 (MPa)
MODULE G2 = 33840.48 (MPa)
COEFFICIENT DE POISSON = .243
ANGLE DE L'AXE D'ANISOTROPIE P/R A LA JAUGE # 1 = 15.46 DEGRES
DEGRE D'ANISOTROPIE (E1/E2) = 1.259088

MESURES IN SITU
==========
DEFORMATIONS RECUPEREES
JAUGE # 1 = 356.8 (udef)
JAUGE # 2 = -115.7 (udef)
JAUGE # 3 = 83.4 (udef)
JAUGE # 4 = 95.8 (udef)
ECART ENTRE LES INVARIANTS = 29 %

CONTRAINTES DANS LE SYSTEME DE REFERENCE DES JAUGES

// JAUGE 0 DEGRES = 18.39421 (MPa) + (.48) * CONTRAINTE // AU FORAGE
// JAUGE 90 DEGRES = -2.861661 (MPa) + (.48) * CONTRAINTE // AU FORAGE
CONTRAINTE DE CISAILLEMENT = -.8102608 (MPa)

CONTRAINTES PRINCIPALES SECONDAIRES

MAJEURE = 18.42505 (MPa) + (.48) * CONTRAINTE // AU FORAGE
MINEURE = -2.892503 (MPa) + (.48) * CONTRAINTE // AU FORAGE

CONTRAINTE SECONDAIRE MAJEURE P/R A LA JAUGE # 1 = -3 DEGRES
(LE SENS TRIGONOMETRIQUE EST CONSIDERE POSITIF)

JAUGE # 1 = JAUGE 0 DEGRES = JAUGE HORIZONTALE
JAUGE # 2 = JAUGE 90 DEGRES = JAUGE VERTICALE

RESULTATS MESURE # LOUVIC_3
==========

RECHARGEMENT BIAXIAL EN LABORATOIRE
==========
JAUGE 1 A 10 MPa = 98 (udef)
JAUGE 2 A 10 MPa = 93.5 (udef)
JAUGE 3 A 10 MPa = 110 (udef)
JAUGE 4 A 10 MPa = 81.6 (udef)
ECART MOYEN ENTRE LES INVARIANTS = 0 %

MODULE E1 = 91797.1 (MPa)
MODULE E2 = 72626.81 (MPa)
MODULE G2 = 34254.98 (MPa)
COEFFICIENT DE POISSON = .2
ANGLE DE L'AXE D'ANISOTROPIE P/R A LA JAUGE # 1 = 40.49 DEGRES
DEGRE D'ANISOTROPIE (E1/E2) = 1.263956

MESURES IN SITU
==========
DEFORMATIONS RECUPEREES
JAUGE # 1 = 206.2 (udef)
JAUGE # 2 = -50.5 (udef)
JAUGE # 3 = -44.9 (udef)
JAUGE # 4 = 186 (udef)
ECART ENTRE LES INVARIANTS = 9 %

CONTRAINTES DANS LE SYSTEME DE REFERENCE DES JAUGES

// JAUGE 0 DEGRES = 13.10474 (MPa) + (.45) * CONTRAINTE // AU FORAGE
// JAUGE 90 DEGRES = .7278156 (MPa) + (.45) * CONTRAINTE // AU FORAGE
CONTRAINTE DE CISAILLEMENT = -6.074329 (MPa)

CONTRAINTES PRINCIPALES SECONDAIRES

MAJEURE = 15.58776 (MPa) + (.45) * CONTRAINTE // AU FORAGE
MINEURE = -1.755201 (MPa) + (.45) * CONTRAINTE // AU FORAGE

CONTRAINTE SECONDAIRE MAJEURE P/R A LA JAUGE # 1 = -23 DEGRES
(LE SENS TRIGONOMETRIQUE EST CONSIDERE POSITIF)

JAUGE # 1 = JAUGE 0 DEGRES = JAUGE HORIZONTALE
JAUGE # 2 = JAUGE 90 DEGRES = JAUGE VERTICALE

-- ANNEXE E --

DEVIS TECHNIQUE

DEVIS TECHNIQUE
PROGRAMME DE MESURES DE CONTRAINTES IN-SITU
MINE LOUVICOURT

E.1. Type de cellule utilisée

Les mesures ont été exécutées avec des cellules C.S.I.R. du type "doorstopper" à 4 jauges fabriquées par Luwes et vendues par Roctest Ltée.

Puisque ces cellules ne sont pas scellées en place avec l'outil conventionnellement utilisé, une rainure doit être pratiquée dans leur enveloppe extérieure pour s'assurer de leur orientation lors de leur scellement.

Afin de pouvoir procéder à des mesures en continu des déformations récupérées lors de la réalisation de la saignée, les cellules modifiées sont fixées au Module Acquisiteur Intelligent (MAI) qui fait à la fois le conditionnement du signal et l'enregistrement automatique des données

Les cellules sont modifiées afin de permettre l'enregistrement de la température en fond de trou au cours de l'essai. Un capteur de température est ajouté au "doorstopper", de manière telle qu'il est en contact avec la masse rocheuse.

E.2 Description de la méthode d'essai

La première étape consiste à forer un trou de calibre NX jusqu'à un demi pouce en deçà du point où la mesure doit être faite.

La deuxième étape consiste à polir le fond du forage avec des taillants plats diamantés. Ce polissage doit se faire en deux étapes (grossier et fin) et amène le fond du forage à l'endroit où la mesure doit être faite.

Le nettoyage du trou constitue la troisième étape. Les fragments de roche doivent être enlevés à l'aide d'un jet d'eau. Le fond du trou est ensuite asséché et nettoyé à l'aide de solvant pour enlever toute trace d'huile.

Vient ensuite le collage de la cellule à la paroi du fond du trou. L'outil de mise en place consiste en un train de tiges évidées et orientées, comportant à son extrémité un cylindre dans lequel s'épaule le MAI. Le diamètre de ce cylindre est tel qu'il centre la cellule au fond du trou. La mise en place se fait à l'intérieur du train de tiges alors que le câble de communication entre le MAI et l'ordinateur est branché. Une fois que la colle a fait prise, les jauges sont balancées et le MAI est programmé pour réaliser une mesure à toutes les 5 secondes. Le câble du MAI est alors débranché, ce dernier fonctionne alors sur piles. L'eau de forage est ensuite mise en circulation et une période d'attente de 15 minutes permet à la température de se stabiliser en fond de trou. La saignée est alors réalisée par prolongement du

forage. Durant l'exécution de cette dernière, les déformations récupérées sont mesurées en continu ainsi que la température au point de mesure et une résistance étalon qui permet d'évaluer la stabilité du MAI en cours d'essai.

E.3 Détermination de la déformabilité

Chaque morceau de carotte de roche comportant un "doorstopper" récupéré après la saignée doit être soumis à une compression biaxiale isotrope afin de déterminer la déformabilité sous chacune des 4 jauges du "doorstopper". Cet essai est suivi d'une compression diamétrale permettant le calcul du coefficient de Poisson.

E.4 Interprétation des résultats

Les courbes de déformation récupérées en fonction de l'avancement de la foreuse doivent être examinées et comparées aux courbes qui devraient être obtenues en théorie. Les invariants de déformation doivent être calculés et les courbes qu'ils permettent de tracer doivent être comparées entre elles.

Dans le cas du calcul des tenseurs bidimensionnels, les grandeurs des contraintres principales secondaires ne sont que partiellement connues, étant donné que l'on doit y ajouter une composante fonction de la contrainte normale parallèle à l'axe du trou de forage en faisant intervenir le modèle analytique le plus approprié. Le choix de ce modèle doit découler des observations faites à la section 6. La redondance d'une mesure de déformation dans le plan du fond de trou permet l'utilisation des moindres carrés pour le calcul du tenseur de déformation dans ce plan.

Afin d'obtenir un tenseur de contrainte tridimensionnel, les composantes de contraintes secondaires sont combinées par la méthode des moindres carrés tel que présentée à l'annexe A.

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
3 9334 00199909 1

École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succ. Centre-ville
Montréal (Québec)
H3C 3A7